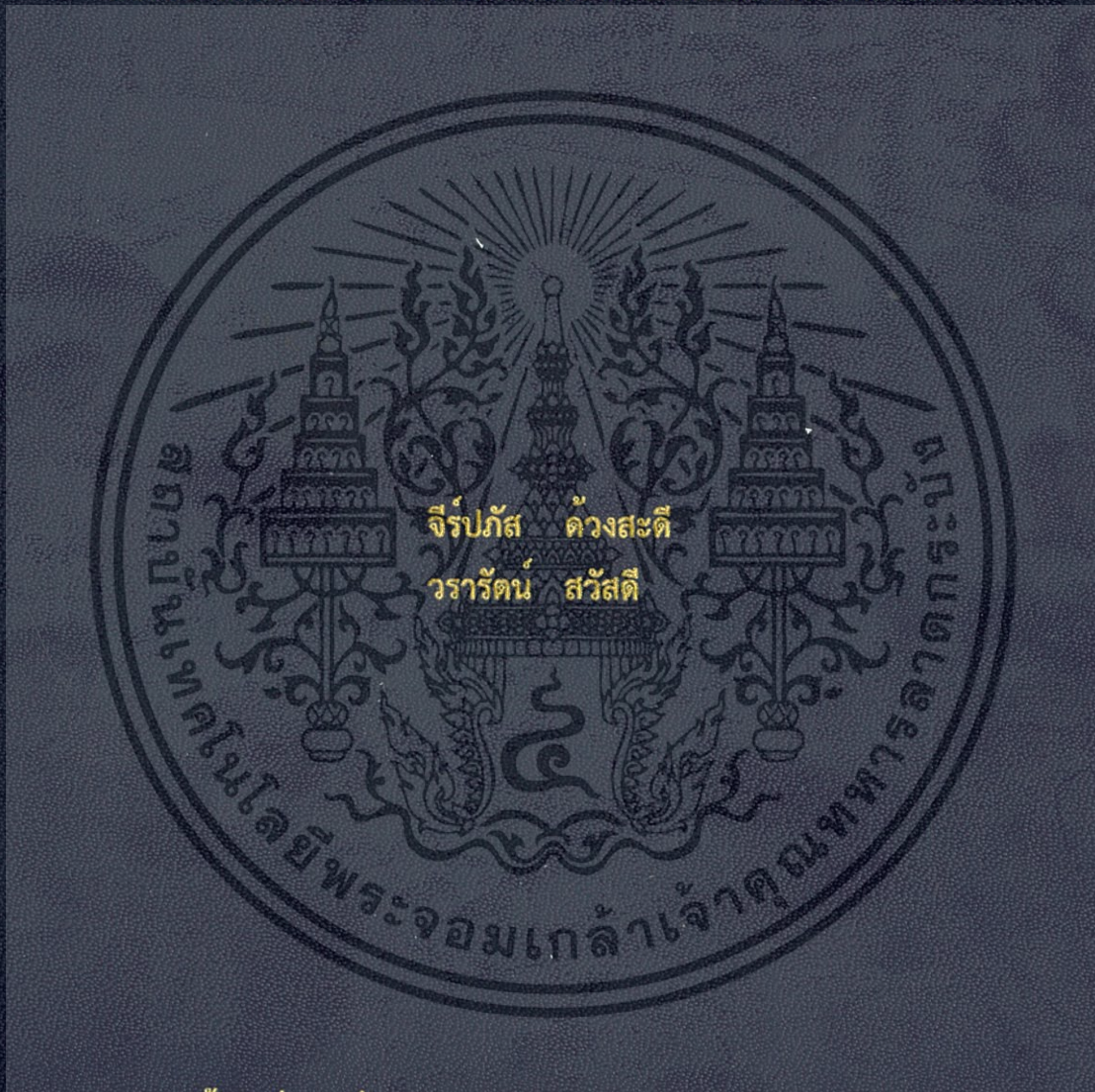


การศึกษาสมบัติรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ p-SnS/n-Si ที่เตรียมโดย

วิธีการระเหิดสารเคมีในระยะประชิด

CHARACTERIZATION OF p-SnS/n-Si HETEROJUNCTION

PREPARED BY CLOSE SPACED SUBLIMATION METHOD



โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์

ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2557

การศึกษาสมบัติรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ p-SnS/n-Si ที่เตรียมโดย  
วิธีการระเหิดสารเคมีในระยะประชิด

CHARACTERIZATION OF p-SnS/n-Si HETEROJUNCTION  
PREPARED BY CLOSE SPACED SUBLIMATION METHOD



โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต  
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับภายในของมหาวิทยาลัยราชภัฏบรือรัมย์ ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ฯ ของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ปีการศึกษา 2557

CHARACTERIZATION OF p-SnS/n-Si HETEROJUNCTION  
PREPARED BY CLOSE SPACED SUBLIMATION METHOD



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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับ DEPARTMENT OF PHYSICS ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัด FACULTY OF SCIENCE ถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้  
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG  
ACADEMIC YEAR 2014

หัวข้อโครงการพิเศษ การศึกษาสมบัติรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ p-SnS/n-Si ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีในระยะประชิด  
CHARACTERIZATION OF p-SnS/n-Si HETEROJUNCTION PREPARED BY CLOSE SPACED SUBLIMATION METHOD

ชื่อนักศึกษา นางสาวจิรภัฏ ตัวงสะดี รหัสนักศึกษา 54050496  
นางสาววรารัตน์ สวัสดิ์ รหัสนักศึกษา 54050589

ปริญญา วิทยาศาสตรบัณฑิต ฟิสิกส์ประยุกต์  
ภาควิชา ฟิสิกส์  
ปีการศึกษา 2557  
อาจารย์ที่ปรึกษา รศ.งามนิตย์ วงษ์เจริญ

คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง อนุมัติให้โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต ฟิสิกส์ประยุกต์ ประจำปีการศึกษา 2557

| คณะกรรมการสอบ                    | ลายมือชื่อ |
|----------------------------------|------------|
| รศ.ดร.ฐิตินัย แก้วแดง            |            |
| ผศ.ดร.ชัยสิทธิ์ ภูริรักษ์เกียรติ |            |
| อ.ภารุจ บัณฑิตธาตวิทย์           |            |
| รศ.งามนิตย์ วงษ์เจริญ            |            |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้  
ลิขสิทธิ์ของคณะวิทยาศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

|                    |   |
|--------------------|---|
| หัวข้อโครงการพิเศษ | การศึกษาสมบัติรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ p-SnS/n-Si ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีในระยยะประชิด |
| ชื่อนักศึกษา       | นางสาว จีร์ปภัส ด้วงสะดี รหัสนักศึกษา 54050496<br>นางสาว วรารัตน์ สวัสดิ์ รหัสนักศึกษา 54050589         |
| ปริญญา             | วิทยาศาสตร์บัณฑิต ฟิสิกส์ประยุกต์   |
| ภาควิชา            | ฟิสิกส์   |
| ปีการศึกษา         | 2557  |
| อาจารย์ที่ปรึกษา   | รศ. งามนิตย์ วงษ์เจริญ  |

### บทคัดย่อ

โครงการพิเศษนี้ได้ทำการเตรียมฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำทินซิลไฟด์ ด้วยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยยะประชิด ภายในระบบสุญญากาศที่ความดันต่ำกว่า  $2 \times 10^{-3}$  มิลลิบาร์ ซึ่งได้รับความร้อนจากหลอดไฟฮาโลเจนกำลังไฟฟ้า 1500 วัตต์ ทำการเคลือบฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ SnS ลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกใสโดยให้อุณหภูมิของสารตั้งต้นเท่ากับ 550, 560 และ 588 องศาเซลเซียส ตรวจสอบโครงสร้างผลึกด้วย XRD, SEM และ EDS ซึ่งพบว่าฟิล์มบางที่เตรียมได้คือผลึกของพหุพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ SnS ที่มีพีคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของระนาบ (400)โดดเด่นที่สุด ทำการศึกษาสมบัติทางแสงโดยการวัดสเปกตรัมของค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง ฟูเรียร์แทรนสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรมิเตอร์ และรามานสเปกโทรสโกปี ทำการวัดสภาพต้านทานไฟฟ้า และปรากฏการณ์ฮอลล์โดยวิธีแวนเดอร์เพาว์ จากนั้นจึงทำการประดิษฐ์ไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-SnS/n-Si (100) โดยการเตรียมฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ SnS โดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยยะประชิด เคลือบลงแผ่นผลึกเดี่ยวของสารกึ่งตัวนำ n-Si(100) พบว่าสิ่งประดิษฐ์นี้มีสมบัติเรียงกระแสที่ดี จากการวัดความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสไฟฟ้า และ ค่าแรงดันไฟฟ้า ที่อุณหภูมิต่ำในช่วง 100-300 เคลวิน สามารถคำนวณหาค่าความสูงของกำแพงศักย์ ค่าแฟกเตอร์อุดมคติ และค่าความต้านทานไฟฟ้าอนุกรม โดยอาศัยทฤษฎีเทอร์มิออนิกอิมิสชันและวิธีของชวง ส่วนค่าความหนาแน่นของพาหะอิสระ ในฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ SnS สามารถคำนวณได้จากการวัดความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความจุไฟฟ้า กับ ค่าแรงดันไฟฟ้า ที่อุณหภูมิห้องโดยมีค่าประมาณ  $6.72 \times 10^{13}$  ต่อลูกบาศก์เซนติเมตร

คำสำคัญ : ฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ SnS, วิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยยะประชิด, สมบัติทางแสง, สมบัติทางไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

|               |   |
|---------------|---|
| Title         | CHARACTERIZATION OF p-SnS/n-Si HETEROJUNCTION PREPARED BY CLOSE SPACED SUBLIMATION        |
| Students      | Miss Jeepapat Doungsadee Student ID 54050496<br>Miss Vararat Sawasdee Student ID 54050589 |
| Degree        | Bachelor of Science in Applied Physics  |
| Department    | Physics   |
| Academic Year | 2014  |
| Advisor       | Assoc. Prof. Ngamnit Wongcharoen  |

### ABSTRACT

In this special project, SnS thin films have been prepared by close spaced sublimation method, under vacuum at pressure less than  $2 \times 10^{-2}$  mbar, using a halogen lamp 1500 W. A slide glass was used as a substrate in order to characterize the as-deposited films from different source temperatures equal to 550, 560 and 580 °C. The structural investigations performed by means of XRD, SEM and EDS showed that the obtained films exhibit a polycrystalline SnS phase with (400) plane as preferential orientation. Optical properties were examined by optical absorption, FTIR and Raman spectroscopy measurements. Electrical resistivity and Hall effect were performed in van der Pauw configuration. The prototype of p-SnS/n-Si heterojunction was successfully prepared by close spaced sublimation of p-SnS films on n-Si (100) substrate. The obtained device exhibits a rectifying behavior of the diode from the I-V characteristic. From the data of I-V measurements at low temperature range of 100-300 K, the junction barrier height, ideality factor and series resistance values can be evaluated by using thermionic emission theory and Cheung's method. The carrier concentration of SnS thin films about  $6.72 \times 10^{13} \text{ cm}^{-3}$  was determined from the C-V measurement at room temperature.

**Keywords :** SnS thin films, close spaced sublimation method, Optical properties, Electrical properties

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## กิตติกรรมประกาศ

โครงการพิเศษเล่มนี้สามารถสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยความกรุณาของ รองศาสตราจารย์ งามนิทย์ วงษ์เจริญ รองศาสตราจารย์ ดร. ฐิตินัย แก้วแดง ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ชัยสิงห์ ภูริรักษ์เกียรติ และ รองศาสตราจารย์ ดร. ทิพรรัตน์ วงษ์เจริญ ที่อำนวยความสะดวกในการใช้เครื่องมืออุปกรณ์ในการทดลอง และให้ความรู้ ให้คำปรึกษา ทางด้านวิชาการตลอดจนปลูกฝังคุณธรรม จริยธรรม ความดีให้กับลูกศิษย์ทุกคน และคอยช่วยเหลือในทุกๆ ด้าน ตลอดมา จนเสร็จสมบูรณ์

ขอขอบคุณ ศูนย์บริการเครื่องมือวิทยาศาสตร์ และเจ้าหน้าที่ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่กรุณาให้ความอนุเคราะห์และแนะนำการใช้เครื่องมือ ทางวิทยาศาสตร์ (เครื่องยิวี-วิสลิเบล สเปกโทรโฟโตมิเตอร์ แบบดับเบิลบีม เพื่อใช้ในการวัดสมบัติของแสง เครื่องเอกซเรย์ดีฟแฟรคโตมิเตอร์ เพื่อใช้ในการศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงจุดภาค เครื่องเทอร์โมกราฟิมetri ก อะนาไลเซอร์ เพื่อใช้วิเคราะห์สมบัติทางความร้อนของผงทินซัลไฟด์ กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด เพื่อศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงมหภาค และเครื่องฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ เพื่อวิเคราะห์หา ชนิดและปริมาณสาร โดยการวัดการดูดกลืนแสงในช่วงอินฟราเรด) วิทยาลัยนวัตกรรมการจัดการข้อมูล สถาบัน เทคโนโลยี พระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการใช้เครื่องมือ เพื่อวิเคราะห์ธาตุเชิง ปริมาณ และเชิงคุณภาพด้วยเครื่องวิเคราะห์เอ็นเนอร์จิสเปกโทรสโกปีเอ็กซ์เรย์ สเปกโทมิเตอร์ และสถาบันวิจัยและ พัฒนาอัญมณี และเครื่องประดับแห่งชาติ (องค์การมหาชน) ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการใช้เครื่องรามานสเปก โทโรสโกปี เพื่อตรวจสอบประเภทของสารด้วยเทคนิครามานในช่วงความยาวคลื่น 100-400 ต่อเซนติเมตร

ขอขอบคุณ คุณจักรพงษ์ สวัสดิวงศ์ คุณณพนธ์ เตชะคำภู และ คุณชนิภรณ์ จุไรสง นักศึกษาปริญญาโท และเพื่อนๆ นักศึกษาในห้องปฏิบัติการวิจัยวัสดุโฟโตนิกส์ สาขาวิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยี พระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่คอยให้คำแนะนำและให้ความช่วยเหลือในการทำงานเสมอ

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณ อาจารย์ทุกท่าน ที่เมตตาประสิทธิ์ประสาทวิชาตั้งแต่การศึกษาระดับมัธยมศึกษา จนถึงปัจจุบัน ตลอดมาขอกราบขอบพระคุณ คุณพ่อ คุณแม่ และผู้มีพระคุณทุกท่าน ที่ให้ความอุปการะทุนในการศึกษาเล่าเรียน และเป็นกำลังใจที่ดีตลอดมา

นางสาว จีร์ปภัส ด้วงสะดี

นางสาว วรารัตน์ สวัสดิ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญ

|  | หน้า |
|--|------|
| บทคัดย่อภาษาไทย  | ก    |
| บทคัดย่อภาษาอังกฤษ   | ข    |
| กิตติกรรมประกาศ  | ค    |
| สารบัญ   | ง    |
| สารบัญตาราง  | ฉ    |
| สารบัญรูป  | ฎ    |
| บทที่ 1 บทนำ   | 1    |
| 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ   | 1    |
| 1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย  | 2    |
| 1.3 ขอบเขตการวิจัย   | 3    |
| 1.4 ขั้นตอนวิจัยและการดำเนินงาน  | 4    |
| 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ  | 5    |
| บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง                                      | 6    |
| 2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับเรื่องของลักษณะของโครงสร้างผลึก                   | 6    |
| 2.1.1 โครงสร้างผลึกในอุดมคติ   | 6    |
| 2.1.1.1 การระบุตำแหน่งทิศทางและระนาบของโครงผลึก                            | 9    |
| 2.1.2 โครงสร้างผลึกของสารประกอบทึนซัลไฟด์                                  | 11   |
| 2.2 การศึกษาโครงสร้างผลึกโดยการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์                         | 14   |
| 2.3 การศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงมหภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด  | 15   |
| 2.4 การตรวจสอบสมบัติเชิงความร้อนด้วยเครื่องเทอร์โมกราฟิมेटริก อะแนไลเซอร์  | 16   |
| 2.5 พูรีयरแทรนפורมอินฟราเรดสเปกโทรโฟโตมิเตอร์                              | 17   |
| 2.6 การวิเคราะห์รามานสเปกโทรสโกปี  | 18   |
| 2.7 สมบัติทางแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ                                 | 19   |
| 2.7.1 ลักษณะโครงสร้างแถบพลังงาน  | 19   |
| 2.7.2 สัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสง  | 22   |
| 2.7.3 สัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงของสารกึ่งตัวนำ                             | 23   |
| 2.7.4 การหาค่าช่องว่างแถบพลังงานจากสเปกตรัมของค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสง | 24   |
| 2.8 สมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์มบาง  | 26   |
| 2.9 สภาพนำไฟฟ้า  | 26   |
| 2.9.1 สภาพนำไฟฟ้าเชิงแสง   | 27   |
| 2.9.2 วิธีการหาค่าความหนาแน่นของกักพาหะในช่วงกระแสโฟโตชาลจ                 | 35   |
| 2.9.3 วิธีการหาค่าความหนาแน่นของกักพาหะในช่วงกระแสโฟโตชาลจ                 | 36   |

# สารบัญ (ต่อ)

หน้า

|          |  |    |
|----------|--|----|
| 2.10     | กลไกการนำไฟฟ้ากระแสตรงในฟิล์มบางที่อุณหภูมิต่างๆ   | 37 |
| 2.10.1   | กลไกการนำไฟฟ้ากระแสตรงในฟิล์มบางในช่วงอุณหภูมิสูง  | 39 |
| 2.10.2   | กลไกการนำไฟฟ้ากระแสตรงในฟิล์มบางในช่วงอุณหภูมิต่ำปานกลาง   | 40 |
| 2.10.3   | การนำไฟฟ้าของพาหะแบบกระโดดในระยยะไม่คงที่  | 43 |
| 2.11     | สมบัติทางไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำ  | 45 |
| 2.11.1   | สมบัติการนำไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำ  | 45 |
| 2.11.1.1 | สารกึ่งตัวนำชนิดอินทรีนสิก   | 46 |
| 2.11.1.2 | สารกึ่งตัวนำชนิดเอกซ์ทรีนสิก   | 48 |
| 2.11.2   | การวัดความต้านทานแผ่นและสภาพต้านทานไฟฟ้าด้วยเทคนิคแวนเดอร์เพาว์  | 51 |
| 2.11.3   | การวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าโดยวิธีวัดโดยตรง   | 53 |
| 2.11.4   | การวัดค่าความต้านทานไฟฟ้าโดยวิธีสองขั้ว  | 54 |
| 2.11.5   | ปรากฏการณ์ฮอลล์  | 55 |
| 2.11.6   | การศึกษาปรากฏการณ์ฮอลล์ด้วยเทคนิคแวนเดอร์เพาว์   | 59 |
| 2.12     | พาหะข้างมากและพาหะข้างน้อย   | 61 |
| 2.13     | ไดโอดของสารกึ่งตัวนำที่มีรอยต่อแบบพี-เอ็น  | 63 |
| 2.14     | อิมพีแดนซ์ของวงจร RC ต่อแบบอนุกรมและต่อแบบขนาน   | 67 |
| 2.14.1   | วงจร RC ต่อแบบอนุกรม   | 67 |
| 2.14.2   | วงจร RC ต่อแบบขนาน   | 68 |
| 2.14.3   | กราฟของโบด (Bode plot)   | 73 |
| 2.15     | การระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ   | 76 |
| 2.16     | งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง  | 78 |
| บทที่ 3  | การดำเนินงานวิจัย  | 83 |
| 3.1      | เครื่องมือและอุปกรณ์การวิจัย   | 83 |
| 3.2      | ขั้นตอนการเตรียมฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ SnS โดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ  | 85 |
| 3.3      | การศึกษาสมบัติฟิสิกส์พื้นฐานของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ SnS ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับทั้งที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์และเป็นแผ่นผลึกเดี่ยวของสารกึ่งตัวนำ n-Si (100) โดยวิธีระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ | 90 |
| 3.4      | ศึกษาสมบัติพื้นฐานของไดโอดที่มีรอยต่อแบบพี-เอ็นของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-SnS/n-Si (100) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ  | 91 |

## สารบัญ (ต่อ)

|  | หน้า |
|--|------|
| บทที่ 4 ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง   | 92   |
| 4.1 การวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของสารโดยอาศัยคุณสมบัติทางความร้อนของผลึกของสารกึ่งตัวนำ SnS ที่ได้มาจากการเคลือบฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ SnS ลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ  | 92   |
| 4.2 ลักษณะของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ SnS ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับทั้งที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ และแผ่นผลึกเดี่ยวของสารกึ่งตัวนำ n-Si (100) โดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ  | 93   |
| 4.3 การศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคด้วยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ ของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำ SnS ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับทั้งที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ และแผ่นผลึกเดี่ยวของสารกึ่งตัวนำ n-Si (100) โดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ  | 94   |
| 4.4 การศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงมหภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ SnS ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับทั้งที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ และแผ่นผลึกเดี่ยวของสารกึ่งตัวนำ n-Si (100) โดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ                              | 96   |
| 4.5 การศึกษาการวิเคราะห์ธาตุเชิงปริมาณ และเชิงคุณภาพด้วยเทคนิคเอ็นเนอร์ยีดีสเพอร์ซีฟ สเปกโทรสโกปี (EDS) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ SnS ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ  | 104  |
| 4.6 การศึกษาสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ SnS ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ   | 105  |
| 4.7 การวิเคราะห์เพื่อหาชนิดและโมเลกุลของสารประกอบที่อยู่ในฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ SnS ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ โดยการวัดการดูดกลืนแสงในช่วงอินฟราเรดด้วยเครื่องฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรด สเปกโทรโฟโตมิเตอร์ (FTIR) | 107  |
| 4.8 การศึกษาชนิดการสั่นของโครงผลึกด้วยเทคนิครามานสเปกโทรสโกปี ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ SnS ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ และของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-SnS/n-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ      | 108  |

## สารบัญ (ต่อ)

|   | หน้า |
|---|------|
| 4.9 การศึกษาสภาพนำไฟฟ้าเชิงแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ SnS ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ และของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-SnS/n-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ                 | 109  |
| 4.10 ผลการศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ SnS ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ  | 118  |
| 4.10.1 การศึกษาค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ SnS ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ เมื่อให้อุณหภูมิแก่สารตั้งต้นเท่ากับ 565 องศาเซลเซียส   | 118  |
| 4.10.2 ผลการศึกษาสภาพนำไฟฟ้าที่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิห้อง ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ SnS ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ เมื่อให้อุณหภูมิแก่สารตั้งต้นเท่ากับ 565 องศาเซลเซียส                        | 120  |
| 4.10.3 ผลการศึกษาค่าความต้านทานไฟฟ้าที่อุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิห้อง ในช่วงอุณหภูมิ 20 - 200 องศาเซลเซียส ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ SnS ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด ภายในระบบสุญญากาศ                                | 127  |
| 4.11 ผลการศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-SnS/n-Si (100) ที่เตรียมด้วยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ  | 128  |
| 4.11.1 ผลการศึกษาค่าความสัมพันธ์ระหว่าง ค่ากระแสไฟฟ้า กับ ค่าแรงดันไฟฟ้า เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้อง ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-SnS/n-Si (100) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ                            | 128  |
| 4.11.2 ผลการศึกษาค่าความสัมพันธ์ระหว่าง ค่ากระแสไฟฟ้า กับ ค่าแรงดันไฟฟ้า เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่ำในช่วงอุณหภูมิ 20-300 เคลวิน ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-SnS/n-Si (100) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ | 134  |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับครูใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้า ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

หน้า

|                 |  |     |
|-----------------|--|-----|
| 4.11.3          | ผลการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความจุไฟฟ้า กับ ค่าแรงดันไฟฟ้า ที่ความถี่เท่ากับ 1 เมกะเฮิร์ตซ์ เมื่อทำการวัดที่ อุณหภูมิห้อง ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของ สารกึ่งตัวนำ p-SnS/n-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมี ด้วยความร้อนในระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ เมื่อให้อุณหภูมิแก๊สสารตั้งต้นเท่ากับ 565 องศาเซลเซียส                                | 143 |
| 4.11.4          | ผลการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความจุไฟฟ้า และ ค่าความนำไฟฟ้า กับค่าความถี่ในช่วง 1 กิโลเฮิร์ตซ์ถึง 2 เมกะเฮิร์ตซ์ โดยใช้แรงดันไฟฟ้าในช่วง -0.3 ถึง 0.5 โวลต์ ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-SnS/n-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ เมื่อให้อุณหภูมิแก๊สสารตั้งต้นเท่ากับ 565 องศาเซลเซียส | 145 |
| 4.11.5          | ผลการศึกษาค่าอิมพีแดนซ์สเปกโทรสโกปีเมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้อง ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-SnS/n-Si (100) ที่เตรียมโดย วิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด ภายในระบบสุญญากาศ เมื่อให้อุณหภูมิแก๊สสารตั้งต้นเท่ากับ 565 องศาเซลเซียส  | 148 |
| บทที่ 5         | สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ  | 153 |
| เอกสารอ้างอิง   |  | 156 |
| ภาคผนวก         |  | 159 |
| ประวัติผู้เขียน |  | 162 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญตาราง

| ตารางที่ | หน้า   |     |
|----------|--|-----|
| 2.1      | แสดงพารามิเตอร์ของหน่วยเซลล์ในระบบสองมิติ  | 7   |
| 2.2      | แสดงระบบผลึกทั้งเจ็ดแบบในระบบสามมิติ   | 8   |
| 2.3      | แสดงความสัมพันธ์ของดัชนีมิลเลอร์ (hkl) และจุดตัดแกนผลึก (x,y,z)  | 10  |
| 2.4      | แสดงค่าคงที่โครงสร้างผลึกของสารประกอบ SnS, SnS <sub>2</sub> และ Sn <sub>2</sub> S <sub>3</sub> ที่อุณหภูมิห้อง   | 14  |
| 2.5      | แสดงชนิดของพาหะในสารกึ่งตัวนำทั้งชนิดพีและชนิดเอ็น   | 62  |
| 3.1      | แสดงเงื่อนไขที่ใช้ในการเตรียมฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ SnS ลงบนแผ่นฐานรองรับทั้งที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์และแผ่นผลึกเดี่ยวของสารกึ่งตัวนำ n-Si (100) โดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ  | 89  |
| 4.1      | แสดงค่าคงที่โครงสร้างผลึกของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ SnS ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ   | 96  |
| 4.2      | แสดงค่าช่องว่างแถบพลังงาน ( $E_g$ ) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ SnS ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ เมื่อให้อุณหภูมิแก่สารตั้งต้นที่ต่างกัน  | 106 |
| 4.3      | แสดงค่าพารามิเตอร์ต่างๆของค่าสภาพนำไฟฟ้าเชิงแสงที่ได้จากการปรับผลการทดลองที่อุณหภูมิห้องให้เข้ากับฟังก์ชันมัลติเพิลเอ็กซ์โพเนนเชียล ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ SnS ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ และของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-SnS/n-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ  | 116 |
| 4.4      | แสดงความหนาแน่นของกำบังตกพาหะ ที่ได้จากการวัดค่าสภาพนำไฟฟ้าเชิงแสงในช่วงกระแสโฟโตฮาลของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ SnS ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ เมื่อให้อุณหภูมิแก่สารตั้งต้นเท่ากับ 560 องศาเซลเซียส  | 117 |
| 4.5      | แสดงค่ากระแสไฟฟ้าอิมิต์ยอนกลับ ( $I_S$ ) ค่าแฟกเตอร์อุดมคติ ( $n$ ) ค่าความสูงของกำแพงศักย์ในขณะที่ค่าแรงดันไบแอสเป็นศูนย์ ( $\phi_{BO}$ ) และค่าความต้านทานอนุกรม ( $R_S$ ) ที่ได้จากการคำนวณโดยใช้กลไกเทอร์มิออนิกอิมิตชัน และวิธีของชวง เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้องของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-SnS/n-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ | 134 |
| 4.6      | แสดงค่ากระแสไฟฟ้าอิมิต์ยอนกลับ ค่าแฟกเตอร์อุดมคติ ค่าความสูงของกำแพงศักย์ และค่าความต้านทานไฟฟ้าอนุกรม ที่ได้จากการคำนวณโดยใช้กลไกเทอร์มิออนิกอิมิตชัน และวิธีของชวง เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่ำในช่วงอุณหภูมิ 20 - 300 เคลวิน ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-SnS/n-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ   | 138 |

## สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่

หน้า

- 4.7 แสดงค่าพารามิเตอร์สำคัญต่างๆ ที่ได้จากการศึกษาการจำลองแบบหาค่าอิมพีแดนซ์สเปกโทรสโกปี เมื่อใช้ความถี่ในช่วง 1 กิโลเฮิร์ตซ์ ถึง 2 เมกะเฮิร์ตซ์ โดยใช้แรงดันไฟฟ้าเท่ากับ -0.3 ถึง 0.5 โวลต์ และทำการวัดที่อุณหภูมิห้อง ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-SnS/n-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ เมื่อให้อุณหภูมิแก่สารตั้งต้นเท่ากับ 565 องศาเซลเซียส

152



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



## สารบัญญรูป (ต่อ)

| รูปที่ |   | หน้า |
|--------|---|------|
| 2.18   | แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า $\ln I_p$ กับ $t$ ของสภาพนำไฟฟ้าเชิงแสงทั้งช่วงกระแสโฟโตชาขึ้นและช่วงกระแสโฟโตชาลง  | 32   |
| 2.19   | แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า $\ln I_p$ กับ $t$ เพื่อใช้คำนวณหาความหนาแน่นของกักพาหะในช่วงกระแสโฟโตชาลง   | 34   |
| 2.20   | แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า $\ln I_p$ กับ $t$ เพื่อใช้คำนวณหาความหนาแน่นของกักพาหะในช่วงกระแสโฟโตชาขึ้น   | 36   |
| 2.21   | แสดงแบบจำลองต่างๆ ของฟิล์มบางตรงบริเวณรอยต่อขอบของเกรนดังนี้ คือ<br>ก. ลักษณะของเกรนในผลึกพหุพันธ์<br>ข. การกระจายของประจุในเนื้อเกรนและที่ขอบของเกรน<br>ค. โครงสร้างแถบพลังงานของผลึกพหุพันธ์ในเนื้อเกรนและที่ขอบของเกรน | 38   |
| 2.22   | แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $\ln \sigma T^{\frac{1}{2}}$ กับ $\frac{1000}{T}$ ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ SnS   | 42   |
| 2.23   | แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $\ln \sigma T^{\frac{1}{2}}$ กับ $T^{-\frac{1}{4}}$ ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ SnS   | 42   |
| 2.24   | แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความหนาแน่นของอิเล็กตรอนในสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นกับส่วนกลับของอุณหภูมิ   | 49   |
| 2.25   | แสดงตำแหน่งของจุดสัมผัสบนชิ้นสารตัวอย่างเพื่อวัดความต้านทานแผ่นและสภาพต้านทานไฟฟ้าด้วยเทคนิคแวนเดอร์เพาว์   | 51   |
| 2.26   | แสดงการต่อขั้วเพื่อวัดความต้านทานและวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าด้วยเทคนิคแวนเดอร์เพาว์  | 52   |
| 2.27   | แสดงการวัดค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าโดยวิธีวัดโดยตรง   | 53   |
| 2.28   | แสดงการวัดค่าความต้านทานไฟฟ้าโดยวิธีสองขั้ว   | 54   |
| 2.29   | แสดงการวัดค่าความต้านทานแผ่นโดยวิธีสองขั้วเชิงเส้น<br>ก. การวัดแบบสองขั้วโดยมีการเลื่อนระยะที่ขั้วหนึ่ง<br>ข. กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า กับ ระยะทางที่ได้จากชนิดเลื่อนขั้วไฟฟ้า                        | 55   |
| 2.30   | แสดงแผนภาพแสดงปรากฏการณ์ฮอลล์บนแผ่นสารกึ่งตัวนำชนิดพี   | 56   |
| 2.31   | แสดงการวัดปรากฏการณ์ฮอลล์ด้วยเทคนิคแวนเดอร์เพาว์บนสารตัวอย่างที่เป็นแผ่นบางที่มีรูปทรงใดๆ   | 60   |
| 2.32   | แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าฮอลล์ ( $V_H$ ) กับค่ากระแสไฟฟ้า ( $I$ )  | 61   |
| 2.33   | แสดงการสร้างพันธะเคมีระหว่างอะตอมในสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นและชนิดพีของธาตุ Si  | 62   |
| 2.34   | แสดงไดโอดของสารกึ่งตัวนำที่มีรอยต่อแบบพี-เอ็น   | 63   |
| 2.35   | แสดงการเกิดบริเวณปลอดพาหะที่บริเวณรอยต่อของสารกึ่งตัวนำที่มีรอยต่อแบบพี-เอ็น  | 64   |
| 2.36   | แสดงลักษณะของโครงสร้างอย่างง่ายและสัญลักษณ์ของไดโอดของสารกึ่งตัวนำที่มีรอยต่อแบบพี-เอ็น   | 65   |

แม้ว่ากรณีในรูปที่ 2.36 นี้จะกำหนดให้ค่า  $V_H$  เป็นลบ แต่การวัดค่า  $V_H$  นี้จะต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีโอกาสไปใช้

## สารบัญรูป (ต่อ)

| รูปที่ |  | หน้า |
|--------|--|------|
| 2.37   | แสดงการจ่ายแรงดันไฟฟ้าแก่ไดโอดของสารกึ่งตัวนำที่มีรอยต่อแบบพี-เอ็น<br>ก. วงจรไดโอดแบบไบแอสตรง<br>ข. วงจรไบแอสแบบย้อนกลับ   | 65   |
| 2.38   | แสดงการเปิดปิดสวิตช์ของวงจรไดโอดของสารกึ่งตัวนำที่มีรอยต่อแบบพี-เอ็น<br>ก. สภาวะนำกระแส<br>ข. สภาวะไม่นำกระแส  | 66   |
| 2.39   | แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่ากระแสไฟฟ้า ( $I$ ) กับ แรงดันไฟฟ้า ( $V$ ) ที่แสดงสมบัติเฉพาะทางไฟฟ้าของไดโอดของสารกึ่งตัวนำที่มีรอยต่อแบบพี-เอ็นในอุดมคติ  | 66   |
| 2.40   | แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่ากระแสไฟฟ้า ( $I$ ) กับ แรงดันไฟฟ้า ( $V$ ) ที่แสดงสมบัติเฉพาะทางไฟฟ้าของไดโอดของสารกึ่งตัวนำที่มีรอยต่อพี-เอ็น  | 67   |
| 2.41   | แสดงกราฟของโนควิสต์ที่ระบุถึงค่าอิมพีแดนซ์ของวงจร RC ต่ออนุกรมอย่างง่าย  | 68   |
| 2.42   | แสดงวงจร RC ต่อแบบขนานอย่างง่าย  | 69   |
| 2.43   | แสดงกราฟของโนควิสต์ของวงจร RC ต่อแบบขนานอย่างง่ายที่จุดสูงสุดของรูปครึ่งวงกลมเกิดขึ้นเมื่อ $\omega = \frac{1}{RC}$   | 70   |
| 2.44   | แสดงวงจร RC ต่อแบบขนานอย่างง่าย (ก,ง) กราฟของอิมพีแดนซ์สเปกโทรสโกปี (ข,จ) และกราฟของแอดมิตแตนซ์สเปกโทรสโกปี (ค,ฉ)  | 71   |
| 2.45   | แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าอิมพีแดนซ์ของโคออร์ดิเนตตั้งฉาก กับ โคออร์ดิเนตเชิงขั้วมุมเฟสระหว่างทิศทางของ $Z'$ และ $Z''$ จะขึ้นกับค่าความถี่ที่ใช้วัดในกรณีที่เป็นตัวเก็บประจุสมบูรณ์แบบ (pure capacitor) มุมเฟส $\phi = -90$ องศา และมุมเฟสของตัวต้านทานจะมีค่าเป็นศูนย์                         | 74   |
| 2.46   | แสดงกราฟโบดที่เป็นกรณี ความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าอิมพีแดนซ์ ( $Z$ ) และมุมเฟส<br>ก. แสดงกราฟโนควิสต์และกราฟของโบด<br>ข. แสดงกราฟของอิมพีแดนซ์ของวงจรที่มีตัวเก็บประจุของบริเวณโพลาริเซชันที่อยู่ชิดกับขั้วอิเล็กโทรด  | 75   |
| 2.47   | แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสไฟฟ้า กับ แรงดันไฟฟ้าของไดโอดที่มี รอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-Sn/p-Si<br>ก. กรณีแผ่นผลึกเดี่ยวของสารกึ่งตัวนำ p-Si ไม่ได้จุ่มในสารละลาย $(NH_4)_2S_{x=2-6}$<br>ข. กรณีแผ่นผลึกเดี่ยวของสารกึ่งตัวนำ p-Si จุ่มในสารละลาย $(NH_4)_2S_{x=2-6}$ | 78   |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญญรูป (ต่อ)

| รูปที่ |   | หน้า |
|--------|---|------|
| 2.48   | แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสไฟฟ้า กับ แรงดันไฟฟ้าของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-Sn/p-Si ภายใต้การฉายแสงความเข้มแสงเท่ากับ 100 มิลลิวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร<br>ก. กรณีแผ่นผลึกเดี่ยวของสารกึ่งตัวนำ p-Si ไม่ได้จุ่มในสารละลาย $(\text{NH}_4)_2\text{S}_{x=2-6}$<br>ข. กรณีแผ่นผลึกเดี่ยวของสารกึ่งตัวนำ p-Si จุ่มในสารละลาย $(\text{NH}_4)_2\text{S}_{x=2-6}$                                     | 79   |
| 2.49   | แสดงค่าประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-Sn/p-Si (100) ที่ขึ้นกับเวลาของการจุ่มในสารละลาย $(\text{NH}_4)_2\text{S}_{x=2-6}$   | 79   |
| 2.50   | แสดงผลการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคและเชิงมหภาคของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-SnS/SiNWs<br>ก. แสดงภาพถ่าย SEM ของภาคตัดขวางของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-SnS/SiNWs<br>ข. แสดงภาพถ่ายผิวหน้าของแผ่นผลึกเดี่ยวของสารกึ่งตัวนำ p-Si ที่ได้ทำการสร้างเส้นลวดนาโนไว้ที่ผิวหน้า<br>ค. แสดงสเปกตรัมของพีคความเข้มการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-SnS | 80   |
| 2.51   | แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสไฟฟ้า กับ แรงดันไฟฟ้า ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-SnS/ SiNWs<br>ก. ที่ไม่มีชั้นของฟิล์มบางที่เฉื่อยงาน<br>ข. ที่มีชั้นของฟิล์มบางที่เฉื่อยงาน  | 81   |
| 2.52   | แสดงสเปกตรัมการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-SnS เมื่อให้อุณหภูมิแก่สารตั้งต้นเท่ากับ<br>ก. 580 องศาเซลเซียส<br>ข. 650 องศาเซลเซียส   | 82   |
| 2.53   | แสดงภาพถ่ายผิวหน้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ SnS <sub>2</sub> ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ที่เตรียมได้เมื่อให้อุณหภูมิแก่สารตั้งต้นเท่ากับ<br>ก. 580 องศาเซลเซียส<br>ข. 650 องศาเซลเซียส  | 82   |
| 3.1    | แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าอุณหภูมิของสารตั้งต้นและอุณหภูมิของแผ่นฐานรองรับกับ เวลา ที่ใช้ในการเคลือบฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ SnS ลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ และ แผ่นผลึกเดี่ยวของสารกึ่งตัวนำ n-Si (100) โดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ  | 88   |
| 3.2    | แสดงชุดอุปกรณ์ที่ใช้ในการเคลือบฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ SnS ลงบนแผ่นฐานรองรับ ทั้งที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ และ แผ่นผลึกเดี่ยวของสารกึ่งตัวนำ n-Si (100) โดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ  | 89   |

## สารบัญรูป (ต่อ)

| รูปที่ |  | หน้า |
|--------|--|------|
| 4.1    | แสดงน้ำหนักรวมโดยใช้เครื่องเทอร์โมกราวิเมตริก อะนาไลเซอร์ของผงผลึกของสารกึ่งตัวนำ SnS ที่ลดลงตามอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น   | 93   |
| 4.2    | แสดงฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ SnS ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ   | 93   |
| 4.3    | แสดงไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-SnS/n-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ   | 94   |
| 4.4    | แสดงสเปกตรัมของพีคความเข้มการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ SnS ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ   | 95   |
| 4.5    | แสดงสเปกตรัมของพีคความเข้มการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-SnS/n-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ เมื่อให้อุณหภูมิของสารตั้งต้นเท่ากับ 565 องศาเซลเซียส   | 95   |
| 4.6    | แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าคงที่โคจรผลึก กับ ค่าอุณหภูมิของสารตั้งต้น ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ SnS ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ  | 96   |
| 4.7    | แสดงภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) กำลังขยาย 3,000 เท่าที่บริเวณผิวหน้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ SnS ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ<br>ก. เมื่อให้อุณหภูมิแก่สารตั้งต้น 550 องศาเซลเซียส และใช้เวลาในการเคลือบ 5 นาที<br>ข. เมื่อให้อุณหภูมิแก่สารตั้งต้น 565 องศาเซลเซียส และใช้เวลาในการเคลือบ 15 นาที<br>ค. เมื่อให้อุณหภูมิแก่สารตั้งต้น 588 องศาเซลเซียส และใช้เวลาในการเคลือบ 10 นาที | 98   |
| 4.8    | แสดงภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) บริเวณภาคตัดขวางของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ SnS ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ<br>ก. เมื่อให้อุณหภูมิแก่สารตั้งต้น 550 องศาเซลเซียส และใช้เวลาในการเคลือบ 5 นาที<br>ข. เมื่อให้อุณหภูมิแก่สารตั้งต้น 565 องศาเซลเซียส และใช้เวลาในการเคลือบ 15 นาที<br>ค. เมื่อให้อุณหภูมิแก่สารตั้งต้น 588 องศาเซลเซียส และใช้เวลาในการเคลือบ 10 นาที                     | 99   |
| 4.9    | แสดงความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของเกรนที่ได้จากภาพถ่าย SEM กับอุณหภูมิของสารตั้งต้นของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ SnS ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ   | 100  |

## สารบัญรูป (ต่อ)

| รูปที่   | หน้า |
|--|------|
| 4.10   | 101  |
| แสดงภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) กำลังขยาย 3,000 เท่า ที่บริเวณผิวหน้า (บริเวณกลางแผ่นฟิล์ม) ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-SnS/n-Si (100) โดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ เมื่อใช้เวลาในการเคลือบ 15 นาที |      |
| ก. เมื่อให้อุณหภูมิแก่สารตั้งต้น 560 องศาเซลเซียส  |      |
| ข. เมื่อให้อุณหภูมิแก่สารตั้งต้น 573 องศาเซลเซียส  |      |
| ค. เมื่อให้อุณหภูมิแก่สารตั้งต้น 580 องศาเซลเซียส  |      |
| 4.11   | 102  |
| แสดงภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) กำลังขยาย 2,000 เท่า ที่บริเวณผิวหน้าของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-SnS/n-Si (100) โดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ เมื่อใช้เวลาในการเคลือบ 15 นาที                        |      |
| ก. เมื่อให้อุณหภูมิแก่สารตั้งต้น 560 องศาเซลเซียส  |      |
| ข. เมื่อให้อุณหภูมิแก่สารตั้งต้น 560 องศาเซลเซียส  |      |
| ค. เมื่อให้อุณหภูมิแก่สารตั้งต้น 580 องศาเซลเซียส  |      |
| 4.12   | 103  |
| แสดงภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) กำลังขยาย 3,000 เท่า ที่บริเวณภาคตัดขวางของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-SnS/n-Si (100) โดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ เมื่อใช้เวลาในการเคลือบ 15 นาที                     |      |
| ก. เมื่อให้อุณหภูมิแก่สารตั้งต้น 560 องศาเซลเซียส  |      |
| ข. เมื่อให้อุณหภูมิแก่สารตั้งต้น 573 องศาเซลเซียส  |      |
| ค. เมื่อให้อุณหภูมิแก่สารตั้งต้น 580 องศาเซลเซียส  |      |
| 4.13   | 104  |
| แสดงสเปกตรัม EDS ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ SnS ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ   |      |
| 4.14   | 105  |
| แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง กับ ค่าความยาวคลื่นแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ SnS ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ เมื่อให้อุณหภูมิแก่สารตั้งต้นที่ต่างกัน                             |      |
| 4.15   | 106  |
| แสดงกราฟการหาค่าช่องว่างแถบพลังงานของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ SnS ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ เมื่อให้อุณหภูมิแก่สารตั้งต้นที่ต่างกัน  |      |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป (ต่อ)

| รูปที่ |  | หน้า |
|--------|--|------|
| 4.16   | แสดงสเปกตรัม FTIR ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ SnS ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ เมื่อให้อุณหภูมิแก่แผ่นฐานรองรับและสารตั้งต้นที่ต่างกัน ซึ่งรูปซ้ายมือแสดงสเปกตรัมของค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสง (Transmittance) ส่วนรูปขวามือแสดงสเปกตรัมของค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนแสง (Reflectance)  | 107  |
| 4.17   | แสดงสเปกตรัมรามานสเปกโทรสโกปีของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ SnS ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ เมื่อให้อุณหภูมิแก่สารตั้งต้นต่างกัน  | 108  |
| 4.18   | แสดงสเปกตรัมรามานของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-SnS/n-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ เมื่อให้อุณหภูมิแก่สารตั้งต้นเท่ากับ 573 องศาเซลเซียส   | 109  |
| 4.19   | แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า $I_p$ กับ เวลา ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ SnS ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ เมื่อให้อุณหภูมิแก่สารตั้งต้นต่างกัน<br>ก. เมื่อให้อุณหภูมิแก่สารตั้งต้น 550 องศาเซลเซียส<br>ข. เมื่อให้อุณหภูมิแก่สารตั้งต้น 560 องศาเซลเซียส<br>ค. เมื่อให้อุณหภูมิแก่สารตั้งต้น 588 องศาเซลเซียส               | 110  |
| 4.20   | แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า $\ln I_p$ กับ เวลา ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ SnS ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ เมื่อให้อุณหภูมิแก่สารตั้งต้นต่างกัน<br>ก. เมื่อให้อุณหภูมิแก่สารตั้งต้น 550 องศาเซลเซียส<br>ข. เมื่อให้อุณหภูมิแก่สารตั้งต้น 560 องศาเซลเซียส<br>ค. เมื่อให้อุณหภูมิแก่สารตั้งต้น 588 องศาเซลเซียส | 111  |
| 4.21   | แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่ากระแสออร์มัลไลซ์ กับ เวลา ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ SnS ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ<br>ก. กรณีค่ากระแสโฟโตขาขึ้น<br>ข. กรณีค่ากระแสโฟโตขาลง   | 112  |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป (ต่อ)

| รูปที่ |  | หน้า |
|--------|--|------|
| 4.22   | แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า $I_p$ กับ เวลา ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-SnS/n-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ เมื่อให้อุณหภูมิแก๊สสารตั้งต้นต่างกัน<br>ก. เมื่อให้อุณหภูมิแก๊สสารตั้งต้น 565 องศาเซลเซียส<br>ข. เมื่อให้อุณหภูมิแก๊สสารตั้งต้น 573 องศาเซลเซียส<br>ค. เมื่อให้อุณหภูมิแก๊สสารตั้งต้น 580 องศาเซลเซียส     | 113  |
| 4.23   | แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า $\ln I_p$ กับ เวลา ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-SnS/n-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ เมื่อให้อุณหภูมิแก๊สสารตั้งต้นต่างกัน<br>ก. เมื่อให้อุณหภูมิแก๊สสารตั้งต้น 565 องศาเซลเซียส<br>ข. เมื่อให้อุณหภูมิแก๊สสารตั้งต้น 573 องศาเซลเซียส<br>ค. เมื่อให้อุณหภูมิแก๊สสารตั้งต้น 580 องศาเซลเซียส | 114  |
| 4.24   | แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่ากระแสโฟโตอินอร์มัลไลซ์ กับ เวลา ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-SnS/n-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ<br>ก. กรณีค่ากระแสโฟโตขาขึ้น<br>ข. กรณีค่ากระแสโฟโตขาลง   | 115  |
| 4.25   | แสดงการหาค่าความต้านทาน $R_f$ ที่ได้จากการวัดค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าด้วยวิธีแวนเดอร์เพาว์ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้อง ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ SnS ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ   | 118  |
| 4.26   | แสดงการหาค่าความต้านทาน $R_f$ ที่ได้จากการวัดค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าด้วยวิธีแวนเดอร์เพาว์ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้อง ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ SnS ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ   | 118  |
| 4.27   | แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า $V_H$ กับ $I$ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้องของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ SnS ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ  | 119  |
| 4.28   | แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า $\ln \sigma$ กับ $\frac{1000}{T}$ ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ SnS ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ เมื่อให้อุณหภูมิแก๊สสารตั้งต้นเท่ากับ 565 องศาเซลเซียส   | 120  |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น ผู้ที่นำข้อมูลนี้ไปใช้จะต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป (ต่อ)

| รูปที่ |   | หน้า |
|--------|---|------|
| 4.29   | แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า $\ln \sigma T^{\frac{1}{2}}$ กับ $\frac{1000}{T}$ ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ SnS ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ เมื่อให้อุณหภูมิแก่สารตั้งต้นเท่ากับ 565 องศาเซลเซียส   | 121  |
| 4.30   | แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า $\ln \sigma T^{\frac{1}{2}}$ กับ $T^{-\frac{1}{4}}$ ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ SnS ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ เมื่อให้อุณหภูมิแก่สารตั้งต้นเท่ากับ 565 องศาเซลเซียส | 121  |
| 4.31   | แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า $\ln \frac{R_0}{R}$ กับ $\frac{1000}{T}$ ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ SnS ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ  | 127  |
| 4.32   | แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า $I$ กับ $V$ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้อง ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-SnS/n-Si (100) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ   | 129  |
| 4.33   | แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า $\ln I$ กับ $\ln V$ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้อง ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-SnS/n-Si (100) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ   | 129  |
| 4.34   | แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln I$ กับ $V$ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้องของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-SnS/n-Si (100) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ  | 130  |
| 4.35   | แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า $dV/d(\ln I)$ กับ $I$ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้องของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-SnS/n-Si (100) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ  | 133  |
| 4.36   | แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า $H(I)$ กับ $I$ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้องของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-SnS/n-Si (100) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ   | 133  |
| 4.37   | แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า $I$ กับ $V$ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่ำในช่วงอุณหภูมิ 20-300 เคลวิน ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-SnS/n-Si (100) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ                                | 135  |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้า ไม่อนุญาตให้ทำซ้ำโดยไม่ได้รับอนุญาต  
 ไม่ว่าจะพิมพ์ใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป (ต่อ)

| รูปที่ |   | หน้า |
|--------|---|------|
| 4.38   | แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า $\ln I$ กับ $\ln V$ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่ำในช่วงอุณหภูมิ 20-300 เคลวิน ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-SnS/n-Si (100) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ  | 135  |
| 4.39   | แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln I$ กับ $V$ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่ำในช่วงอุณหภูมิ 20-300 เคลวิน ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-SnS/n-Si (100) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ  | 136  |
| 4.40   | แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า $dV/d(\ln I)$ กับ $I$ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่ำในช่วงอุณหภูมิ 20 - 300 เคลวิน ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-SnS/n-Si (100) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ  | 136  |
| 4.41   | แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า $H(I)$ กับ $I$ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่ำในช่วงอุณหภูมิ 20 - 300 เคลวิน ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-SnS/n-Si (100) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ   | 137  |
| 4.42   | แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าแฟกเตอร์อุดมคติ กับ ค่าอุณหภูมิ ที่คำนวณได้จากกลไกเทอร์มิโอนิกอิมิสชันและวิธีของชวง เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่ำในช่วงอุณหภูมิ 20 - 300 เคลวิน ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-SnS/n-Si (100) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ   | 139  |
| 4.43   | แสดงการหาค่า $E_{00}$ โดยการพิศกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าแฟกเตอร์อุดมคติ กับ ค่าอุณหภูมิ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่ำในช่วงอุณหภูมิ 20 - 300 เคลวิน ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-SnS/n-Si (100) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ                            | 139  |
| 4.44   | แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความสูงกำแพงศักย์ กับ ค่าอุณหภูมิ ที่คำนวณได้จากกลไกเทอร์มิโอนิกอิมิสชันและวิธีของชวง เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่ำในช่วงอุณหภูมิ 20 - 300 เคลวิน ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-SnS/n-Si (100) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ | 140  |
| 4.45   | แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความต้านทานไฟฟ้าอนุกรม กับ ค่าอุณหภูมิ ที่ได้จากวิธีของชวงเมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่ำในช่วงอุณหภูมิ 20-300 เคลวิน ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-SnS/n-Si (100) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ                               | 140  |

## สารบัญญรูป (ต่อ)

| รูปที่ |  | หน้า |
|--------|--|------|
| 4.46   | แสดงกราฟอาร์เรเนี่ยสของ $n[\ln J_s]$ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่ำในช่วงอุณหภูมิ 20 - 300 เคลวิน ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-SnS/n-Si (100) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ  | 141  |
| 4.47   | แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า $C$ กับ $V$ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้องโดยใช้ความถี่เท่ากับ 1 เมกะเฮิร์ตซ์ ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-SnS/n-Si (100) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ   | 143  |
| 4.48   | แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า $\frac{1}{C^2}$ กับ $V$ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้อง โดยใช้ความถี่เท่ากับ 1 เมกะเฮิร์ตซ์ ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-SnS/n-Si (100) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ เมื่อให้อุณหภูมิแก๊สสารตั้งต้น 565 องศาเซลเซียส  | 144  |
| 4.49   | แสดงแผนภาพลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ p-SnS/n-Si (100) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ   | 145  |
| 4.50   | แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุไฟฟ้า ( $C$ ) กับ ค่าความถี่ ( $f$ ) เมื่อทำการวัดในช่วงความถี่ 1 กิโลเฮิร์ตซ์ ถึง 2 เมกะเฮิร์ตซ์ โดยใช้แรงดันไฟฟ้าในช่วง - 0.3 ถึง 0.5 โวลต์ และทำการวัดที่อุณหภูมิห้องของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-SnS/n-Si (100) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ     | 146  |
| 4.51   | แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความนำไฟฟ้า ( $G$ ) กับ ค่าความถี่ ( $f$ ) เมื่อทำการวัดในช่วงความถี่ 1 กิโลเฮิร์ตซ์ ถึง 2 เมกะเฮิร์ตซ์ โดยใช้แรงดันไฟฟ้าในช่วง - 0.3 ถึง 0.5 โวลต์ และทำการวัดที่อุณหภูมิห้องของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-SnS/n-Si (100) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ     | 147  |
| 4.52   | แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าจำนวนจริงของอิมพีแดนซ์เชิงซ้อน กับ ค่าความถี่ เมื่อทำการวัดในช่วงความถี่ 1 กิโลเฮิร์ตซ์ ถึง 2 เมกะเฮิร์ตซ์ โดยใช้แรงดันไฟฟ้าในช่วง - 0.3 ถึง 0.5 โวลต์ และทำการวัดที่อุณหภูมิห้องของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-SnS/n-Si (100) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ | 148  |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป (ต่อ)

| รูปที่ |  | หน้า |
|--------|--|------|
| 4.53   | แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของค่าจลนภาพของอิมพีแดนซ์ กับ ค่าความถี่ เมื่อทำการวัดในช่วงความถี่ 1 กิโลเฮิรตซ์ ถึง 2 เมกะเฮิรตซ์ โดยใช้แรงดันไฟฟ้าในช่วง - 0.3 ถึง 0.5 โวลต์ และทำการวัดที่อุณหภูมิห้องของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-SnS/n-Si (100) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ | 149  |
| 4.54   | แสดงกราฟความสัมพันธ์ของ ค่าอิมพีแดนซ์เชิงซ้อน เมื่อทำการวัดในช่วงความถี่ 1 กิโลเฮิรตซ์ ถึง 2 เมกะเฮิรตซ์ โดยใช้แรงดันไฟฟ้าในช่วง - 0.3 ถึง 0.5 โวลต์ และทำการวัดที่อุณหภูมิห้องของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-SnS/n-Si (100) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ                           | 150  |
| 4.55   | แสดงกราฟความสัมพันธ์ของ ค่าอิมพีแดนซ์เชิงซ้อน เมื่อทำการวัดในช่วงความถี่ 1 กิโลเฮิรตซ์ ถึง 2 เมกะเฮิรตซ์ โดยใช้แรงดันไฟฟ้าในช่วง - 0.3 ถึง 0.5 โวลต์ และทำการวัดที่อุณหภูมิห้องของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-SnS/n-Si (100) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ                           | 151  |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

เซลล์แสงอาทิตย์เป็นสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำที่สามารถเปลี่ยนพลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานไฟฟ้าได้ มีอายุการใช้งานยาวนานกว่า 20 ปี เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม ไม่ต้องทะนุบำรุงมาก สามารถติดตั้งร่วมกับอาคารบ้านเรือนและสำนักงานได้ง่าย แต่อุปสรรคสำคัญของการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์คือวัตถุดิบหลักที่ใช้ยังมีราคาสูงอยู่มาก จนถึงปัจจุบันผลึกเดี่ยวซิลิคอน (Si) ยังคงเป็นวัตถุดิบหลักในการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ ซิลิคอนมีสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงค่อนข้างต่ำ ถ้าต้องการให้ดูดกลืนแสงอาทิตย์อย่างมีประสิทธิภาพ ต้องใช้ความหนาอย่างน้อย 500 ไมโครเมตร แต่สำหรับเทคโนโลยีของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบางต้องการให้ชั้นสารกึ่งตัวนำมีความหนาน้อยกว่า 50 ไมโครเมตร เพื่อลดต้นทุนทั้งค่าวัสดุและลดต้นทุนของกระบวนการผลิต

เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบางที่ประสบความสำเร็จอย่างมากคือ เซลล์แสงอาทิตย์ที่ผลิตจากฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdTe และ  $\text{CuInGaSe}_2$  โดยให้ประสิทธิภาพในการแปลงพลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานไฟฟ้าสูงถึง 20 เปอร์เซ็นต์ แต่เป็นที่น่าเสียดายว่าทั้งอะตอมของธาตุ Te, In และ Ga ล้วนเป็นธาตุที่หายาก มีราคาแพง ด้วยเหตุนี้การพัฒนาโรงไฟฟ้าขนาดเทอร์วัตต์จากเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ ยังเป็นไปได้ยากเนื่องจากต้นทุนสูงกว่าโรงไฟฟ้าที่สร้างจากแหล่งพลังงานทางเลือกชนิดอื่น ดังนั้นจึงมีการวิจัยเพื่อค้นคว้าหาวัสดุอื่นที่มีราคาต่ำกว่าเดิม สารกึ่งตัวนำชนิดใหม่ที่เกิดจากการผสมกันของธาตุสี่ชนิดที่หาได้ง่ายราคาไม่แพงและมีสมบัติทางแสงและสมบัติทางไฟฟ้าที่สามารถปรับแต่งได้ โดยการเลือกค่าสโตยคิโอเมตริ (stoichiometry) ที่เหมาะสม ฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำที่เป็นสารประกอบเชิงสี่ดังกล่าวที่โดดเด่นคือฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$  (CZTS) ในเบื้องต้นได้มีการประดิษฐ์เป็นเซลล์แสงอาทิตย์แล้วและให้ประสิทธิภาพสูงกว่า 10 เปอร์เซ็นต์ อะตอมของธาตุ Cu, Zn, Sn หรือสารประกอบ  $\text{Cu}_2\text{S}$ ,  $\text{ZnS}$ ,  $\text{SnS}$  ล้วนหาได้ง่ายราคาไม่แพง แต่การควบคุมอัตราส่วนของแต่ละธาตุให้เหมาะสม เพื่อให้เกิดเป็นสารประกอบเชิงสี่ของเฟส Cu-Zn-Sn-S (CZTS phase) นับว่าเป็นเรื่องที่ยาก

สารประกอบ SnS เป็นองค์ประกอบหลักของสารประกอบเชิงสี่ CZTS ที่ได้รับความสนใจไม่น้อยเช่นเดียวกัน เนื่องจากหาได้ง่าย ราคาไม่แพงและเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม ผลึกเดี่ยวของสารกึ่งตัวนำดีบุกโมโนซัลไฟด์ (SnS) สามารถเตรียมได้โดยวิธีบริดจ์แมน และวิธีการพาไอระเหยสารเคมี วิธีการเคลือบด้วยชั้นอะตอมของสารตั้งต้น (atomic layer deposition) วิธีซัลเฟอไรเซชันของฟิล์มดีบุก และวิธีดูดซับของชั้นไอออนสลับกันอย่างต่อเนื่อง (successive ionic layer adsorption)

ผลึกขนาดนาโน รวมทั้งรูพรุนขนาดนาโนของสารประกอบ SnS เตรียมได้จากวิธีสังเคราะห์โดยใช้เทมเพลต (template synthesis) ผลึกรูปร่างนาโนเตรียมได้จากวิธีเคลือบด้วยไฟฟ้า ผลึกแบบแผ่นนาโนเตรียมได้จากการเคลือบไฟฟ้า ผลึกแบบแผ่นนาโนเตรียมได้จากวิธีพ่นละอองสารเคมี (spray pyrolysis) ผลึกรูปดอกลำขนาดนาโนเตรียมโดยวิธีไฮโดรเทอร์มัล (hydrothermal synthesis) ส่วนผลึกรูปแถบยาวขนาดนาโน (nanobelts) เตรียมได้โดยวิธีตกผลึกจากการหลอมสารละลายชนิดเกลือ (molten salt solvent method) มีอนุภาคเป็นรูปลูกบอล (fullerene-like nanoparticles) เตรียมโดยวิธีระเหยสารเคมีด้วยเลเซอร์ (laser ablation)

มีผู้รายงานว่าสามารถเตรียมฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ SnS ที่มีเกรนในระดับไมโครเมตร และมีโครงสร้างผลึกแบบซิงค์เบลนด์ขึ้นมาได้ ซึ่งฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ SnS ที่มีโครงสร้างผลึกแบบซิงค์เบลนด์นี้จะเข้ากันได้ดีกับกับสารประกอบกลุ่ม II-VI และ กลุ่ม III-V ที่มีอยู่ก่อนแล้ว การเกิดกระแสไฟฟ้าในเซลล์แสงอาทิตย์ ต้องอาศัยผิวเชื่อมต่อระหว่างชั้นดูดกลืนแสงกับชั้นหน้าต่างที่สะอาด และมีข้อบกพร่องผลึกน้อย โครงสร้างผลึกแบบซิงค์เบลนด์จะมีช่องว่างแถบพลังงานเป็นแบบตรงและสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงมีค่าสูง ซึ่งจะส่งเสริมให้สามารถนำฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ SnS มาประดิษฐ์เป็นเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีประสิทธิภาพสูงได้

อย่างไรก็ตามโดยส่วนใหญ่ฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ SnS ที่เตรียมได้มีช่องว่างแถบพลังงานเป็นแบบตรงและมีค่าอยู่ระหว่าง 1.23 - 1.34 อิเล็กตรอนโวลต์ ซึ่งค่าช่องว่างแถบพลังงานสอดคล้องกับเงื่อนไขที่ช็อคเลย์และควอไอเซอร์ (Shockley-Queisser) ได้ระบุเอาไว้ว่าจะทำให้ได้เซลล์แสงอาทิตย์ที่มีประสิทธิภาพสูงสุดได้ ฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ SnS มีสัมประสิทธิ์การดูดกลืนสูงกว่าฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdTe และ  $\text{CuInGaSe}_2$  และมีชนิดการนำไฟฟ้าเป็นแบบพี ซึ่งเกิดมาจากข้อบกพร่องผลึกชนิดแวนแคนซีของอะตอมดีบุก ( $V_{\text{Sn}}$ ) ดังความสัมพันธ์



การเกิดแวนแคนซี  $V_{\text{Sn}}$  ได้ง่ายอาจเป็นสาเหตุทำให้เซลล์แสงอาทิตย์ที่ประดิษฐ์จากฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ SnS ยังมีประสิทธิภาพได้ไม่เกิน 1.3 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งสาเหตุที่จริงยังไม่แน่ชัด

ในโครงการพิเศษนี้ได้ทำการเตรียมฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ SnS และทำการเตรียมไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-SnS/n-Si (100) ทำการเคลือบฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ SnS ลงบนแผ่นฐานรองรับทั้งที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ และแผ่นผลึกเดี่ยวของสารกึ่งตัวนำ n-Si (100) ตามลำดับโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ เมื่อให้อุณหภูมิแก่แผ่นฐานรองรับที่ต่างกัน จากนั้นจึงทำการศึกษาสมบัติทางฟิสิกส์ต่างๆ ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ SnS และไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-SnS/n-Si (100) ต่อไป

## 1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1. เพื่อศึกษาวิธีการเคลือบฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ SnS ลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นทั้งแผ่นกระจกสไลด์และแผ่นผลึกเดี่ยวของสารกึ่งตัวนำ n-Si (100) ตามลำดับ โดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ โดยการให้อุณหภูมิแก่สารตั้งต้นเท่ากับ 550, 560 และ 588 องศาเซลเซียส
2. เพื่อศึกษาสมบัติทางฟิสิกส์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ SnS ได้แก่ การวิเคราะห์โครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคด้วยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ ศึกษาผิวหน้าผลึกด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด วิเคราะห์ธาตุเชิงปริมาณและเชิงคุณภาพด้วยเทคนิค EDS วิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของสารด้วยเครื่องเทอร์โมกราวิเมตริก อะนาไลเซอร์ (TGA) ศึกษาสมบัติเชิงแสงโดยการวัดสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสง วัดสเปกตรัมของค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง ฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรมิเตอร์ และรามานสเปกโทรสโกปี ตลอดจน ศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ SnS โดยการวัดค่าสภาพต้านทานไฟฟ้า และศึกษาปรากฏการณ์ฮอลล์โดยวิธีแวนเดอร์เพาว์

3. เพื่อประดิษฐ์ไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-SnS/n-Si (100) โดยการเคลือบฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ SnS บนแผ่นผลึกเดี่ยวของสารกึ่งตัวนำ n-Si (100) โดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด ภายในระบบสุญญากาศ โดยการให้อุณหภูมิแก่สารตั้งต้นเท่ากับ 550, 560 และ 588 องศาเซลเซียส
4. เพื่อศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-SnS/n-Si (100) โดยการวัดความสัมพันธ์ระหว่าง ค่ากระแสไฟฟ้า กับ ค่าแรงดันไฟฟ้า รวมทั้งวัด ค่าความจุไฟฟ้า กับ ค่าแรงดันไฟฟ้า และค่าอิมพีแดนซ์สเปกโทรสโกปี ในช่วงความถี่ 1 กิโลเฮิร์ตซ์ ถึง 2 เมกะเฮิร์ตซ์ ที่ค่าแรงดันไฟฟ้าในช่วง -0.3 ถึง 0.5 โวลต์

### 1.3 ขอบเขตงานวิจัย

1. ทำการเคลือบฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำทินซัลไฟด์ (SnS) ลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ด้วยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ โดยการให้อุณหภูมิแก่สารตั้งต้นเป็น 550, 560 และ 588 องศาเซลเซียส
2. ทำการเคลือบฟิล์มบาง SnS ลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นผลึกเดี่ยวของสารกึ่งตัวนำ n-Si (100) เพื่อประดิษฐ์ไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-SnS/n-Si (100) ด้วยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ โดยการให้อุณหภูมิแก่สารตั้งต้นเป็น 560, 570 และ 580 องศาเซลเซียส
3. นำฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ SnS ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ และ ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-SnS/n-Si (100) ที่เตรียมได้ไปศึกษาสมบัติทางฟิสิกส์ต่างๆ ดังนี้
  - ศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคด้วยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (XRD)
  - ศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงมหภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)
  - วิเคราะห์ชนิดของธาตุเชิงปริมาณ และเชิงคุณภาพด้วยเทคนิค EDS
  - ศึกษาสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ SnS ด้วยเครื่องสเปกโทรโฟโตมิเตอร์
  - วิเคราะห์หาชนิดของโมเลกุล โดยการวัดค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงของสารในช่วงรังสีอินฟราเรด ด้วยเครื่องฟูเรียร์ทรานซอร์มอินฟราเรดสเปกโทรมิเตอร์ (FTIR)
  - วิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของสารโดยอาศัยคุณสมบัติทางความร้อนด้วยเครื่องเทอร์โมกราวิเมตริกอะนาไลเซอร์ (TGA)
  - ศึกษาสภาพนำไฟฟ้าเชิงแสง (PPC)
  - ตรวจสอบโครงสร้างทางเคมีของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ SnS ด้วยเทคนิครามาน สเปกโทรสโกปี
  - ศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ SnS โดยการวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าและวัดปรากฏการณ์ฮอลล์
  - ศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-SnS/n-Si (100) โดยการวัดความสัมพันธ์ระหว่าง ค่ากระแสไฟฟ้า กับ ค่าแรงดันไฟฟ้า และ ค่าความจุไฟฟ้า กับ ค่าแรงดันไฟฟ้า นอกจากนี้วัดค่าอิมพีแดนซ์สเปกโทรสโกปี ในช่วงความถี่ 1 กิโลเฮิร์ตซ์ ถึง 2 เมกะเฮิร์ตซ์ ที่ค่าแรงดันไฟฟ้าในช่วง -0.3 ถึง 0.5 โวลต์

## 1.4 ขั้นตอนวิจัยและการดำเนินงาน

1. ค้นคว้าและศึกษาข้อมูลต่างๆ ตลอดจนทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการเตรียมฟิล์มบาง ด้วยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ พร้อมทั้งจัดหาวัสดุอุปกรณ์ที่ใช้ทำโครงการพิเศษนี้ด้วย
2. ทำการเคลือบฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำทินซิลไฟด์ (SnS) ลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ด้วยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศโดยให้อุณหภูมิแก่สาร ตั้งต้นเป็น 550, 560 และ 588 องศาเซลเซียส
3. ทำการเคลือบฟิล์มบาง SnS ลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นผลึกเดี่ยวของสารกึ่งตัวนำ n-Si (100) เพื่อประดิษฐ์ไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-SnS/n-Si (100) ด้วยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ โดยการให้อุณหภูมิแก่สารตั้งต้นเป็น 560, 570 และ 580 องศาเซลเซียส
4. นำฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ SnS ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ไปศึกษาสมบัติทางฟิสิกส์ต่างๆ ดังนี้
  - ศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคของฟิล์มบางที่เตรียมได้ โดยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (XRD)
  - ศึกษาลักษณะผิวหน้าของฟิล์มบางและลักษณะของเกรนด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)
  - ศึกษาการวิเคราะห์ธาตุเชิงปริมาณ และเชิงคุณภาพด้วยเทคนิคเอ็นเนอร์ยีดิสเพอร์ซีฟสเปกโทรสโกปี (EDS)
  - ศึกษาสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงและหาค่าช่องว่างแถบพลังงานของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ SnS ด้วยเครื่องมือวัดสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ในช่วงความยาวคลื่น 200 - 1000 นาโนเมตร
  - วิเคราะห์หาชนิดของโมเลกุล โดยการวัดค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงของสารในช่วงรังสีอินฟราเรดด้วยเครื่องฟูเรียร์แทรนฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรมิเตอร์ (FTIR)
  - วิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของสารโดยอาศัยสมบัติทางความร้อนด้วยเครื่องเทอร์โมกราวิเมตริกอะนาไลเซอร์ (TGA)
  - ศึกษาสภาพนำไฟฟ้าเชิงแสง (PPC) โดยการฉายแสงด้วยหลอดไฟฮาโลเจน
  - ศึกษาการตรวจสอบชนิดของพันธะเคมีของสารประกอบด้วยเทคนิครามานสเปกโทรสโกปีในช่วงเลขคลื่น 100-400 ต่อเซนติเมตร
  - ศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์มบางด้วยวิธีการวัดความต้านทานไฟฟ้าด้วยวิธีสองขั้ว
5. ศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-SnS/n-Si (100) โดยการวัดความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสไฟฟ้า กับ ค่าแรงดันไฟฟ้า และค่าความจุไฟฟ้า กับ ค่าแรงดันไฟฟ้า นอกจากนี้ยังวัดค่าโอิมพีแดนซ์สเปกโทรสโกปี ในช่วงความถี่ 1 กิโลเฮิร์ตซ์ ถึง 2 เมกะเฮิร์ตซ์ที่ค่าแรงดันไฟฟ้าในช่วง -0.3 ถึง 0.5 โวลต์
6. วิเคราะห์ผลการวิจัย และสรุปผลการวิจัย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ทำให้ทราบถึงหลักการ ปัจจัยหรือเงื่อนไข และวิธีการเตรียมฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ SnS และการเตรียมไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-SnS/n-Si (100) ด้วยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ
2. ทำให้ทราบถึงอิทธิพลของอุณหภูมิและระยะเวลาในการเคลือบสารเคมีด้วยความร้อนในระยยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ ซึ่งจะส่งผลต่อองค์ประกอบทางเคมี โครงสร้างผลึกลักษณะผิวหน้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ และช่องว่างของแถบพลังงานของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ SnS และของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-SnS/n-Si (100)
3. ทำให้ได้ความรู้เพิ่มเติมในการศึกษาค้นคว้าทฤษฎี และเงื่อนไขการเตรียมฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ SnS และการเตรียมไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-SnS/n-Si (100) ให้มีคุณภาพเพื่อสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในงานด้านอื่นๆ ต่อไปได้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 2

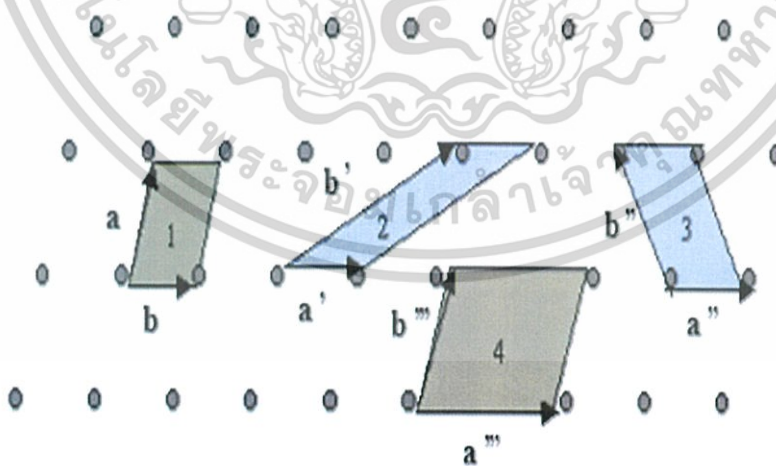
# ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

### 2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับเรื่องของลักษณะของโครงสร้างผลึก

ในทางผลึกวิทยาสามารถแบ่งสารและวัสดุที่อยู่ในสภาพของแข็งออกได้เป็น 2 กลุ่มใหญ่ๆ ตามการจัดเรียงตัวของอะตอม ได้แก่ วัสดุที่เป็นผลึก (crystalline materials) และวัสดุที่เป็นอะมอร์ฟัส (amorphous materials) ซึ่งในที่นี่จะกล่าวถึงวัสดุที่เป็นผลึกเท่านั้น

#### 2.1.1 โครงสร้างผลึกในอุดมคติ (Cullity, 1956; Kittel, 1971; งามนิตย์, 2531; งามนิตย์, 2545; ฐิตินัย, 2549; ฐิตินัย, 2550; งามนิตย์, 2551; ฐิตินัย, 2551)

ผลึกของสารเกิดจากการที่อะตอมหรือโมเลกุลของสารชนิดนั้นมารวมกันอยู่เป็นจำนวนมากโดยระยะห่างระหว่างอะตอมมีค่าคงที่ และมีการจัดเรียงตัวกันเป็นระบบแบบรูปทรงเรขาคณิตที่แน่นอนเป็นระเบียบอย่างต่อเนื่อง ภายในหนึ่งหน่วยเซลล์ของผลึก อาจประกอบด้วยอะตอมของธาตุเพียงอะตอมเดียวไปจนถึงหลายๆ อะตอม หรือหลายๆ โมเลกุลเซลล์ที่มีปริมาตรเล็กที่สุดที่สามารถใช้เป็นตัวแทนของผลึกนั้นเรียกว่า หน่วยเซลล์ (unit cell) กล่าวคือ ถ้าเอาหน่วยเซลล์นี้มาเรียงต่อกันก็จะได้ผลึกขึ้นมา และเรียกตำแหน่งต่างๆ ของอะตอมในระบบสามมิติว่าโครงสร้างผลึก หรือ แลตทิซ (lattice) ในทางทฤษฎีการกำหนดหน่วยเซลล์จะทำได้ไม่จำกัด แต่ตามปกติจะเลือกหน่วยเล็กที่สุดที่เป็นไปได้ และมีสมมาตรค่อนข้างสูง ตัวอย่างการเลือกหน่วยเซลล์ในโครงสร้างผลึก 2 มิติ ดังรูปที่ 2.1 ในระบบสองมิติพารามิเตอร์ของโครงสร้างผลึก ได้แก่ เวกเตอร์  $\vec{a}$  และ  $\vec{b}$  และ มุม  $\gamma$  ซึ่งเป็นมุมระหว่าง เวกเตอร์ทั้งสอง ทั้งนี้ชนิดของโครงสร้างผลึกที่แตกต่างกัน ที่เป็นไปได้มีเพียงห้าแบบดังตาราง ที่ 2.1



รูปที่ 2.1 แสดงหน่วยเซลล์ในระบบสองมิติ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

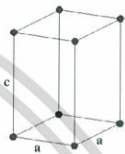
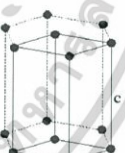
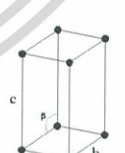
ตารางที่ 2.1 แสดงพารามิเตอร์ของหน่วยเซลล์ในระบบสองมิติ

| ชนิดของโครงผลึกสองมิติ                                       | ค่าคงที่ของโครงผลึก | มุม                 |
|--|---------------------|---------------------|
| สี่เหลี่ยมจัตุรัส<br>(square)                                | $a = b$             | $\gamma = 90^\circ$ |
| สี่เหลี่ยมผืนผ้า<br>(rectangle)                              | $a \neq b$          | $\gamma = 90^\circ$ |
| สี่เหลี่ยมผืนผ้าแบบบอดีเซนเตอร์<br>(body-centered rectangle) | $a \neq b$          | $\gamma = 90^\circ$ |
| สี่เหลี่ยมขนมเปียกปูน $60^\circ$<br>( $60^\circ$ rhombus)    | $a = b$             | $\gamma = 90^\circ$ |
| สี่เหลี่ยมด้านขนานทั่วไป<br>(general parallelogram)          | $a \neq b$          | ไม่มีข้อกำหนด       |

ในระบบ 3 มิติพารามิเตอร์ของโครงผลึก ได้แก่ ขนาดของเวกเตอร์  $\vec{a}$ ,  $\vec{b}$  และ  $\vec{c}$  และมุม  $\alpha$ ,  $\beta$  และ  $\gamma$  ซึ่งเป็นมุมระหว่างเวกเตอร์ต่างๆ ดังตัวอย่างในตารางที่ 2.2 ทั้งนี้สามารถจัดแบ่งรูปแบบของโครงสร้างผลึกขึ้นมา โดยสามารถแบ่งออกได้เป็นสี่สี่แบบในสามมิติ ซึ่งจัดได้เป็นเจ็ดกลุ่ม คือ ไตรคลินิก (triclinic), โมโนคลินิก (monoclinic), ออร์โธโรมบิก (orthorhombic), เตตระโกนัล (tetragonal), คิวบิก (cubic), รอมโบฮีดรัล (rhombohedral) และเฮกซะโกนัล (hexagonal)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.2 แสดงระบบผลึกทั้งเจ็ดแบบในระบบสามมิติ

| ระบบผลึก                       | ค่าคงที่ของโครงผลึกและมุมผลึก                                      | รูปทรงเรขาคณิตของหน่วยเซลล์   |
|--------------------------------|--|---|
| คิวบิก<br>(cubic)              | $a = b = c$<br>$\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$                |    |
| เตตระโกนัล<br>(tetragonal)     | $a = b \neq c$<br>$\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$             |    |
| ออร์โธโรมบิก<br>(orthorhombic) | $a \neq b \neq c$<br>$\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$          |   |
| รอมโบฮีดรัล<br>(rhombohedral)  | $a = b = c$<br>$\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$                |  |
| เฮกซะโกนัล<br>(hexagonal)      | $a = b \neq c$<br>$\alpha = 90^\circ, \gamma = 120^\circ$          |  |
| โมนอคลินิก<br>(monoclinic)     | $a \neq b \neq c$<br>$\alpha = \gamma = 90^\circ \neq \beta$       |  |
| ไตรคลินิก<br>(triclinic)       | $a \neq b \neq c$<br>$\alpha \neq \beta \neq \gamma \neq 90^\circ$ |  |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.1.1.1 การระบุตำแหน่งทิศทางและระนาบของโครงสร้างผลึก (Cullity, 1956; Kittel, 1971; งามนิตย์, 2545; จูตินัย, 2549; จูตินัย, 2550; งามนิตย์, 2551; จูตินัย, 2551)

เนื่องจากผลึกมีสมบัติที่ขึ้นอยู่กับทิศทาง ดังนั้นจึงต้องระบุแน่นอนว่ากำลังศึกษา ลักษณะส่วนใดของผลึกอยู่ ซึ่งการระบุลักษณะที่ว่าจะกล่าวถึงตำแหน่ง ทิศทาง และระนาบของผลึกที่กำลังศึกษาอยู่นั้น

#### หลักเกณฑ์ในการระบุลักษณะพื้นฐานของผลึก

##### การระบุตำแหน่ง

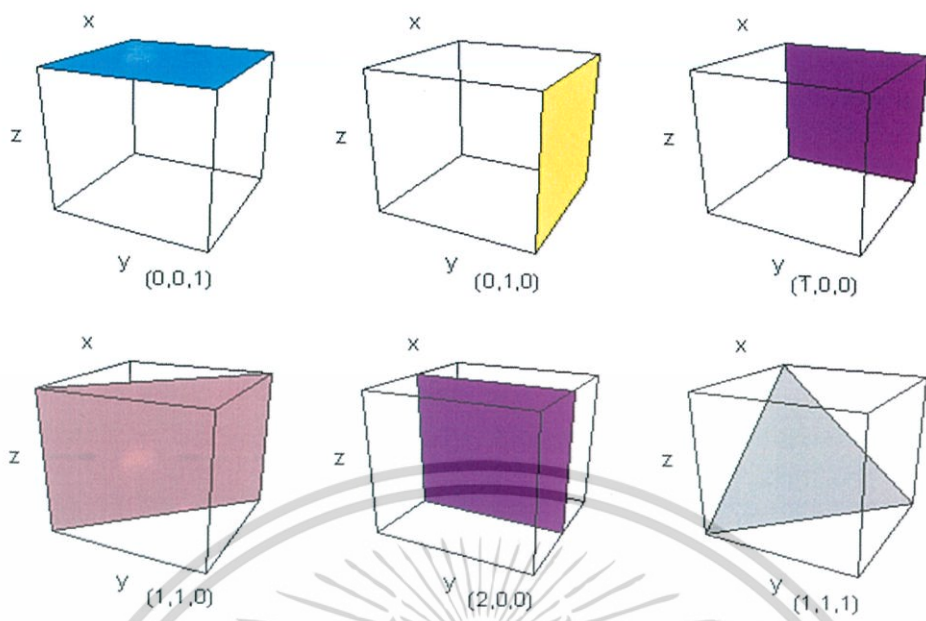
1. ในกรณีทั่วไปจะเขียนเป็น  $(x,y,z)$  ให้สังเกตเครื่องหมาย “ , ” ซึ่งคั่นแต่ละค่าตัวอย่าง จุด  $(1,2,3)$  หมายความว่า เป็นตำแหน่งอยู่ที่พิกัด  $x = 1, y = 2$  และ  $z = 3$  ในการบอกตำแหน่ง
2. การระบุทิศทางในกรณีทั่วไปจะเขียนเป็น  $[u\ v\ w]$  ให้สังเกตว่าใช้วงเล็บกำกับ และไม่มีเครื่องหมาย “ , ” คั่นระหว่างค่าแต่ละค่า ถ้าเป็นทิศทางที่เป็นลบก็จะใส่เครื่องหมาย “ - ” หรือ บาร์ (bar) ไว้บนตัวเลขนั้นๆ เช่น ทิศทาง  $[\bar{1}\ 2\ \bar{1}]$  แสดงว่าในแนวแกน  $z$  มีค่าเป็นลบ
3. การระบุชื่อระนาบของผลึกจะใช้อักษร  $(h\ k\ l)$  ให้สังเกตการใช้วงเล็บ และไม่มีเครื่องหมาย “ , ” คั่น โดยที่หากระนาบใดตัดแกนลบก็ใส่เครื่องหมาย “ - ” หรือ บาร์ข้างบนตัวเลขดัชนีมิลเลอร์นั้น

ค่า  $hkl$  เรียกว่า ดัชนีมิลเลอร์ (miller indices) ชื่อระนาบของผลึกเป็นสิ่งที่สำคัญที่สุดอีกประการหนึ่งในการศึกษาผลึก เพราะในแต่ละระนาบจะประกอบไปด้วยอะตอม ไอออน หรือ โมเลกุล เรียงตัวกันอยู่บนระนาบนั้น อาจกล่าวได้ว่าระนาบแต่ละระนาบจะมีความแตกต่างกันเช่นเดียวกับทิศทางการบอกชื่อระนาบหรือดัชนีมิลเลอร์นั้นทำได้โดย

1. กำหนดจุดที่ระนาบนั้นตัดแกนพิกัดฉากขึ้นมาเป็น  $(x,y,z)$  โดยที่หากระนาบตัดแกนใดให้ถือว่าระนาบนั้นตัดแกนนั้นที่ระยะอนันต์ ( $\infty$ ) และหากระนาบใดตัดแกนลบ (-) ก็ให้ใส่เครื่องหมายบาร์ (-) ข้างบนตัวเลขดัชนีนั้น
2. ทำค่าจุดตัดต่างๆ ที่ได้จากข้อ 1 ทั้งหมดให้เป็นเศษส่วนกลับ
3. ทำให้เป็นเลขจำนวนเต็มโดยการหาค่าผลคูณร่วมน้อย (ค.ร.น.) ของค่าเศษส่วนที่ได้จากข้อ 2 ซึ่งก็จะได้ค่าตัวเลขดัชนีมิลเลอร์  $(hkl)$  ตามลำดับ

ดังแสดงในรูปที่ 2.2 และ ตารางที่ 2.3 ซึ่งสรุปความสัมพันธ์ระหว่างระนาบต่างๆ กับระยะตัดแกนอ้างอิง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.2 แสดงการบอกชื่อระนาบต่างๆ ของผลึก

ตารางที่ 2.3 แสดงความสัมพันธ์ของดัชนีมิลเลอร์ (hkl) และจุดตัดแกนผลึก (x,y,z)

| จุดตัดแกนผลึก<br>(x,y,z) | ส่วนกลับของจุดตัดบน<br>แกนผลึก<br>$\frac{1}{x}, \frac{1}{y}, \frac{1}{z}$ | ชื่อระนาบหรือดัชนีมิลเลอร์<br>(hkl) |
|--------------------------|---|-------------------------------------|
| $\infty, 1, \infty$      | $\frac{1}{\infty}, \frac{1}{1}, \frac{1}{\infty}$<br>$0, 1, 0$            | (010)                               |
| -1, 1, 1                 | $\frac{1}{-1}, \frac{1}{1}, \frac{1}{1}$<br>$-1, 1, 1$                    | ( $\bar{1}$ 11)                     |
| -1, -1, -1               | $\frac{1}{-1}, \frac{1}{-1}, \frac{1}{-1}$<br>$-1, -1, -1$                | $\bar{\bar{\bar{1}}}$<br>(111)      |
| 0.5, 0.5, 0.25           | $\frac{1}{0.5}, \frac{1}{0.5}, \frac{1}{0.25}$<br>$0.5, 0.5, 0.25$        | (224)                               |
| 0.5, 0.5, $\infty$       | $\frac{1}{0.5}, \frac{1}{0.5}, \frac{1}{\infty}$<br>$0.5, 0.5, 0$         | (220)                               |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มีข้อสังเกตที่ควรรู้เกี่ยวกับดัชนีมิลเลอร์ที่ใช้บอกชื่อระนาบของผลึกเพิ่มเติมดังนี้

สำหรับระบบเฮกซะโกนัลจะระบุดัชนีมิลเลอร์ที่ใช้บอกชื่อระนาบที่ต่างไปเป็น (hkl) โดยที่มีกฎเกณฑ์ว่าดัชนีตัวที่สาม (หรือ i) ซึ่งเพิ่มเข้ามานั้นจะมีความสัมพันธ์กับดัชนีสองตัวแรก (h และ k) ดังนี้

$$l = -(h + k)$$

เช่น ระนาบ (110) จะเรียกว่า  $(\overline{1120})$  ในระบบเฮกซะโกนัล

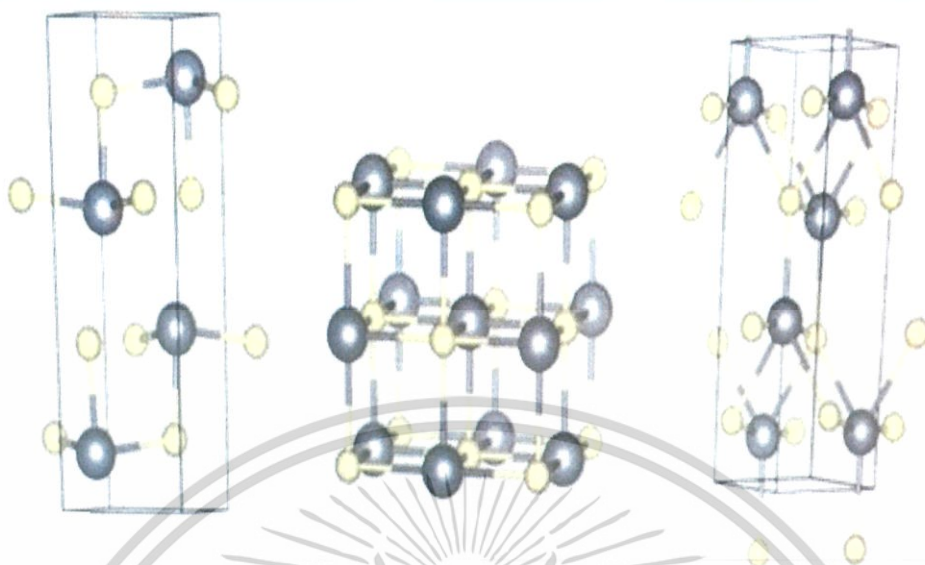
เฉพาะระบบลูกบาศก์เท่านั้นที่จะพบว่าทิศทาง [hkl] จะตั้งฉากกับระนาบที่มีค่าตัวเลขดัชนีเหมือนกัน นั่นคือระนาบ (hkl) ตัวอย่างเช่น ทิศทาง [102] จะตั้งฉากกับระนาบ (102)

### 2.1.2 โครงสร้างผลึกของสารประกอบหินซัลไฟด์ (งามนิตย์, 2530; จูตินัย, 2546; งามนิตย์, 2545; จูตินัย, 2550; จูตินัย, 2552; Kittel, 2005; Runyan, 1975; สุกฤษณ์, 2547; สมเกียรติ, 2542)

สารประกอบ SnS มีโครงสร้างผลึกเป็นแบบออร์โธโรมบิกมีกลุ่มปริภูมิ (space group) เป็น Pnma ไอออนของธาตุ Sn<sup>2+</sup> จะสร้างพันธะกับไอออนของธาตุ S<sup>2-</sup> จำนวน 3 ไอออน ส่วนวาเลนซ์อิเล็กตรอน 5s<sup>2</sup> ของอะตอมของธาตุ Sn จะไม่สร้างพันธะ (lone pair) ดังนั้นพันธะระหว่างไอออนของธาตุ Sn<sup>2+</sup> กับไอออนของธาตุ S<sup>2-</sup> จะมีรูปทรงเป็นแบบเตตระโกนัล (tetragonal geometry) ค่าคงที่โครงสร้างของหนึ่งหน่วยเซลล์จะแสดงดังตารางที่ 2.4 อะตอมของธาตุ Sn กับอะตอมของธาตุ S จะสร้างพันธะต่อกันหนึ่งพันธะ กลายเป็นแผ่นบางซ้อนกันเป็นชั้นๆ ซึ่งแต่ละชั้นจะดึงดูดกันด้วยแรงแวนเดอร์วาลส์ (van der Waals) ดังรูปที่ 2.3 และ 2.4 เฟสอื่นๆของสารประกอบ SnS ที่เกิดขึ้นได้อีก เช่น เฟสรีคซอลต์ (rocksalts) เฟสออร์โธโรมบิกที่อุณหภูมิสูง และเฟสซิงค์เบลนด์ เป็นต้น

โครงสร้างผลึกของสารประกอบ SnS, SnS<sub>2</sub> และ Sn<sub>2</sub>S<sub>3</sub> จะแสดงดังรูปที่ 2.3 สารประกอบ SnS<sub>2</sub> มีโครงสร้างผลึกแบบเฮกซะโกนัล ไอออนของธาตุ Sn<sup>4+</sup> แต่ละไอออนจะสร้างพันธะกับไอออนของธาตุ S<sup>2-</sup> จำนวน 6 ไอออน กลายเป็นรูปทรงเรขาคณิตแบบออกตะฮีดรัล ในหนึ่งหน่วยเซลล์จะมีชั้นบางๆ ของสารประกอบ SnS<sub>2</sub> จำนวน 3 ชั้น การจัดเรียงอะตอมของธาตุ Sn กับอะตอมของธาตุ S ที่แตกต่างกันในแต่ละชั้น ส่งผลให้เกิดเป็นโครงสร้างผลึกได้หลากหลาย (polytype) เช่น มีโครงสร้างเป็นแบบเตตระโกนัล และมีกลุ่มปริภูมิเป็นแบบ Pnma ไอออนของธาตุ Sn<sup>4+</sup> จะสร้างพันธะกับไอออนของธาตุ S<sup>2-</sup> จำนวน 6 ไอออน กลายเป็นรูปทรงเรขาคณิตแบบออกตะฮีดรัล แต่ละออกตะฮีดรัล จะเชื่อมต่อกันเป็นสายโซ่ยาวของสารประกอบ Sn<sub>2</sub>S<sub>3</sub> โดยไอออนของธาตุ Sn<sup>4+</sup> จะอยู่ในแกนกลางของสายโซ่ ส่วนไอออนของธาตุ S<sup>2+</sup> จะสร้างพันธะกับไอออนของธาตุ S<sup>2-</sup> จำนวน 6 ไอออน แต่มีรูปทรงเรขาคณิตเป็นแบบไตรโกนัลปิรามิด (trigonal-pyramidal geometry) ซึ่งจะมีลักษณะพิเศษคือมีรูปร่างเป็นแบบพีระมิดฐานสามเหลี่ยมสองรูปที่เอายอดปลายแหลมเชื่อมต่อกัน ค่าคงที่โครงสร้างของเฟสของสารประกอบ SnS, SnS<sub>2</sub> และ Sn<sub>2</sub>S<sub>3</sub> ทั้งที่ได้จากการทดลอง และที่ได้จากการคำนวณทางทฤษฎีจะแสดงดังตารางที่ 2.4 ส่วนกลุ่มปริภูมิของสารประกอบ SnS ที่รู้จักกันดี ได้แก่ Pnma, Fm3m, Cmcm, F43m จะสัมพันธ์กับเฟสออร์โธโรมบิก ที่อุณหภูมิต่ำ, ร็อกซอลต์, ออร์โธโรมบิก ที่อุณหภูมิสูง และเฟสซิงค์เบลนด์ ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก) SnS Pnma

(ข) SnS Fm-3m

(ค) SnSCmcm



(ง) SnS F-43m

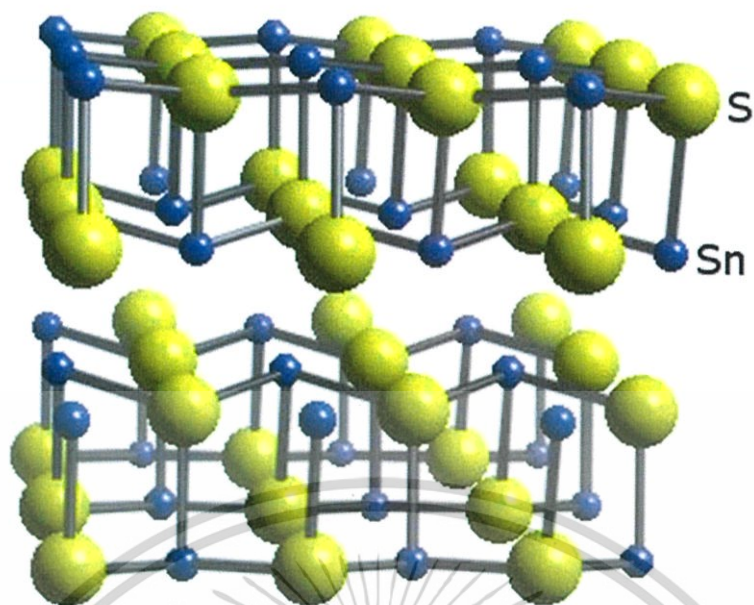
(จ) Sn<sub>2</sub>S<sub>3</sub> P-3m1(ฉ) Sn<sub>2</sub>S<sub>3</sub> Pnma

Sn

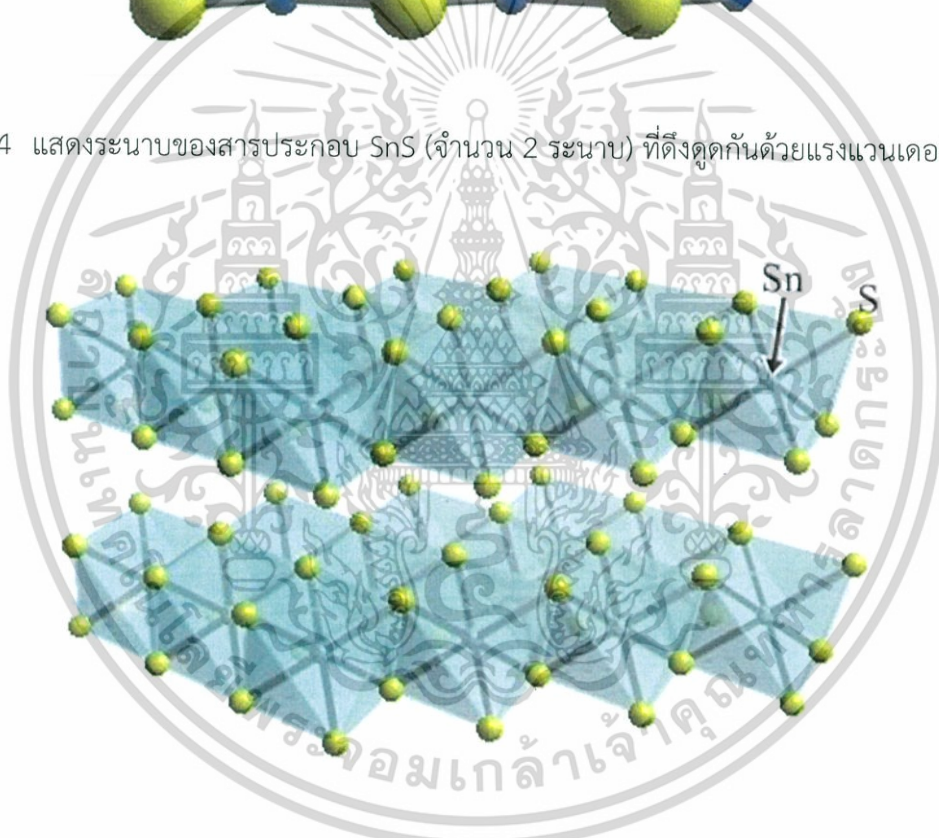


S

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 รูปที่ 2.3 แสดงโครงสร้างผลึกของสารประกอบ SnS, SnS<sub>2</sub> และ Sn<sub>2</sub>S<sub>3</sub>  
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.4 แสดงระนาบของสารประกอบ SnS (จำนวน 2 ระนาบ) ที่ดึงดูดกันด้วยแรงแวนเดอร์วาล



รูปที่ 2.5 แสดงระนาบของสารประกอบ SnS<sub>2</sub> (จำนวน 2 ชั้น) ที่ดึงดูดกันด้วยแรงแวนเดอร์วาล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.4 แสดงค่าคงที่โครงสร้างผลึกของสารประกอบ SnS, SnS<sub>2</sub> และ Sn<sub>2</sub>S<sub>3</sub> ที่อุณหภูมิห้อง

| Phase                          | space group | experimental parameters |       |       | ref | relaxed parameter (%error) |            |             |
|--------------------------------|-------------|-------------------------|-------|-------|-----|----------------------------|------------|-------------|
|                                |             | a                       | b     | c     |     | a                          | b          | c           |
| SnS                            | Pnma        | 11.32                   | 4.05  | 4.24  | 43  | 11.11(1.89)                | 3.99(1.52) | 4.24(0.10)  |
| SnS                            | Fm3m        | 5.80                    | 5.80  | 5.80  | 45  | 5.75(0.87)                 | 5.75(0.87) | 5.75(0.87)  |
| SnS                            | F43m        | 5.845                   | 5.845 | 5.845 | 26  | 6.43(10.0)                 | 6.43(10.0) | 6.43(10.0)  |
| SnS <sub>2</sub>               | P3m1        | 3.64                    | 3.64  | 5.89  | 46  | 3.66(0.44)                 | 3.67(0.80) | 6.06(2.75)  |
| Sn <sub>2</sub> S <sub>3</sub> | Pnma        | 8.87                    | 3.75  | 14.02 | 12  | 8.80(0.83)                 | 3.77(0.66) | 13.83(1.36) |
| SnO                            | P4/n m m    | 3.80                    | 3.80  | 4.82  | 47  | 3.81(0.26)                 | 3.81(0.26) | 4.76(1.09)  |
| SnO <sub>2</sub>               | P42/mnm     | 4.74                    | 4.74  | 3.19  | 48  | 4.77(0.72)                 | 4.77(0.72) | 3.22(0.97)  |

## 2.2 การศึกษาโครงสร้างผลึกโดยการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (Cullity, 1956; Kittel, 1971; งามนิตย์, 2545; ฐิตินัย, 2549; ฐิตินัย, 2550; งามนิตย์, 2551; ฐิตินัย, 2551)

การศึกษาโครงสร้างผลึกโดยการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ด้วยเครื่องเอกซ์เรย์ดิฟแฟร็กโทรมิเตอร์ โดยใช้รังสีเอกซ์ความยาวคลื่นเดี่ยวตกกระทบตัวอย่างซึ่งอาจเป็นผลึกเดี่ยวหรือผลึกพหุพันธ์ก็ได้ สารตัวอย่างจะหมุนไปเป็นมุม  $\theta$  ในขณะที่อุปกรณ์ตรวจจับสัญญาณ รังสีเอกซ์จะเคลื่อนที่ไปเป็นมุม  $2\theta$  เพื่อให้การเลี้ยวเบนสอดคล้องกับกฎของแบรกก์

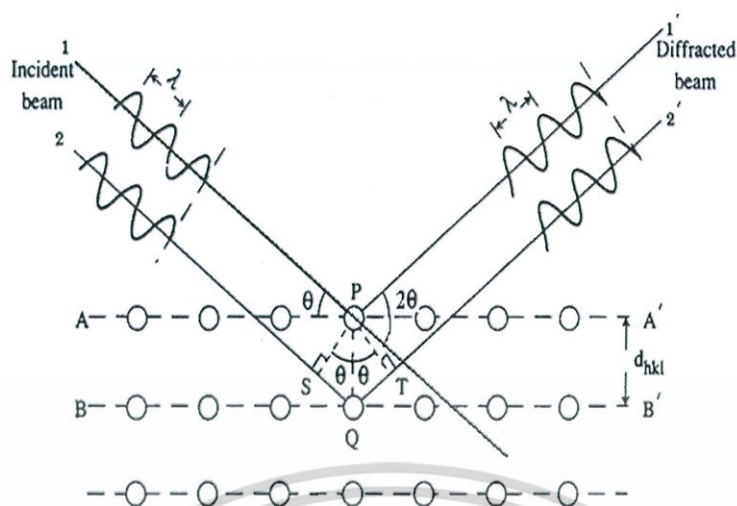
ในปี พ.ศ. 2455 (ค.ศ. 1912) W.H. Bragg และ W.L. Bragg ได้เสนอแนวคิดที่ว่า เราสามารถมองได้ว่าผลึกจัดเรียงตัวเป็นชั้น (layer) หรือระนาบ (plane) ของอะตอมซึ่งสามารถสะท้อนคลื่นที่ตกกระทบโดยมุมตกกระทบเท่ากับมุมสะท้อน ทั้งนี้ลำคลื่นที่สะท้อนออกไปจากระนาบต่างๆ ดังกล่าวจะมีความเข้มสูง และแทรกสอดแบบเสริมกัน ถ้าหากความแตกต่างระหว่างทางเดินของคลื่นที่สะท้อนจากระนาบที่อยู่ข้างเคียง (path difference) มีค่าเป็นจำนวนเท่าของความยาวคลื่นที่ตกกระทบดังสมการ

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

เมื่อ  $d_{hkl}$  คือ ระยะห่างระหว่างระนาบ  
 $\theta$  คือ มุมของรังสีสะท้อนจากระนาบแบรกก์ของรังสีเอกซ์ ซึ่งจะเท่ากับมุมของรังสีตกกระทบ  
 $n$  คือ ลำดับของการเลี้ยวเบน มีค่าตั้งแต่ 1, 2, 3,  
 $\lambda$  คือ ความยาวคลื่น

ระนาบต่างๆ ของผลึกที่ก่อให้เกิดการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ ต้องสอดคล้องกับกฎของแบรกก์ เรียกว่า “ระนาบแบรกก์ (Bragg plane)” และมุมที่รังสีสะท้อนทำกับแนวที่ขนานกับรังสีตกกระทบเรียกว่า “มุมเลี้ยวเบน (diffraction angle)” ซึ่งมีค่าเป็นสองเท่าของมุมตกกระทบ ( $2\theta$ ) ดังรูปที่ 2.6

เอกซ์เรย์คริสตัลโลกราฟี (XRD) เป็นเทคนิคที่ใช้ในการศึกษาโครงสร้างผลึกของวัสดุ โดยอาศัยหลักการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ที่ตกกระทบกับผลึกของวัสดุ ซึ่งจะทำให้เกิดรูปแบบการเลี้ยวเบนที่เฉพาะเจาะจงขึ้น โดยขึ้นอยู่กับโครงสร้างผลึกของวัสดุนั้นๆ การวิเคราะห์รูปแบบการเลี้ยวเบนเหล่านี้สามารถใช้ในการระบุโครงสร้างผลึกของวัสดุได้ นอกจากนี้ XRD ยังสามารถใช้เพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างผลึกของวัสดุภายใต้สภาวะต่างๆ ได้ด้วย



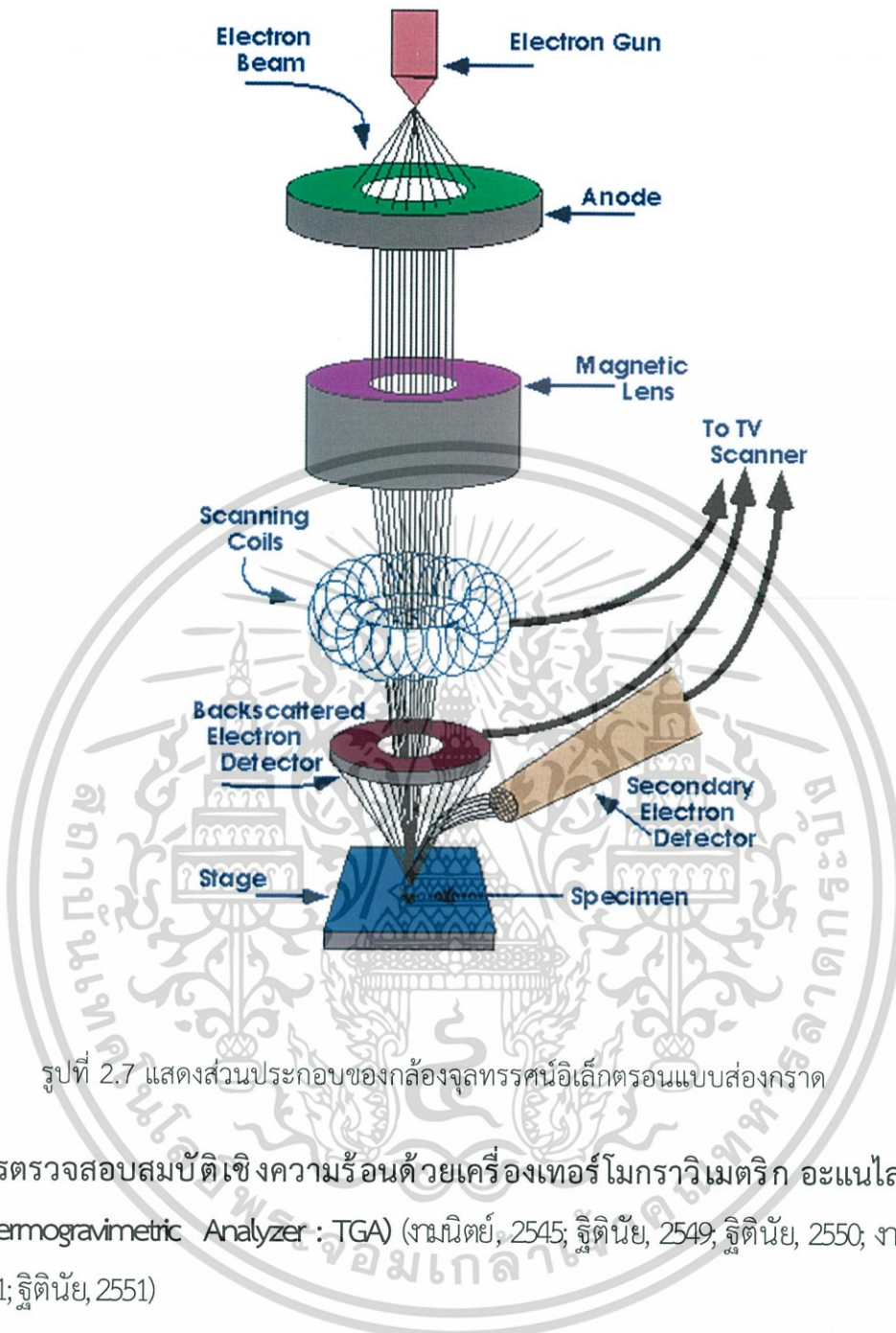
รูปที่ 2.6 แสดงการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์บนระนาบของผลึกที่เป็นไปตามกฎของแบรกก์

### 2.3 การศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงมหภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Cullity, 1956; Kittel, 1971; งามนิศย์, 2545; จูตินัย, 2549; จูตินัย, 2550; งามนิศย์, 2551; จูตินัย, 2551)

ในปี พ.ศ. 2478 แมก นอคล์ (Max Knoll) ได้คิดค้นหลักการ และวิธีการในการประดิษฐ์กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดขึ้น และต่อมาแมนเฟรด วอน อาเตนเน (Manfred Von Ardenne) ได้ประดิษฐ์กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดเครื่องแรกสำเร็จในปี พ.ศ. 2481 โดยเครื่องมือที่ประดิษฐ์ได้นั้นยังมีกำลังขยายไม่สูงมากนัก ต่อมาในปี พ.ศ. 2498 ชาลส์วิลเลียมแอ็ทเลย์ (Charles William Oatley) และทีมงานจากเคมบริดจ์ได้สร้างกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่มีความละเอียดสูงถึง 250 อังสตรอม

การทำงานของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดดังแสดงในรูปที่ 2.7 เริ่มจากแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอนซึ่งมีหน้าที่ผลิตอิเล็กตรอนจากไส้หลอด กลุ่มอิเล็กตรอนที่ได้จะถูกเร่งด้วยสนามไฟฟ้า พร้อมทั้งบังคับกลุ่มอิเล็กตรอนให้มีลักษณะเป็นลำ โดยลำอิเล็กตรอนจะกระจัดไปบนพื้นผิวของตัวอย่างโดยขดลวดสนามแม่เหล็กบนระนาบเอกซ์-วาย เพื่อทำให้เกิดอิเล็กตรอนทุติยภูมิ อิเล็กตรอนเหล่านี้จะถูกตรวจจับโดยเซนเซอร์ และแปลงเป็นสัญญาณไฟฟ้าเพื่อส่งต่อไปให้ระบบสร้างภาพต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

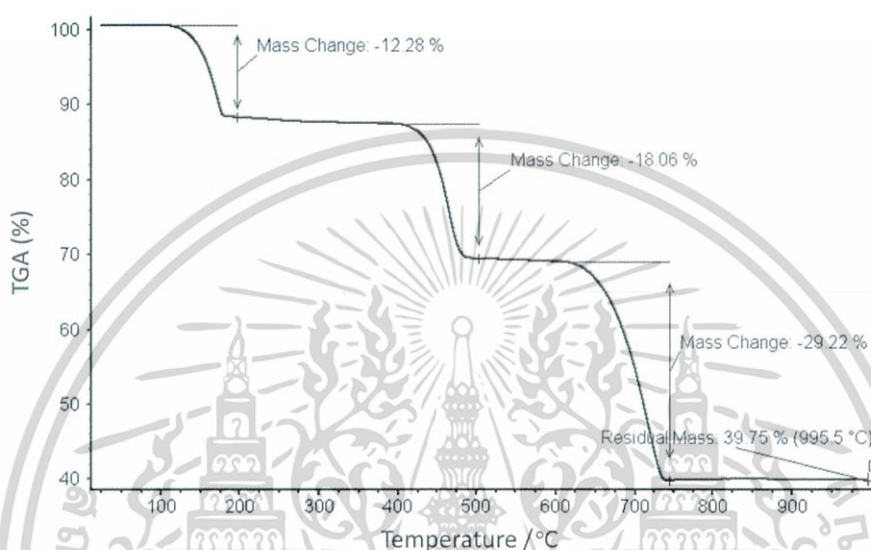


รูปที่ 2.7 แสดงส่วนประกอบของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

#### 2.4 การตรวจสอบสมบัติเชิงความร้อนด้วยเครื่องเทอร์โมกราวิเมตริก อะแนไลเซอร์ (Thermogravimetric Analyzer : TGA) (งมณิตย์, 2545; จูตินัย, 2549; จูตินัย, 2550; งมณิตย์, 2551; จูตินัย, 2551)

การตรวจสอบสมบัติเชิงความร้อน (thermogravimetric analyzer) เป็นเทคนิคที่ใช้วิเคราะห์เสถียรภาพทางความร้อนของวัสดุ โดยการวัดน้ำหนักของวัสดุที่เปลี่ยนแปลงอย่างต่อเนื่องด้วยเครื่องชั่งที่มีความไวสูง (thermobalance) ใช้ในการศึกษาสมบัติของตัวอย่างได้หลากหลายชนิด ทั้งตัวอย่างในกลุ่มเซรามิก พอลิเมอร์ หรือสารอินทรีย์ต่างๆ สามารถใช้วิเคราะห์หาจุดหลอมเหลว การสูญเสียน้ำหนัก หาสารเจือปนในตัวอย่าง รวมไปถึงการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงวัฏภาค (phase) ของตัวอย่างเมื่อได้รับความร้อนอีกด้วย ข้อมูลการวิเคราะห์ จะถูกบันทึกเป็นเทอร์โมแกรมที่แสดงการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของตัวอย่างและอุณหภูมิ ดังรูปที่ 2.8 เทคนิคนี้เหมาะสำหรับการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงสภาพของวัสดุที่เกี่ยวข้องกับการดูดซับแก๊ส หรือการระเหยของน้ำ การตกผลึก (crystallization) อันเนื่องมาจากการเปลี่ยนเฟส การแตกตัวของวัสดุ (decomposition) ศึกษาการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันและรีดักชัน หรือปริมาณสารสัมพันธ์ที่เป็นไป

ตามสัดส่วนผสมทางเคมี (stoichiometry) ในการวิเคราะห์จะวัดน้ำหนักของสารตัวอย่าง เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงทุกช่วงอุณหภูมิการทดลองสารตัวอย่างจะถูกวางลงบนจานขนาดเล็กซึ่งเชื่อมต่อกับเครื่องชั่งละเอียดที่มีความไวต่อการเปลี่ยนแปลงสูง โดยที่ทั้งหมดจะอยู่ในเตาที่สามารถควบคุมอุณหภูมิและบรรยากาศได้ บรรยากาศในนั้นอาจจะเป็นแก๊สเฉื่อย เช่น ไนโตรเจน หรือแก๊สที่มีความว่องไว เช่น อากาศหรือออกซิเจน โดยน้ำหนักของตัวอย่างที่เปลี่ยนแปลง จะเกิดขึ้นที่อุณหภูมิเฉพาะของสารแต่ละชนิด โดยทั่วไปการตรวจสอบวิธีนี้สามารถทดสอบได้ที่อุณหภูมิ 100 - 1300 องศาเซลเซียส



รูปที่ 2.8 แสดงเทอร์โมแกรมที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค TGA แสดงผลการวิเคราะห์การสูญเสียน้ำหนัก เมื่อสารตัวอย่างได้รับความร้อน

## 2.5 พูเรียร์แทรนสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรมิเตอร์ (Fourier Transform Infrared Spectrometer : FTIR)

(จามนิตย์, 2545; จูตินัย, 2549; จูตินัย, 2550; จามนิตย์, 2551; จูตินัย, 2551)

FTIR เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์และตรวจสอบ โครงสร้างของพันธะเคมีระหว่างอะตอมหรือไอออนของสาร โดยการวัดการดูดกลืนรังสีที่อยู่ในช่วงอินฟราเรด ที่อยู่ในช่วงเลขคลื่น (Wave number) ประมาณ 12800 - 10 ต่อเซนติเมตร ซึ่งสามารถวิเคราะห์ตัวอย่างได้ทั้ง ของแข็ง ของเหลว และก๊าซ

รังสีอินฟราเรด (Infrared radiation) เป็นรังสีคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มองไม่เห็นด้วยตาเปล่าแต่ให้ความร้อนที่สัมผัสได้ รังสีอินฟราเรดอยู่ระหว่างช่วงคลื่นแสงตามองเห็นได้กับคลื่นไมโครเวฟ โดยช่วงของรังสีอินฟราเรดแบ่งออกเป็น 3 ช่วง ได้แก่

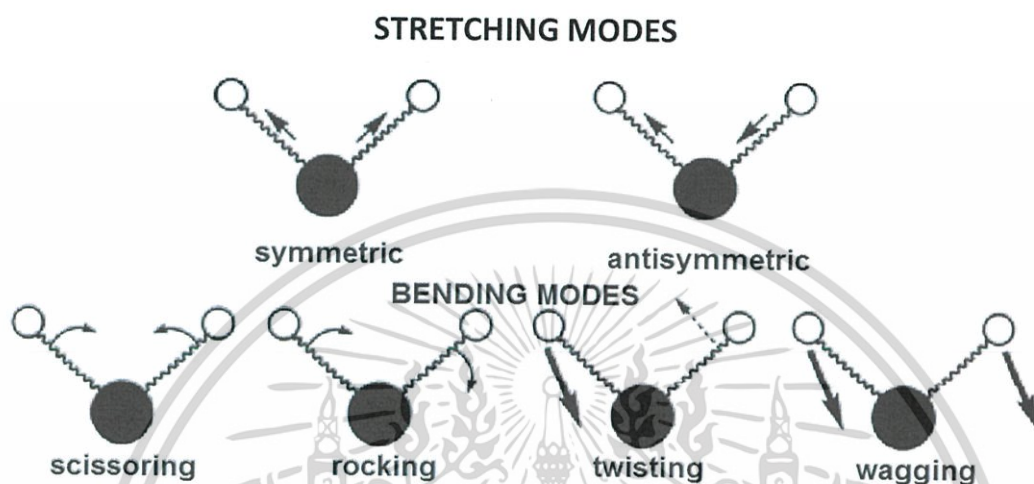
1. Near Infrared (12800-4000 ต่อเซนติเมตร)

2. Middle Infrared (4000-200 ต่อเซนติเมตร)

3. Far Infrared (200-10 ต่อเซนติเมตร)

ช่วงของรังสีอินฟราเรดที่ใช้ประโยชน์ในการวิเคราะห์ทางเคมี ได้แก่ช่วง Middle IR เนื่องจาก รังสีอินฟราเรดมีพลังงานค่อนข้างต่ำ เมื่อโมเลกุลของสารดูดกลืนรังสีอินฟราเรดเข้าไปจะทำให้พันธะ

ในโมเลกุลเกิดการสั่น และการหมุน ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของโมเลกุล การที่โมเลกุลจะดูดกลืนรังสีอินฟราเรดได้นั้น ความถี่ของรังสีอินฟราเรดต้องเท่ากับความถี่การสั่นของโมเลกุลของสารนั้นๆ ซึ่งสารอินทรีย์แต่ละชนิดจะมีค่าความถี่ของการสั่นที่จำเพาะและแตกต่างกันไปทำให้สามารถนำเทคนิคนี้มาใช้ในการวิเคราะห์โครงสร้างและชนิดของสารอินทรีย์ได้



รูปที่ 2.9 แสดงรูปแบบการสั่นของพันธะเคมีระหว่างอะตอมหรือไอออน

## 2.6 การวิเคราะห์รามานสเปกโทรสโกปี (Raman spectroscopy) (งามนิตย์, 2545; จูตินัย, 2549; จูตินัย, 2550; งามนิตย์, 2551; จูตินัย, 2551)

การวิเคราะห์รามานสเปกโทรสโกปี (Raman spectroscopy) ด้วยเครื่องรามานสเปกโตรมิเตอร์ (Raman spectrometers) เป็นการวิเคราะห์เพื่อหาหมู่ฟังก์ชัน และโครงสร้างทางเคมีของสาร สามารถวิเคราะห์ได้ทั้งเชิงคุณภาพและเชิงปริมาณ โดยอาศัยหลักการกระเจิงของแสงจากการหมุนในพันธะของชิ้นงานตัวอย่างที่ได้รับพลังงานเข้าไป โดยพลังงานของโมเลกุลที่ถูกกระตุ้นจะเกิดทั้งการสั่นและการหมุนของโมเลกุล การกระเจิงของรามานนั้นเกิดขึ้นจากการที่โมเลกุล ได้รับพลังงานเข้าไปแล้วถูกกระตุ้นให้ขึ้นไปอยู่ในระดับพลังงานที่สูงขึ้นแล้วคายพลังงานออกมาในรูปของ โฟตอน ซึ่งการคายพลังงานออกมานี้มีการเปลี่ยนแปลงไปจากระดับพลังงานเดิม การกระเจิงของ รามาน (Raman scattering) เกิดขึ้นได้โดยใช้ลำแสง โมโนโครมาติกที่มีความเข้มสูง เช่น ลำแสงเลเซอร์ (laser beam) ผ่านเข้าไปยังตัวกลางโปร่งแสง แสงส่วนใหญ่จะผ่านทะลุไปได้ แต่จะมีการกระเจิงส่วนน้อยอีก 2 ส่วน คือ ส่วนที่เกิดการชนแบบไม่ยืดหยุ่น (inelastic scattering) ซึ่งมีการเปลี่ยนแปลงความถี่ไปเล็กน้อย เรียกว่า การกระเจิงแบบรามาน (Raman scattering) นอกจากนี้ยังสามารถใช้วิเคราะห์ได้ทั้งตัวอย่างที่มีลักษณะเป็นของแข็งและของเหลว แต่ไม่สามารถทดสอบได้กับสารที่มีปริมาณในระดับ ppm ได้

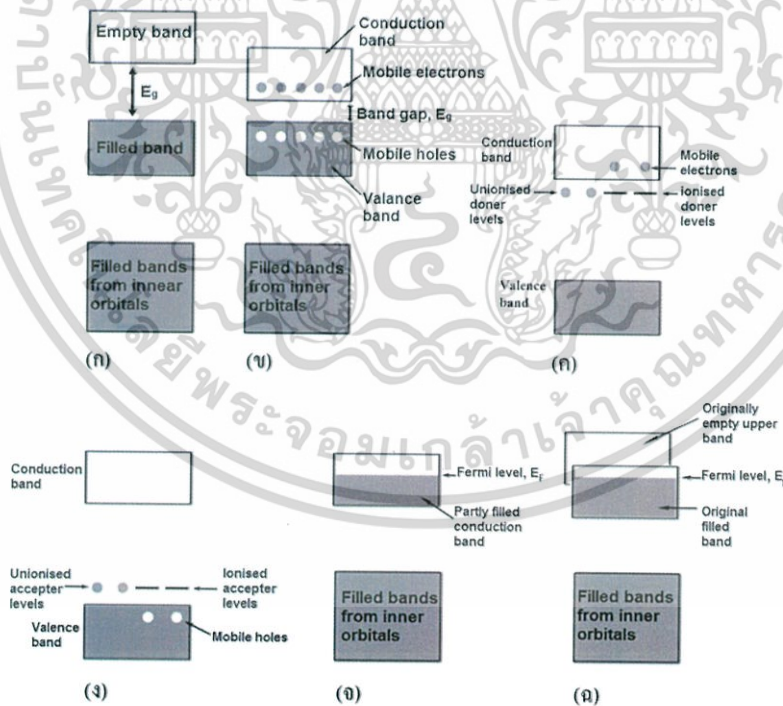
อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.7 สมบัติทางแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ (Cullity, 1956; Kittel, 1971; งามนิตย์, 2545; จูตินัย, 2549; จูตินัย, 2550; งามนิตย์, 2551; จูตินัย, 2551)

เมื่อแสงตกกระทบกับฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำพฤติกรรมทางแสงที่สังเกตได้ก็คือ การดูดกลืน การสะท้อน และการส่งผ่านของแสง จากผลของสมบัติทางแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ เราสามารถหาลักษณะโครงสร้างแถบพลังงาน (energy band) และขนาดค่าช่องว่างแถบพลังงาน (energy gap :  $E_g$ ) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำได้ โดยจะกล่าวถึงลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำ การส่งผ่านแสง และการคำนวณหาค่าช่องว่างแถบพลังงานตามลำดับ

### 2.7.1 ลักษณะโครงสร้างแถบพลังงาน (Kittel, 1971; งามนิตย์, 2545; จูตินัย, 2550)

ลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานจะประกอบไปด้วยส่วนใหญ่อะ 3 ส่วน คือ แถบนำ (conduction band) แถบวาเลนซ์ (valence band) และ แถบพลังงานต้องห้าม (forbidden band หรือ forbidden region หรือ forbidden gap :  $E_g$ ) และเรียกความกว้างของช่องว่างระหว่างแถบนำ กับแถบวาเลนซ์นั้นว่า ค่าช่องว่างแถบพลังงาน (energy gap :  $E_g$ ) โดยเราสามารถที่จะแบ่งประเภทของวัสดุว่าเป็นฉนวน (insulator) โลหะหรือตัวนำ (metal or conductor) และสารกึ่งตัวนำ (semiconductor) ได้ โดยดูจากขนาดของช่องว่างแถบพลังงานที่แตกต่างกันดังแสดงในรูปที่ 2.10

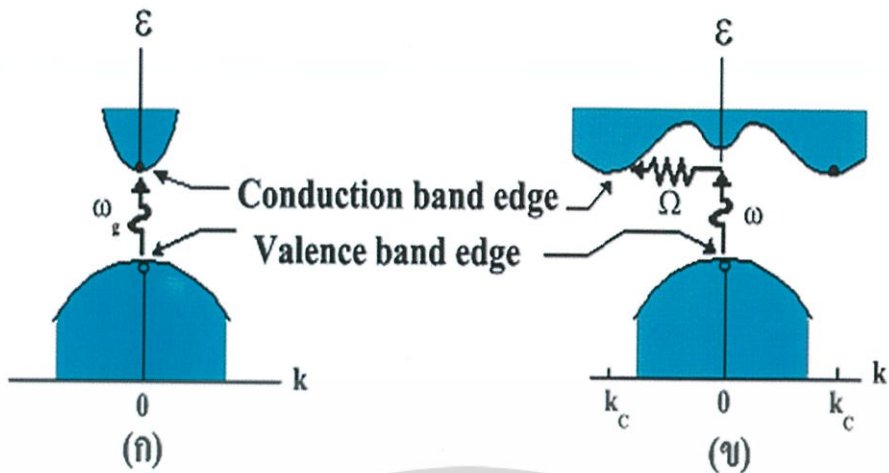


รูปที่ 2.10 แสดงลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานอย่างง่ายของ

- ก. ฉนวน
- ข. สารกึ่งตัวนำที่บริสุทธิ์
- ค. สารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น
- ง. สารกึ่งตัวนำชนิดพี
- จ. โลหะ
- ฉ. สารกึ่งโลหะ

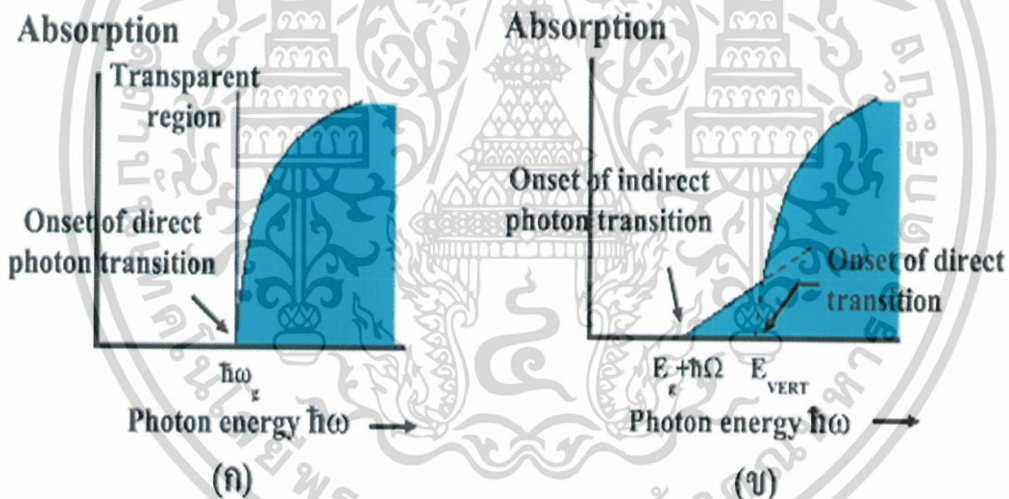
ในวัสดุที่เป็นฉนวนเมื่อดูจากแถบพลังงาน จะเห็นได้ว่าขนาดช่องว่างแถบพลังงานจากขอบล่างสุดของแถบว่าง (แถบนำ) ถึงขอบบนสุดของแถบเต็ม (แถบวาเลนซ์) มีขนาดกว้างมาก ประมาณได้ว่า  $E_g \gg kT$  หรือมากกว่า 3 อิเล็กตรอนโวลต์ ดังแสดงในรูปที่ 2.10(ก) การที่จะทำให้อิเล็กตรอนนี้นำไฟฟ้าได้ต้องใส่พลังงานที่สูงมากเพื่อที่จะทำให้อิเล็กตรอนจากแถบวาเลนซ์ขึ้นไปยังแถบนำได้ ถ้าช่องว่างแถบพลังงานระหว่างแถบนำกับแถบวาเลนซ์มีขนาดเล็กพอที่อิเล็กตรอนในแถบวาเลนซ์ เมื่อได้รับพลังงานความร้อนสามารถเคลื่อนย้ายขึ้นไปยังแถบนำ และทำให้อิเล็กตรอนนี้นำไฟฟ้าได้ เราจะเรียกลักษณะนี้ว่า สารกึ่งตัวนำที่บริสุทธิ์ (intrinsic semiconductors) ดังแสดงในรูปที่ 2.10(ข) จากรูปจะเห็นได้ว่าเมื่ออิเล็กตรอนเคลื่อนย้ายขึ้นไปอยู่ในแถบนำแล้วจะเหลือที่ว่างไว้ในแถบวาเลนซ์โดยจะมีสภาพทางไฟฟ้าเป็นบวก และจะเคลื่อนที่ไปในทิศทางตรงข้ามกับอิเล็กตรอนเมื่ออยู่ภายใต้สนามไฟฟ้า เราจะเรียกที่ว่างนี้ว่า โฮล และถ้าเราทำการเจืออะตอมของธาตุบางอย่างลงไปในสารกึ่งตัวนำที่บริสุทธิ์แล้ว อะตอมของสารเจือประพติดัวเป็นอะตอมผู้ให้ ก็จะทำให้เกิดระดับพลังงานผู้ให้โดยให้อิเล็กตรอนกับแถบนำเราจะเรียกลักษณะนี้ว่าสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น (n-type semiconductors) ดังแสดงในรูปที่ 2.10(ค) และถ้าอะตอมประพติดัวเป็นอะตอมผู้รับก็จะทำให้เกิดระดับพลังงานผู้รับ โดยทำการรับอิเล็กตรอนจากแถบวาเลนซ์ เราจะเรียกลักษณะนี้ว่าสารกึ่งตัวนำชนิดพี (p-type semiconductors) ดังแสดงในรูปที่ 2.10(ง) สำหรับแถบพลังงานของวัสดุที่เป็นโลหะหรือตัวนำ จะพบว่าไม่มีอิเล็กตรอนเข้าไปอยู่ในแถบนำแล้วบางส่วนของรูปที่ 2.10(จ) และเราบอกได้ว่าแถบวาเลนซ์กับแถบนำมีการซ้อนเหลื่อมกันอยู่ ทำให้สามารถนำไฟฟ้าได้ และในรูปที่ 2.10(ฉ) ถ้าขอบล่างของแถบว่างที่  $(n+1)$  ซ้อนเหลื่อมกับขอบสูงสุดของแถบที่มีอิเล็กตรอนบรรจุอยู่ที่  $n$  และระดับพลังงานเฟอร์มิอยู่ระหว่างแถบทั้งสอง อิเล็กตรอนก็จะสามารถไหลจากแถบเต็มไปยังด้านล่างของแถบว่างได้ เราจะเรียกลักษณะที่มีโครงสร้างแถบพลังงานแบบนี้ว่าเป็น สารกึ่งโลหะ ลักษณะของโครงสร้างแถบพลังงานแบบตรง คือ อิเล็กตรอนได้รับพลังงานโฟตอน ที่มีค่าเท่ากับขนาดของช่องว่างแถบพลังงาน  $\hbar\omega = E_g$  อิเล็กตรอนจะดูดกลืนพลังงานโฟตอนนั้นและอยู่ในสภาวะถูกกระตุ้น จึงย้ายสถานะพลังงานทรานซิชั่นจากจุดสูงสุดของแถบวาเลนซ์ไปยังจุดต่ำสุดของแถบนำ กลายเป็นอิเล็กตรอนและโฮลอิสระโดยไม่มี การสูญเสียพลังงานให้แก่โครงสร้างผลึก คือไม่มีการสร้างหรือทำลายโฟนอน ดังแสดงในรูปที่ 2.11(ก) และเมื่อเขียนกราฟระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนโฟตอนกับพลังงานโฟตอนจะได้กราฟดังแสดงในรูปที่ 2.11(ก) และลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานแบบเฉียง คือ โครงสร้างแถบพลังงานที่มีจุดต่ำสุดของแถบวาเลนซ์ไม่อยู่ที่ตำแหน่งเวกเตอร์คลื่น ค่าเดียวกันหรืออยู่ที่ตำแหน่งโมเมนตัมของคลื่นไม่เท่ากัน ดังนั้นอิเล็กตรอนจะต้องได้รับพลังงานโฟนอนที่มีค่ามากกว่าขนาดของช่องว่างแถบพลังงาน ในกรณีนี้มีกระบวนการสร้างโฟนอนเกิดขึ้น ( $\hbar\omega = E_g + \hbar\Omega$ ) เมื่อ  $\Omega$  คือ ค่าความถี่เชิงมุมของพลังงานโฟนอน ซึ่งมีค่าน้อยกว่าขนาดของช่องว่างแถบพลังงาน หรือในกรณีที่มีการทำลายล้างโฟนอน ( $\hbar\omega = E_g - \hbar\Omega$ ) นั่นคือเมื่ออิเล็กตรอนที่อยู่ในสภาวะถูกกระตุ้น การย้ายสถานะพลังงานจากจุดสูงสุดของแถบวาเลนซ์ ไปยังจุดต่ำสุดของแถบนำ จะมีการปล่อยโฟนอน (emitted phonon) ที่มีความถี่เชิงมุม  $\Omega$  มีเวกเตอร์คลื่น  $K \cong k_c$  ออกมา จึงเกิดการสร้างโฟนอน  $E_g = \hbar\Omega$  และการสร้างอิเล็กตรอนและโฮลอิสระ ( $E_{VERT}$ ) ขึ้นมาในกระบวนการนี้ ดังแสดงในรูปที่ 2.12(ก) และเมื่อเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนโฟตอนกับพลังงานโฟตอนจะได้ดังแสดงในรูปที่ 2.12(ข)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้า ไม่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าในวิธีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.11 แสดงลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานและการย้ายสถานะของพลังงานอิเล็กตรอนของสารกึ่งตัวนำที่อุณหภูมิศูนย์องศาสัมบูรณ์ ( $T = 0$  เคลวิน)

- ก. ลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานแบบตรง  
 ข. ลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานแบบเฉียง



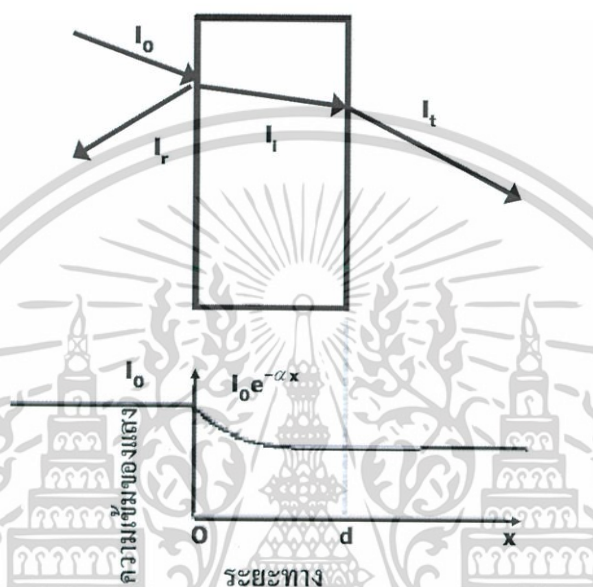
รูปที่ 2.12 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนโฟตอนกับพลังงานโฟตอนของสารกึ่งตัวนำที่อุณหภูมิศูนย์องศาสัมบูรณ์ ( $T = 0$  เคลวิน)

- ก. ลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานแบบตรง  
 ข. ลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานแบบเฉียงในกรณีที่เกิดกระบวนการสร้างโฟนอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.7.2 สัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสง (Kittel, 1971; งามนิตย์, 2545; จูตินัย, 2550)

การศึกษาวีธีวัดสเปกตรัมของค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนแสง และ สัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสงนี้ จะกล่าวถึงสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสงและองค์ประกอบของการวัดสเปกตรัมของค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสง เมื่อแสงเดินทางไปกระทบฟิล์มบางแสงบางส่วนจะสะท้อนกลับที่ผิวของฟิล์มบาง บางส่วนของแสงจะเดินทางเข้าไปในแผ่นฟิล์มบางและถูกดูดกลืน ดังแสดงในรูปที่ 2.13



รูปที่ 2.13 แสดงแผนภาพเมื่อแสงตกกระทบลงบนแผ่นฟิล์มบาง

สัมประสิทธิ์การสะท้อนของแสงมีค่าเป็น

$$R = \frac{I_r}{I_0} \quad (2.2)$$

|       |          |   |
|-------|----------|---|
| เมื่อ | $I_0$    | คือ ความเข้มแสงตกกระทบแผ่นฟิล์มบาง  |
|       | $I_r$    | คือ ความเข้มแสงสะท้อนจากฟิล์มบาง  |
|       | $I_t$    | คือ ความเข้มแสงส่งผ่านออกมาจากฟิล์มบาง                                      |
|       | $I_i$    | คือ ความเข้มแสงที่เดินทางเข้าสู่แผ่นฟิล์มบาง                                |
|       | $R$      | คือ สัมประสิทธิ์การสะท้อนแสง  |
|       | $T$      | คือ สัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสง   |
|       | $\alpha$ | คือ สัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง   |
|       | $D$      | คือ ระยะทางที่แสงเดินทางในแผ่นฟิล์มบางหรือความหนาของฟิล์มบางที่มีการนำไปใช้ |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นเพื่อใช้ในการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น

เพราะฉะนั้น ความเข้มแสงที่เดินทางเข้าสู่แผ่นฟิล์มบางมีค่า

$$I_i = I_0 = I_0 - RI_r = (1 - R)I_0 \quad (2.3)$$

เมื่อแสงนี้เดินทางเข้าสู่แผ่นฟิล์มบางจะถูกดูดกลืนทำให้ความเข้มแสงภายในแผ่นฟิล์มบางลดลงแบบเอ็กซ์โพเนนเชียลตามระยะทาง ดังนั้นความเข้มแสงที่ส่งผ่านฟิล์มบางมีค่าเป็น

$$I_t = I_i \cdot e^{-\alpha d} = (1 - R)I_0 \cdot e^{-\alpha d} \quad (2.4)$$

ถ้าไม่มีการสะท้อนแสงที่ผิวด้านหลัง สัมประสิทธิ์การส่งผ่านของแสงจะมีค่าเท่ากับ

$$T = \frac{I_t}{I_0} = (1 - R)e^{-\alpha d} \quad (2.5)$$

### 2.7.3 สัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงของสารกึ่งตัวนำ (งามนิตย์, 2543; ฐิตินัย, 2550; Kittel, 1971)

เมื่อแสงตกกระทบบสารกึ่งตัวนำ ด้วยความเข้มแสงตกกระทบบ  $I_0$  แสงบางส่วนจะส่งผ่านออกไป บางส่วนถูกดูดกลืนและส่วนที่เหลือจะสะท้อนกลับมา ดังแสดงในรูปที่ 2.13 โดย

$$T + A + R = 1 \quad (2.6)$$

เมื่อ  $T$  คือ สัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสง  
 $A$  คือ สัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง  
 $R$  คือ สัมประสิทธิ์การสะท้อนแสง

โดยที่ 
$$R = \frac{(n-1)^2 + K^2}{(n+1)^2 + K^2} \quad (2.7)$$

และค่าดัชนีหักเหของผลึก  $n_c = n - iK$

เมื่อ  $n$  คือ จำนวนจริง  
 $K$  คือ จำนวนจินตภาพ เรียกว่า สัมประสิทธิ์การสูญเสีย (extinction coefficient)

โดยทั้ง  $n$  และ  $K$  เป็นฟังก์ชันของค่าความยาวคลื่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.7.4 การหาค่าช่องว่างแถบพลังงานจากสเปกตรัมของค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสง (จามนิตย์, 2543; ฐิตินัย, 2550; Kittel, 1971)

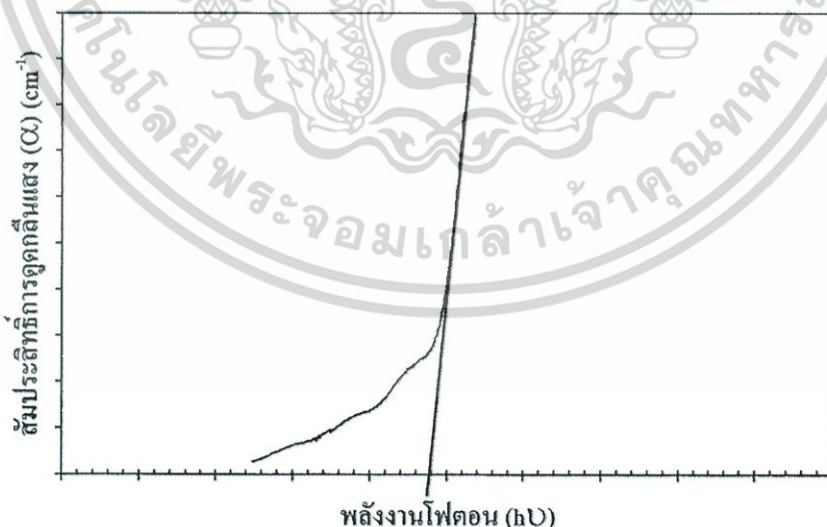
การดูดกลืนแสงในสารกึ่งตัวนำเกิดจากการที่อิเล็กตรอนได้รับพลังงานจากแสงที่มีพลังงานโฟตอนเท่ากับหรือมากกว่าค่าช่องว่างแถบพลังงาน จากนั้นจึงย้ายสถานะพลังงานจากแถบวาเลนซ์ขึ้นไปสู่แถบนำ สเปกตรัมของค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงบริเวณที่พลังงานโฟตอนมีค่าน้อย จะมีลักษณะเป็นขอบ แสดงถึงการลดลงของการดูดกลืนแสงอย่างฉับพลัน ขอบลักษณะนี้เรียกว่าขอบการดูดกลืนแสง (absorption edge) หรือขอบการดูดกลืนหลัก (fundamental edge) พลังงานโฟตอนที่ขอบการดูดกลืนแสงมีค่าเท่ากับผลต่างของค่าพลังงานที่วัดจากจุดต่ำสุดของแถบนำกับจุดสูงสุดของแถบวาเลนซ์จุดที่เส้นตรงตัดกับแกนในแนวนอน จะให้ค่าช่องว่างพลังงาน ( $E_g$ ) วิธีการนี้เป็นการกำหนดค่าช่องว่างแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำที่นิยมมากที่สุด

การหาค่าของช่องว่างพลังงาน สามารถพิจารณาได้จากค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง ( $\alpha$ ) ของสารกึ่งตัวนำ ซึ่งสัมพันธ์กับค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสง ( $T$ ) จากรูปที่ 2.14 แสดงภาพจำลองเมื่อแสงตกกระทบจากด้านซ้ายของฟิล์มบาง ( $I_0$ ) ความเข้มแสงภายในฟิล์มบางจะลดลงแบบเอ็กซ์โพเนนเชียลและมีค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสงโดยทั่วไปค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อน ( $R$ ) มีค่าน้อยมากและมีค่าคงที่ไม่ขึ้นกับความยาวคลื่นแสงที่ตกกระทบดังนั้น

$$T = e^{-\alpha d} \tag{2.8}$$

จะได้ว่า

$$\alpha = \frac{1}{d} \ln\left(\frac{1}{T}\right) \tag{2.9}$$



รูปที่ 2.14 แสดงการหาค่าช่องว่างแถบพลังงานจากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง กับ พลังงานโฟตอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ที่กล่าวมาเป็นการคำนวณหาสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงจากสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสงโดยไม่คิดถึงการสะท้อนของแสง สำหรับกรณีการคำนวณสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงเนื่องจากการย้ายสถานะพลังงานของอิเล็กตรอน ในกรณีที่อิเล็กตรอนย้ายสถานะพลังงานจากจุดสูงสุดของแถบวาเลนซ์ไปยังจุดต่ำสุดของแถบนำที่เวกเตอร์คลื่นค่าเดียวกัน เรียกการย้ายสถานะพลังงานแบบนี้ว่า การย้ายสถานะพลังงานแบบตรง และการย้ายสถานะพลังงานแบบตรงนี้ยังแบ่งได้อีกสองชนิด คือการย้ายสถานะพลังงานชนิดยินยอม และชนิดต้องห้าม โดยทั้งสองชนิดนี้ขึ้นกับค่าสมาชิกเมทริกซ์เชิงแสง (optical matrix element) ในการประมาณครั้งที่หนึ่งว่าเป็นศูนย์หรือไม่ คือ ถ้าเป็นศูนย์จะเป็นการย้ายสถานะพลังงานชนิดต้องห้าม และถ้าไม่เป็นศูนย์จะเป็นการย้ายสถานะพลังงานชนิดยินยอม เมื่อพิจารณาการย้ายสถานะพลังงานของอิเล็กตรอนในบริเวณตำแหน่งจุดสูงสุดของแถบวาเลนซ์ไปยังจุดต่ำสุดของแถบนำ แสดงเป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงกับค่าช่องว่างพลังงานซึ่งมีลักษณะเป็นพาราโบลา ช่องว่างแถบพลังงานของแผ่นฟิล์มบางประมาณได้ โดยการคำนวณสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง ซึ่งจะถูกดูดกลืนเมื่อแสงที่ตกกระทบบนแผ่นฟิล์มบางมีค่าพลังงานโฟตอนสูงกว่าค่าช่องว่างพลังงานต้องห้าม ที่ขอบการดูดกลืนค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืน

สำหรับสารกึ่งตัวนำที่มีการย้ายสถานะพลังงานชนิดยินยอมแบบตรง

$$(\alpha hv) = A(hv - E_g)^{1/2} \quad (2.10)$$

สำหรับสารกึ่งตัวนำที่มีการย้ายสถานะพลังงานชนิดยินยอมแบบเฉียง

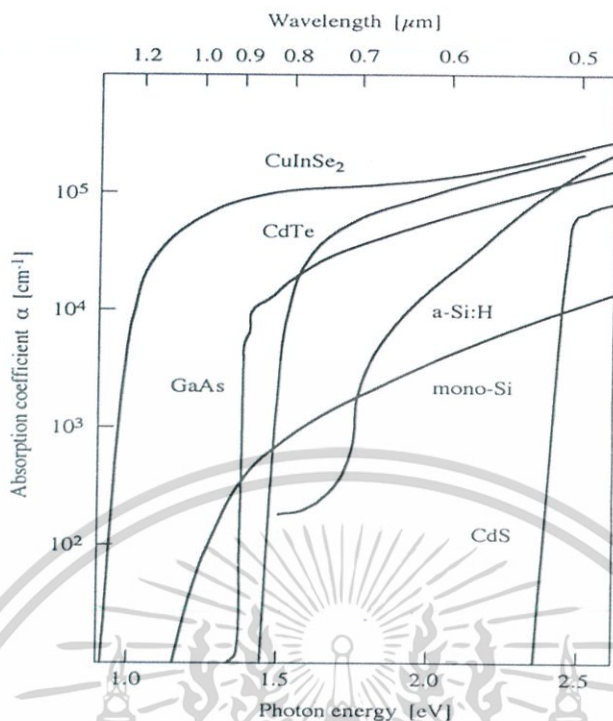
$$(\alpha hv) = B(hv - E_g)^2 \quad (2.11)$$

และสำหรับสารกึ่งตัวนำที่มีการย้ายสถานะพลังงานชนิดต้องห้าม

$$(\alpha hv) = C(hv - E_g)^3 \quad (2.12)$$

|       |           |                               |
|-------|-----------|-------------------------------|
| เมื่อ | $\alpha$  | คือ สัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง |
|       | $hv$      | คือ พลังงานโฟตอน              |
|       | $A, B, C$ | คือ ค่าคงตัว                  |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.15 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง และ ค่าพลังงานโฟตอน หรือค่าความยาวคลื่นของพลังงานโฟตอนของสารกึ่งตัวนำ

## 2.8 สมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์มบาง (Cullity, 1956; Kittel, 1971; งามนิตย์, 2545; จูตินัย, 2549; จูตินัย, 2550; งามนิตย์, 2551; จูตินัย, 2551)

จากทฤษฎีแถบพลังงานนั้นสารกึ่งตัวนำที่มีขนาดช่องว่างแถบพลังงานใหญ่เกินกว่า 2 อิเล็กตรอนโวลต์ พลังงานความร้อนที่อุณหภูมิห้องไม่เพียงพอที่จะกระตุ้นให้เกิดพาหะอิสระได้ ดังนั้นพาหะอิสระของสารกึ่งตัวนำประเภทนี้จึงน้อย ส่วนใหญ่มาจากระดับพลังงานที่ปรากฏในช่องว่างแถบพลังงาน ซึ่งจะเป็นทั้งระดับพลังงานผู้ให้และระดับพลังงานผู้รับหรือศูนย์กลางการรวมตัว (recombination center) ดังนั้นสภาพนำไฟฟ้าที่อุณหภูมิใดๆของสารกึ่งตัวนำ จึงขึ้นกับความหนาแน่นของพาหะอิสระเหล่านี้

## 2.9 สภาพนำไฟฟ้า (Cullity, 1956; Kittel, 1971; งามนิตย์, 2545; จูตินัย, 2549; จูตินัย, 2550; งามนิตย์, 2551; จูตินัย, 2551)

เมื่อใส่สนามไฟฟ้าเข้าไปในสารกึ่งตัวนำ อิเล็กตรอนที่อยู่ในแถบนำจะตอบสนองต่อสนามไฟฟ้าเกิดการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนกลายเป็นกระแสไฟฟ้า จากกฎของโอห์ม (Ohm's law) สภาพนำไฟฟ้า (electrical conductivity :  $\sigma$ ) คืออัตราส่วนของความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า (current density :  $J$ ) ต่อสนามไฟฟ้า (electric field :  $E$ ) ที่ใส่เข้าไปดังสมการที่ 2.13

$$J = \sigma E = e(\mu_n n + \mu_p p)E \quad (2.13)$$

เมื่อ  $\mu_n, \mu_p$  คือ สภาพคล่องของอิเล็กตรอนและโฮล ตามลำดับ  
 $n$  คือ ความหนาแน่นของอิเล็กตรอน  
 $p$  คือ ความหนาแน่นของโฮล

ส่วนกลับของค่าสภาพนำไฟฟ้า เรียกว่า ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้า (resistivity:  $\rho$ ) ซึ่งสามารถเขียนได้เป็น

$$\rho = \frac{1}{\sigma} = \frac{1}{e(\mu_n n + \mu_p p)} \quad (2.14)$$

ถ้ามีก้อนเนื้อสารกึ่งตัวนำซึ่งให้แรงดันไฟฟ้า  $V$  และเกิดกระแสไฟฟ้า  $I$  แล้วจะได้ว่า

$$j = \frac{I}{A} \quad \text{และ} \quad E = \frac{V}{L}$$

สามารถเขียนสมการข้างต้นใหม่ได้เป็น

$$\frac{I}{A} = \sigma \left( \frac{V}{L} \right) \quad (2.15)$$

หรือ

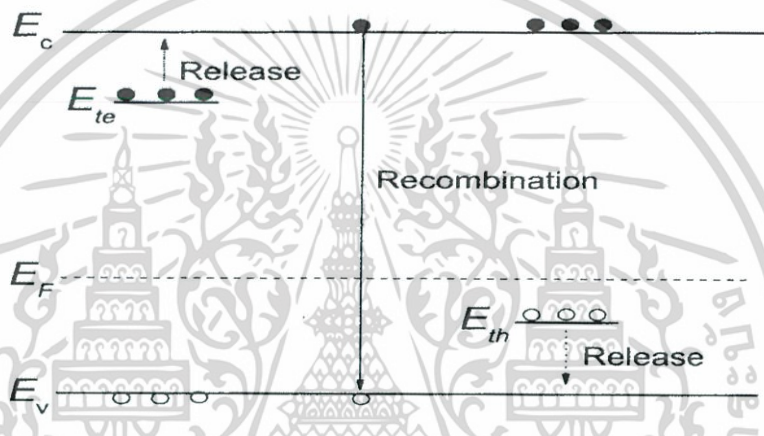
$$V = \left( \frac{L}{\sigma A} \right) I = \left( \frac{\rho L}{A} \right) I = IR \quad (2.16)$$

สมการข้างต้น คือ กฎของโอห์มสำหรับสารกึ่งตัวนำ ค่าความต้านทานไฟฟ้าเป็นฟังก์ชันกับค่าสภาพความต้านทานไฟฟ้าหรือค่าสภาพนำไฟฟ้า และขึ้นกับมิติรูปทรงเรขาคณิตของสารกึ่งตัวนำ

### 2.9.1 สภาพนำไฟฟ้าเชิงแสง (งามนิตย์, 2556; ฐิตินัย, 2556)

ในสารกึ่งตัวนำมักมีข้อบกพร่องผลึกเสมอ ข้อบกพร่องผลึกมีหลายชนิด ข้อบกพร่องผลึกบางชนิดมีคุณสมบัติในการจับอิเล็กตรอนหรือโฮลอิสระได้ จึงมักเรียกว่ากับดักพาหะ กับดักพาหะชนิดต่างๆ จะปรากฏเป็นระดับพลังงานในช่องว่างแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำ โดยในรูปที่ 2.16 มีทั้งระดับพลังงานของกับดักพาหะชนิดจับโฮล ( $E_{hh}$ ) และกับดักพาหะชนิดจับอิเล็กตรอน ( $E_{ve}$ ) (Jiang, 2012) คำว่ากระบวนการปลดปล่อยของพาหะ (release) เป็นกลไกที่กับดักพาหะปล่อยอิเล็กตรอนให้กับแถบนำ และเป็นกับดักพาหะชนิดปล่อยโฮลให้กับแถบวาเลนซ์ ส่วนคำว่ากระบวนการรวมตัวของพาหะ (recombination) เป็นกลไกที่อิเล็กตรอนในแถบนำทรานซิชั่นลงมารวมตัวกับโฮล ในแถบวาเลนซ์โดยไม่ผ่านกับดักพาหะ ขณะที่สารกึ่งตัวนำยังไม่มีการฉายแสงกับดักพาหะ จะมีการจับอิเล็กตรอนหรือจับโฮล อยู่ก่อนแล้ว ส่วนอิเล็กตรอนอิสระในแถบนำและโฮลในแถบวาเลนซ์มีปริมาณน้อย สารกึ่งตัวนำจึงนำกระแสไฟฟ้าได้ไม่ดี

กระแสมืด (dark current) จึงมีค่าน้อย แต่เมื่อมีการฉายแสงลงบนสารกึ่งตัวนำจะเกิดกระบวนการสร้างอิเล็กตรอนและโฮลอิสระขึ้นในแถบนำและแถบวาเลนซ์ตามลำดับ เนื่องจากการดูดกลืนโฟตอนที่มีพลังงานสูงเพียงพอ เมื่อไบแอสด้วยแรงดันไฟฟ้าให้กับสารกึ่งตัวนำ กระแสโฟตอนจะมีปริมาณเพิ่มขึ้นแต่เมื่อหยุดฉายแสงหรือหยุดการกระตุ้นด้วยแสง กระแสไฟฟ้าควรลดลงสู่ค่ากระแสมืดเหมือนในกรณีที่ไม่มีการฉายแสง แต่บางครั้งพบว่า กับดักพาหะที่จับอิเล็กตรอนหรือจับโฮล มีพฤติกรรมไม่ปล่อยอิเล็กตรอนหรือโฮลออกมาทันทีอย่างปกติธรรมดา นั่นคือยังมีประจุค้างอยู่ในกับดักพาหะ ดังนั้นอิเล็กตรอนอิสระในแถบนำหรือโฮลในแถบวาเลนซ์ จึงยังคงปรากฏอยู่มาก เพื่อทำหน้าที่ในการรักษาความเป็นกลางทางไฟฟ้า โดยปกติกลไกกระบวนการปลดปล่อยของพาหะ จะใช้เวลานานกว่ากลไกกระบวนการรวมตัวของพาหะ แต่เนื่องจากกับดักพาหะมีการปล่อยอิเล็กตรอนหรือโฮลออกมาช้ามาก ส่งผลให้กลไกกระบวนการรวมตัวของพาหะ ใช้เวลายังนานขึ้นไปอีก จึงเป็นที่มาของสภาพนำไฟฟ้าเชิงแสงดื้อรั้น (persistent photoconductivity)



รูปที่ 2.16 แสดงระดับพลังงานของกับดักพาหะชนิดจับอิเล็กตรอน ( $E_{te}$ ) และกับดักพาหะชนิดจับโฮล ( $E_{th}$ ) ที่ปรากฏในช่องว่างแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำ จุดทึบและจุดโปร่งจะแสดงแทนอิเล็กตรอนและโฮล ตามลำดับ

กำหนดให้ชั้นสารมีความกว้าง  $w$  ความหนา  $d$  และ ยาว  $l$  ให้กระแสไฟฟ้า  $I$  ไหลผ่านพื้นที่หน้าตัด  $wd$  ค่ากระแสไฟฟ้า  $I$  จะเป็นดังสมการ

$$I = envA \tag{2.17}$$

และจากความสัมพันธ์  $\mu = v/\zeta$  และ  $\zeta = V_a/l$  ดังนั้นจะได้ว่า

$$v = \frac{\mu V_a}{l} \tag{2.18}$$

แทนสมการที่ (2.17) ลงใน (2.18) จะได้  $I = en\mu V_a \left(\frac{wd}{l}\right)$  ซึ่งงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$I = en\mu V_a \left(\frac{wd}{l}\right) \tag{2.19}$$

แต่เนื่องจากค่าความหนาแน่นของพาหะอิสระ ( $n$ ) เกิดมาจากกับดักพาหะ ดังนั้นความหนาแน่นของพาหะอิสระ ( $n$ ) ที่สัมพันธ์กับกับดักพาหะชนิดที่  $i$  ที่เปลี่ยนแปลงตามเวลา จะแสดงได้ดังนี้คือ (Studenikin, 1998)

$$n = N_{ii} \exp\left(\frac{-t}{\tau_i}\right) \quad (2.20)$$

แทนสมการที่ (2.20) ลงใน (2.19) จะได้ว่า กระแสไฟฟ้า  $I_i$  ที่เกิดจากกับดักพาหะชนิด  $i$  คือ

$$I_i = e\mu N_{ii} V_a \left(\frac{wd}{l}\right) \exp\left(\frac{-t}{\tau_i}\right) \quad (2.21)$$

กระแสไฟฟ้าทั้งหมด ( $I$ ) ที่สัมพันธ์กับกับดักพาหะทุกชนิดจะเป็นดังนี้คือ

$$I = e\mu \left(\frac{wd}{l}\right) V_a \sum_i \left( N_{ii} \exp\left(\frac{-t}{\tau_i}\right) \right) \quad (2.22)$$

เมื่อ  $N_{ii}$  คือ ความหนาแน่นของกับดักพาหะต่อปริมาตรชนิดที่  $i$

ซึ่งสามารถหาได้จากความสัมพันธ์

$$N_{ii} = \frac{I}{e\mu V_a} \left(\frac{l}{wd}\right) \exp\left(\frac{t}{\tau_i}\right) \quad (2.23)$$

สำหรับกรณีฟิล์มบาง จะประมาณว่า ความหนา  $d$  มีค่าน้อยมาก ดังนั้น จากสมการที่ (2.23) จะเขียนใหม่ได้ว่า (Gu, 2005; Huang, 2011)

$$I = e\mu \left(\frac{w}{l}\right) (nd) V_a \quad (2.24)$$

$$I = e\mu \left(\frac{w}{l}\right) \sigma_i V_{av}$$

เมื่อ  $\sigma_i$  คือ ค่าความหนาแน่นของกับดักพาหะต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แต่ถ้ากับดักพาหะมีหลายชนิด กระแสรวม ( $I$ ) ของฟิล์มบางที่สัมพันธ์กับกับดักพาหะทุกชนิด จะเป็นดังนี้ คือ

$$I = e\mu\left(\frac{w}{l}\right)V_a\sum_i\left(\sigma_{ii}\exp\left(\frac{-t}{\tau_i}\right)\right) \quad (2.25)$$

เมื่อ  $\sigma_{ii}$  คือ ค่าความหนาแน่นของกับดักพาหะต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ชนิดที่  $i$

ซึ่งสามารถหาได้จากความสัมพันธ์

$$\sigma_{ii} = \frac{I}{e\mu V_a} \left(\frac{l}{w}\right) \exp\left(\frac{t}{\tau_i}\right) \quad (2.26)$$

โดยที่

|               |  |
|---------------|--|
| $V_a$         | คือ แรงดันไบแอสที่ป้อนให้กับสารตัวอย่างที่ใช้ในการทดลองมีหน่วยเป็นโวลต์      |
| $\mu$         | คือ สภาพคล่องของพาหะมีหน่วยเป็น ตารางเซนติเมตรต่อ (โวลต์-วินาที)             |
| $w$           | คือ ความกว้างของสารตัวอย่างที่ใช้ในการทดลองมีหน่วยเป็น เซนติเมตร             |
| $l$           | คือ ความยาวของสารตัวอย่างที่ใช้ในการทดลองมีหน่วยเป็น เซนติเมตร               |
| $d$           | คือ ความหนาของสารตัวอย่างที่ใช้ในการทดลองมีหน่วยเป็น เซนติเมตร               |
| $I$           | คือ กระแสที่วัดได้จากการทดลองที่เวลา $t$ ใดๆ                                 |
| $\tau$        | คือ ช่วงชีวิตขาลง (decay time)   |
| $N_{ii}$      | คือ ความหนาแน่นของกับดักพาหะในชั้นสารตัวอย่างมีหน่วยเป็นต่อลูกบาศก์เซนติเมตร |
| $\sigma_{ii}$ | คือ ความหนาแน่นของกับดักพาหะในฟิล์มบางมีหน่วยเป็นต่อตารางเซนติเมตร           |

ช่วงชีวิตขาลงจะมีค่าสั้นลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น เนื่องจากมีโฟนอนเข้ามาร่วมด้วยในกระบวนการทรานซิชันระหว่างระดับพลังงานต่างๆ ดังความสัมพันธ์ (Studenikin, 1998; Johnson, 1996)

$$\tau_r = \tau_{ro} \exp\left(\frac{E_t}{kT}\right) \quad (2.27)$$

$$\begin{aligned} \ln \tau_r &= \ln \tau_{ro} + \left(\frac{E_t}{k}\right)\left(\frac{1}{T}\right) \\ &= \ln \tau_{ro} + \frac{E_t}{(1000k)}\left(\frac{1000}{T}\right) \end{aligned}$$

เมื่อ  $\text{ความชัน} = \frac{E_t}{(1000)k}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้น

$$E_i = \frac{(1000)k(\text{ความชัน})}{q}$$

$$= (0.086)(\text{ความชัน})\text{อิเล็กตรอนโวลต์} \quad (2.28)$$

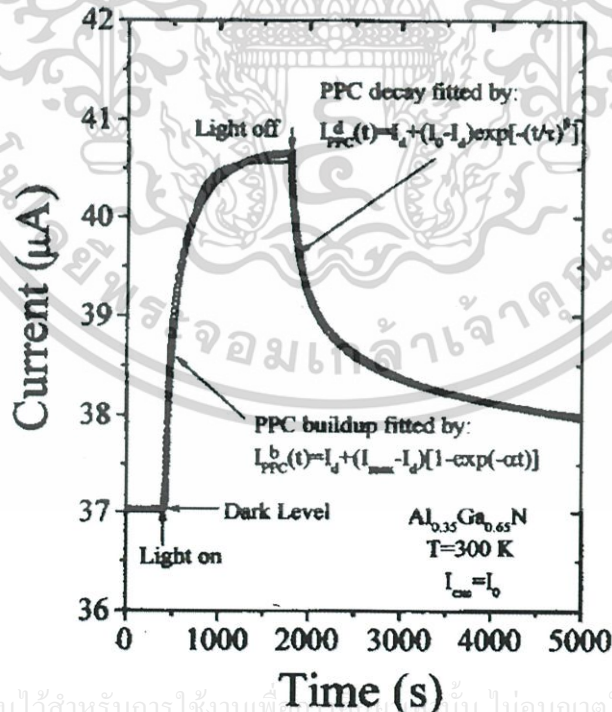
ในการศึกษาสภาพนำไฟฟ้าเชิงแสงจะต้องมีการฉายแสงให้กับสารตัวอย่าง จะได้ว่ากระแสโฟโต ( $I_p$ ) จะมีค่าเพิ่มขึ้นตามเวลา ( $t$ ) ดังรูปที่ 2.17 ซึ่งจะเรียกว่าเป็นกระแสโฟโตขาขึ้น (rise current) ดังความสัมพันธ์ (Ghosh, 2007)

$$I_p = I_o \left[ 1 - \exp\left(\frac{-t}{\tau_r}\right) \right] \quad (2.29)$$

เมื่อ  $I_o$  คือ ค่ากระแสโฟโตเริ่มต้นของกระแสขาขึ้น

(เมื่อ  $t = 0$ ) หลังจากหยุดการฉายแสง กระแสโฟโตจะลดลงตามเวลา ( $t$ ) ซึ่งจะเรียกว่าเป็นกระแสโฟโตขาลง (decay current) จะแสดงถึงความสัมพันธ์ (Ghosh, 2007)

$$I_p = I_o \exp\left(\frac{-t}{\tau_d}\right) \quad (2.30)$$

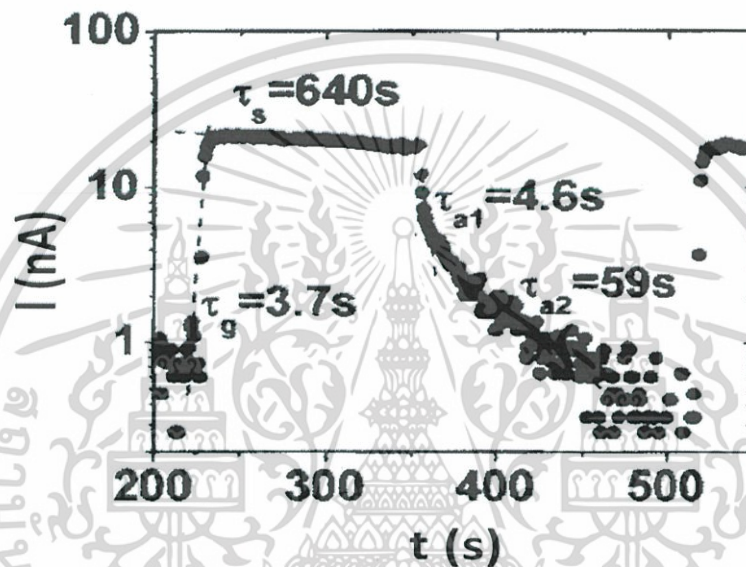


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่าจะในรูปแบบใดก็ตาม อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้  
 รูปที่ 2.17 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่ากระแสโฟโตขาขึ้นและค่ากระแสโฟโตขาลงของสภาพ  
 นำไฟฟ้าเชิงแสง

จากสมการที่ (2.29) ถึงสมการที่ (2.30) สามารถเขียนใหม่ได้ว่า

$$\ln I_p = \ln I_o - \frac{t}{\tau_d} \quad (2.31)$$

ค่าความชันของกราฟคือ  $\frac{1}{\tau_d}$  ดังนั้น ช่วงชีวิตขาลงจะคำนวณได้จากส่วนกลับของความชันของกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า  $\ln I_p$  กับ  $t$  ในทำนองเดียวกันช่วงชีวิตขาขึ้นก็สามารถที่จะคำนวณได้จากค่าความชันของกราฟ  $\ln I_p$  กับ  $t$  แสดงดังรูปที่ 2.18 ได้ด้วยเช่นเดียวกัน



รูปที่ 2.18 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า  $\ln I_p$  กับ  $t$  ของสภาพนำไฟฟ้าเชิงแสงทั้งช่วงกระแสโฟโตขาขึ้นและช่วงกระแสโฟโตขาลง

ในทางปฏิบัติช่วงชีวิตไม่ได้หลายค่า เนื่องจากกับดักพาหะมีหลายชนิด ดังนั้นกระแสโฟโตขาลงของฟิล์มบางที่ใช้หาค่าช่วงชีวิต 2 ค่า สามารถที่จะเขียนใหม่ได้โดยอาศัยสมการที่ (2.24) และสมการที่ (2.25) ดังนี้ คือ (Huang, 2011; Gu, 2005)

$$|I_p| = e\mu \left( \frac{w}{l} \right) V_a \sigma_{n1} \exp\left( \frac{-t}{\tau_{d1}} \right) + e\mu \left( \frac{w}{l} \right) V_a \sigma_{n2} \exp\left( \frac{-t}{\tau_{d2}} \right) \quad (2.32)$$

เพื่อให้  $\tau_{d1}$  และ  $\tau_{d2}$  มีค่าถูกต้องมากขึ้น อาจดัดแปลงสมการที่ (2.32) ให้อยู่ในรูปของฟังก์ชันสเตรตเอ็กซ์โพเนนเชียล (stretched exponential function) ดังนี้คือ (Ghaffarzadeh, 2010; Luo, 2013; Guo, 2013)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

$$|I_p| = e\mu \left( \frac{w}{l} \right) V_a \sigma_{n1} \exp\left( \frac{-t}{\tau_{d1}} \right) + e\mu \left( \frac{w}{l} \right) V_a \sigma_{n2} \exp\left[ -\left( \frac{t}{\tau_{d2}} \right)^\beta \right] \quad (2.33)$$

ไม่ว่ากรณีใด

จากสมการที่ (2.33) สามารถที่จะหาค่า  $\sigma_{t1}$  และ  $\sigma_{t2}$  ได้ในรูปแบบเดียวกับสมการที่ (2.34) ดังนี้คือ

$$\sigma_{t1} = \frac{I_1}{e\mu V_a} \left( \frac{l}{w} \right) \exp\left( \frac{t}{\tau_{d1}} \right) \quad (2.34)$$

$$\sigma_{t2} = \frac{I_2}{e\mu V_a} \left( \frac{l}{w} \right) \exp\left( \frac{t}{\tau_{d2}} \right) \quad (2.35)$$

กับดักพาหะทั้งสองชนิดนี้สามารถที่จะจับหรือปล่อยพาหะอิสระได้อย่างซึ่งกันและกัน ถ้ากำหนดให้  $I_1$  และ  $I_2$  คือกระแสค่าเริ่มต้น ( $t = 0$ ) ที่เกี่ยวกับกับดักพาหะทั้งสองตามลำดับ เราจะได้ว่า

$$\sigma_{t1} = \frac{I_1}{e\mu V_a} \left( \frac{l}{w} \right)$$

และ

$$\sigma_{t2} = \frac{I_2}{e\mu V_a} \left( \frac{l}{w} \right)$$

สมการที่ (2.33) สามารถที่จะทำนอร์มัลไลเซชัน (normalization) ได้ดังนี้ คือ

$$|I_p| = A_1 \exp\left( \frac{-t}{\tau_{d1}} \right) + A_2 \exp\left[ -\left( \frac{t}{\tau_{d1}} \right)^\beta \right] \quad (2.36)$$

เมื่อ  $A_1$  และ  $A_2$  คือ ค่าแฟกเตอร์ถ่วงน้ำหนัก (weighting factor) โดยที่  $A_1 + A_2 = 1$  (Lin, 2013; Lin, 2012; Ren, 2012) ซึ่งค่า  $A_1$  และ  $A_2$  สามารถหาได้จากการฟิตกราฟ (fit graph) ของผลการทดลองและ  $\beta$  มีค่าอยู่ระหว่าง 0 ถึง 1

ในกรณีกระแสไฟโตขาขึ้น (rise current) ก็สามารถที่จะพิจารณาให้อยู่ในรูปของฟังก์ชันสเตรตเอ็กซีโพเนนเชียลได้ด้วยเช่นกัน ดังสมการ

$$|I_p| = A'_1 \left[ 1 - \exp\left( \frac{-t}{\tau_{r1}} \right) \right] + A'_2 \left[ 1 - \exp\left[ -\left( \frac{t}{\tau_{r1}} \right)^\beta \right] \right] \quad (2.37)$$

ส่วนกรณีของขึ้นสาร เช่น เม็ดเซรามิก กระแสไฟโตขณะขาลงสามารถจะเขียนใหม่โดยอาศัยสมการที่ (2.19) และ (2.37) ได้ดังนี้คือ

$$|I_p| = e\mu \left( \frac{wd}{l} \right) V_a N_{t1} \exp\left( \frac{-t}{\tau_{d1}} \right) + e\mu \left( \frac{wd}{l} \right) V_a N_{t2} \exp\left[ -\left( \frac{t}{\tau_{d2}} \right)^\beta \right] \quad (2.38)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการที่ (2.38) สามารถที่จะหาค่า

$$N_{11} = \frac{I_1}{e\mu V_a} \left( \frac{l}{wd} \right) \exp\left( \frac{t}{\tau_{d1}} \right) \quad (2.39)$$

$$N_{12} = \frac{I_2}{e\mu V_a} \left( \frac{l}{wd} \right) \exp\left( \frac{t}{\tau_{d2}} \right) \quad (2.40)$$

กับดักพาหะทั้งสองชนิดนี้สามารถที่จะจับหรือปล่อยพาหะอิสระได้อย่างเป็นอิสระซึ่งกันและกัน ถ้ากำหนดให้  $I_1$  และ  $I_2$  คือกระแสเริ่มต้น ( $t = 0$ ) ที่เกี่ยวกับกับดักพาหะทั้งสองตามลำดับ เราจะได้ว่า

$$N_{11} = \frac{I_1}{e\mu V_a} \left( \frac{l}{wd} \right)$$

$$N_{12} = \frac{I_2}{e\mu V_a} \left( \frac{l}{wd} \right)$$

สมการที่ (2.37) สามารถที่จะทำนอร์มัลไลเซชัน (normalization) ได้ดังนี้คือ

$$|I_p| = A_1'' \exp\left( \frac{-t}{\tau_{d1}} \right) + A_2'' \exp\left[ -\left( \frac{t}{\tau_{d2}} \right)^\beta \right] \quad (2.41)$$

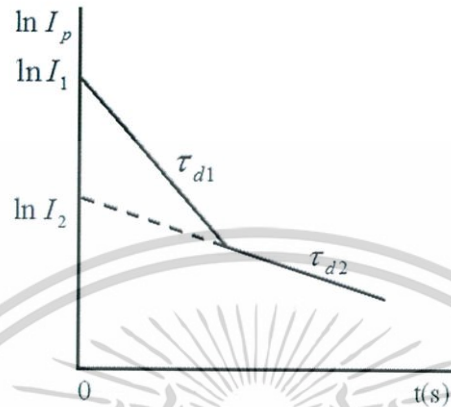
ซึ่ง  $A_1''$  และ  $A_2''$  สามารถหาได้จากการพิตรกราฟของผลการทดลอง ในกรณีกระแสโฟโตชาขึ้น ก็สามารถที่จะพิจารณาให้อยู่ในรูปของฟังก์ชันสเตรตเอ็กซ์โพเนนเชียลได้ด้วยเช่นกันดังสมการ

$$|I_p| = A_1''' \exp\left[ 1 - \exp\left( \frac{-t}{\tau_{d1}} \right) \right] + A_2''' \exp\left[ 1 - \exp\left( -\left( \frac{t}{\tau_{d2}} \right)^\beta \right) \right] \quad (2.42)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.9.2 วิธีการหาค่าความหนาแน่นของก๊าดักพาหะในช่วงกระแสโตะตาลง

การหาค่าความหนาแน่นของก๊าดักพาหะในช่วงกระแสโตะตาลงจะอาศัยกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า  $\ln I_p$  กับ  $t$  ดังรูปที่ 2.19



รูปที่ 2.19 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า  $\ln I_p$  กับ  $t$  เพื่อใช้คำนวณหาความหนาแน่นของก๊าดักพาหะในช่วงกระแสโตะตาลง

ค่า  $\tau_{d1}$  หาได้จากค่าความชันของกราฟ

$$\ln I_p = \frac{-t}{\tau_{d1}} + \ln I_1 \quad (2.43)$$

เราสามารถหาค่า  $I_1$  ได้จากจุดตัดแกน  $y$  (คือ  $\ln I_1$ ) และสามารถคำนวณหาความหนาแน่นของก๊าดักพาหะของฟิล์มบางได้ดังนี้ คือ

$$\sigma_{n1} = \frac{I_1}{e\mu V_a} \left( \frac{l}{w} \right) \quad (2.44)$$

บางครั้งมีการเลือกใช้กราฟ  $\log I_p$  แทน  $\ln I_p$  โดยที่  $\ln I_p = 2.3 \log I_p$

ในทำนองเดียวกัน  $\tau_{d2}$  สามารถหาได้จากความชันของกราฟ

$$\ln I_p = \frac{-t}{\tau_{d2}} + \ln I_2 \quad (2.45)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เราสามารถหาค่า  $I_2$  ได้จากจุดตัดแกน  $y$  (คือ  $\ln I_2$ ) และสามารถคำนวณหาค่าความหนาแน่นของกับดักพาหะได้ดังนี้คือ

$$\sigma_{r2} = \frac{I_2}{e\mu V_a} \left( \frac{l}{w} \right) \quad (2.46)$$

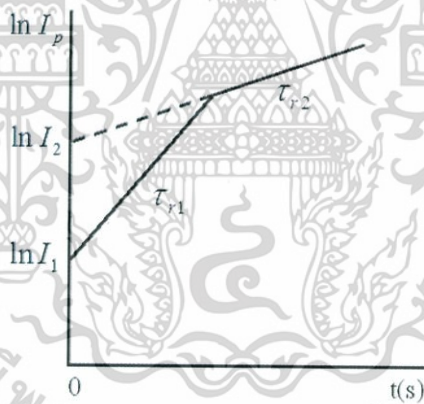
สำหรับกรณีของความหนาแน่นของชั้นสารเช่นในเม็ดเซรามิก ก็สามารถใช้สูตร

$$N_{r1} = \frac{I_1}{e\mu V_a} \left( \frac{l}{wd} \right) \quad (2.47)$$

$$N_{r2} = \frac{I_2}{e\mu V_a} \left( \frac{l}{wd} \right) \quad (2.48)$$

### 2.9.3 วิธีการหาค่าความหนาแน่นของกับดักพาหะในช่วงกระแสโฟโตชาขึ้น

การหาค่าความหนาแน่นของกับดักพาหะในช่วงกระแสโฟโตชาขึ้น โดยอาศัยกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า  $\ln I_p$  กับ  $t$  ดังรูปที่ 2.33



รูปที่ 2.20 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า  $\ln I_p$  กับ  $t$  เพื่อใช้คำนวณหาความหนาแน่นของกับดักพาหะในช่วงกระแสโฟโตชาขึ้น

กระแสโฟโตชาขึ้นอาจแสดงได้ดังสมการง่ายๆ ดังนี้คือ

$$I = I_{\max} \left[ 1 - \exp\left(\frac{-t}{\tau}\right) \right] \quad (2.49)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเอกสารนี้ด้วยวิธีใดๆถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$1 - \frac{I}{I_{\max}} = \exp\left(\frac{-t}{\tau_r}\right)$$

$$\ln\left[1 - \frac{I}{I_{\max}}\right] = \frac{-t}{\tau_r} \quad (2.50)$$

จากสูตร 
$$\ln(1-x) = -x - \frac{x^2}{2} - \frac{x^3}{3} - \frac{x^4}{4} + \dots$$

ถ้า  $\frac{I}{I_{\max}} \ll 1$  สมการที่ (2.50) จะประมาณได้ว่าเป็น

$$\frac{I}{I_{\max}} = \frac{t}{\tau_r} \quad (2.51)$$

ข้อสังเกตคือสมการที่ (2.51) จะใช้ได้จริงเมื่อ  $\frac{I}{I_{\max}} \ll 1$  ก็คือช่วงแรกๆ ของกราฟกระแสโพลิตาขึ้น ส่วนช่วงท้ายๆ ของกราฟความถูกต้องจะลดลง การคำนวณหาค่าความหนาแน่นของกัปดักพาหะทั้งชนิดฟิล์มบางและเม็ดเซรามิกจะใช้สมการที่ (2.44), (2.46), (2.47) และ (2.48) ได้เช่นเดียวกับกระแสขาลง

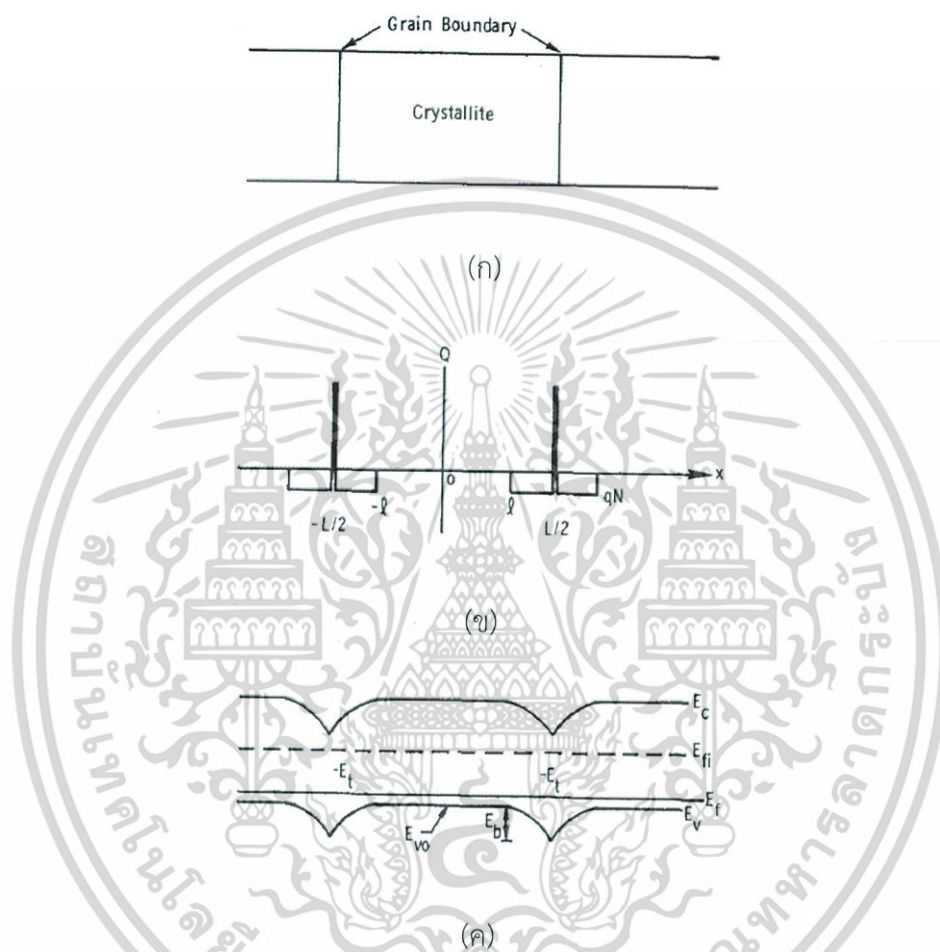
**2.10 กลไกการนำไฟฟ้ากระแสตรงในฟิล์มบางที่อุณหภูมิต่างๆ** (Cullity, 1956; Kittel, 1971; งามนิตย์, 2545; ฐิตินัย, 2549; ฐิตินัย, 2550; งามนิตย์, 2551; ฐิตินัย, 2551)

ซีโต (Seto) ได้พัฒนาทฤษฎีที่ใช้อธิบายการเคลื่อนที่ของพาหะอิสระในวัสดุที่เป็นผลึกพหุพันธ์ (polycrystalline) เช่น ในฟิล์มบาง เป็นต้น โดยใช้แบบจำลองกัปดักประจุที่ขอบของเกรนรวมกับกลไกเทอร์มออิเล็กทริก โดยตั้งสมมุติฐานดังนี้คือ

1. ผลึกพหุพันธ์ประกอบไปด้วยเกรนขนาดเล็กที่มีคุณสมบัติเหมือนกันมีรูปร่างเป็นลูกบาศก์ แต่ละด้านยาว  $L$  ซึ่งในความเป็นจริงเกรนจะมีรูปร่างไม่คงที่ (irregular shaped grains)
2. กลไกการนำไฟฟ้าคิดเป็น 1 มิติ
3. โครงสร้างแถบพลังงานของผลึกเดี่ยว สามารถประยุกต์ใช้ในเนื้อเกรนได้
4. ความหนาของขอบเกรนมีค่าน้อยมาก เมื่อเทียบกับขนาดของเกรน
5. ขอบเกรนหรือผลึกถือว่าเป็นกัปดักประจุที่ปรากฏอยู่ที่ขอบของเกรนเมื่อเริ่มต้นกัปดักประจุจะเป็นกลางทางไฟฟ้า แต่เมื่อจับอิเล็กตรอน (จับโฮล) แล้วกัปดักประจุกลายเป็นประจุลบ (ประจุบวก) ความหนาแน่นของกัปดักประจุมีหน่วยเป็น ต่อตารางเซนติเมตร
6. ในสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น กัปดักประจุจะเป็นผู้รับ (acceptor) ส่วนสารกึ่งตัวนำชนิดพี กัปดักประจุจะเป็นผู้ให้ (donor)
7. ระดับพลังงานของกัปดักประจุ ( $E_j$ ) จะอยู่ที่บริเวณกึ่งกลางของช่องว่างแถบพลังงาน

8. ความเข้มข้นของสารเจือจะกระจายอย่างสม่ำเสมอตลอดเนื้อสารและอะตอมสารเจือจะถูกไอออนไนซ์ทั้งหมด

จากข้อสมมุติฐานดังกล่าวข้างต้น รวมกับการประมาณแบบรอยต่อชันบันได (abrupt junction approximation) แอมพลิจูดของผลึกพหุพันธ์ตรงบริเวณรอยต่อสามารถแสดงได้ดัง รูปที่ 2.21



- รูปที่ 2.21 แสดงแบบจำลองต่างๆ ของฟิล์มบางตรงบริเวณรอยต่อขอบของเกรนดังนี้ คือ
- ลักษณะของเกรนในผลึกพหุพันธ์
  - การกระจายของประจุในเนื้อเกรนและที่ขอบของเกรน
  - โครงสร้างแถบพลังงานของผลึกพหุพันธ์ในเนื้อเกรนและที่ขอบของเกรน

สภาพนำไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิจะขึ้นกับเนื้อเกรนว่าจะเป็นบริเวณพร่องพาหะทั้งหมด หรือเป็นบริเวณพร่องพาหะบางส่วน (partially depleted of carriers) ซึ่งจะอาศัยค่าวิกฤตของความหนาแน่นของสารเจือ ( $N_d^*$ ) ดังรายละเอียดดังต่อไปนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.10.1 กลไกการนำไฟฟ้ากระแสตรงในฟิล์มบางในช่วงอุณหภูมิสูง

จากแบบจำลองที่พัฒนาโดย เบ็คคารินิ (Baccarini) เมื่อ  $N_a < N_a^*$  ในเนื้อเกรนจะเป็นบริเวณพร่องพาหะทั้งหมด ซึ่งจะเกิดขึ้นในช่วงอุณหภูมิสูง ระดับพลังงานเฟอร์มิ ( $E_f$ ) จะอยู่ระดับเดียวกับ  $E$ , ค่าสภาพนำไฟฟ้า จะแสดงได้ด้วยสมการ

$$\sigma = \left[ \frac{L^2 e^2 N_v N_a v_c}{2kT(N_i - LN_a)} \right] \exp\left(-\frac{E_a}{kT}\right) \quad (2.52)$$

เมื่อ  $v_c = \left[ \frac{kT}{2\pi m^*} \right]^{\frac{1}{2}}$

และ  $N_v = 2 \left[ \frac{2\pi m^* kT}{h^2} \right]$

สมการที่ (2.52) สามารถเขียนใหม่ได้เป็น

$$\sigma T^{-1} = \sigma_0 \exp\left(-\frac{E_a}{kT}\right) \quad (2.53)$$

$$\ln(\sigma T^{-1}) = -\frac{E_a}{k} \left( \frac{1}{T} \right) + \ln \sigma_0 \quad (2.54)$$

$$\ln(\sigma T^{-1}) = -\frac{E_a}{1000k} \left( \frac{1000}{T} \right) + \ln \sigma_0 \quad (2.55)$$

$$\text{ความชัน} = -\frac{E_a}{1000k} \quad (2.56)$$

$$E_a = \frac{(1000)(k)(\text{ความชัน})}{1.8 \times 10^{-19}} \quad (2.57)$$

โดยที่  $E_a$  คือ พลังงานกระตุ้น มีหน่วยเป็นอิเล็กตรอนโวลต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขนาดของเกรนสามารถคำนวณได้จากสมการของเซอร์เรอร์ ดังสมการ

$$L = \frac{0.94\lambda}{\beta \cos \theta} \quad (2.58)$$

ส่วนความสูงของกำแพงศักย์ที่ขอบของเกรนจะแสดงได้ดังนี้ คือ

$$E_b = \frac{e^2 L^2 N_a}{8\epsilon_s} \quad (2.59)$$

ส่วนระดับพลังงานของกัณฑ์ประจุ ( $E_i$ ) สามารถคำนวณได้จากความสัมพันธ์

$$E_a = \frac{1}{2} E_g - E_i \quad (2.60)$$

### 2.10.2 กลไกการนำไฟฟ้ากระแสตรงในฟิล์มบางที่ช่วงอุณหภูมิปานกลาง

เมื่ออุณหภูมิไม่สูงมากนัก ในเนื้อเกรนจะเป็นบริเวณพร่องพาหะเพียงบางส่วน ยิ่งจะสอดคล้องกับเงื่อนไข  $N_a > N_a^*$  สำหรับเงื่อนไขแรกคือ  $E_f - E_i - E_b \gg kT$  ค่าสภาพนำไฟฟ้าจะสัมพันธ์กับอุณหภูมิ คือ

$$\sigma = \left[ \frac{Le^2 n v_c}{kT} \right] \exp\left(-\frac{E_a}{kT}\right) \quad (2.61)$$

เมื่อ  $n$  คือ ค่าความหนาแน่นของอิเล็กตรอนอิสระในบริเวณที่เป็นกลางทางไฟฟ้า

สมการที่ (2.61) สามารถเขียนใหม่ได้เป็นดังนี้ คือ

$$\sigma T^{\frac{1}{2}} = \sigma_0 \exp\left(-\frac{E_a}{kT}\right) \quad (2.62)$$

$$\ln\left(\sigma T^{\frac{1}{2}}\right) = -\frac{E_a}{k} \left(\frac{1}{T}\right) + \ln \sigma_0 \quad (2.63)$$

$$\ln\left(\sigma T^{\frac{1}{2}}\right) = -\frac{E_a}{1000k} \left(\frac{1000}{T}\right) + \ln \sigma_0 \quad (2.64)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\text{ความชัน} = -\frac{E_a}{1000k} \quad (2.65)$$

$$E_a = \frac{(1000)(k)(\text{ความชัน})}{1.6 \times 10^{-19}} \quad (2.66)$$

ซึ่ง  $E_a$  ในที่นี้ คือ ความสูงของกำแพงศักย์ที่ขอบของเกรน  $E_b$  โดยที่

$$E_b = \frac{e^2 L^2 N_a}{8\epsilon_s} \quad (2.67)$$

เมื่อ  $\epsilon_s$  คือ เพอร์มิตติวิตี (permittivity) ของฟิล์มบาง

จากรูปที่ 2.22 เป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $\ln \sigma T^{\frac{1}{2}}$  กับ  $\frac{1000}{T}$  ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ SnS ที่จากสมการที่ (2.67) จะเห็นได้ว่าค่า  $E_b$  จะไม่ขึ้นกับอุณหภูมิ เนื่องจากเงื่อนไขที่ระดับเฟอร์มิ ( $E_F$ ) อยู่สูงกว่าระดับกับดักประจุ ( $E_t$ ) ดังนั้นประจุไฟฟ้าจะเข้าไปบรรจุอยู่ในกับดักประจุทั้งหมดจนเต็ม ส่งผลให้กับกับดักประจุไม่เปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิ สำหรับค่าความหนาแน่นของอะตอมผู้รับ ( $N_a$ ) สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (2.68) รวมทั้งความยาวเดอบาย ( $L_D$ ) จะคำนวณได้จากความสัมพันธ์

$$L_D = \left[ \frac{kT\epsilon_s}{e^2 N_a} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2.68)$$

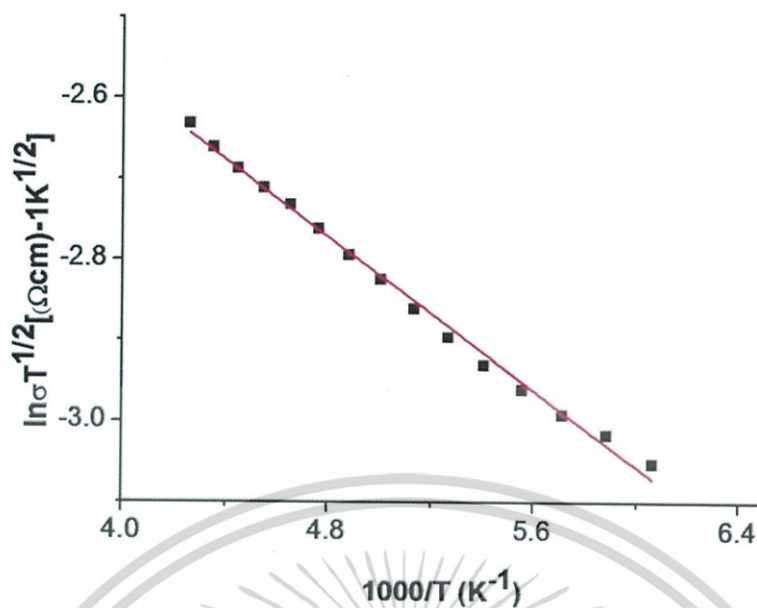
สำหรับเงื่อนไขที่สอง คือ  $E_t + E_b - E_F \gg kT$  เป็นเงื่อนไขที่ระดับกับดักประจุ ( $E_t$ ) อยู่สูงกว่าระดับเฟอร์มิ ( $E_F$ ) แสดงว่ากับดักประจุบางส่วนเท่านั้นที่ถูกครอบครองโดยประจุไฟฟ้า ดังนั้นสภาพนำไฟฟ้าจะสัมพันธ์กับอุณหภูมิดังนี้ คือ

$$\sigma = eN_c^2 L v_c (2\epsilon_s N_d^{-1} E_b)^{\frac{1}{2}} (kTN_t)^{-1} \exp\left(-\frac{E_a}{kT}\right) \quad (2.69)$$

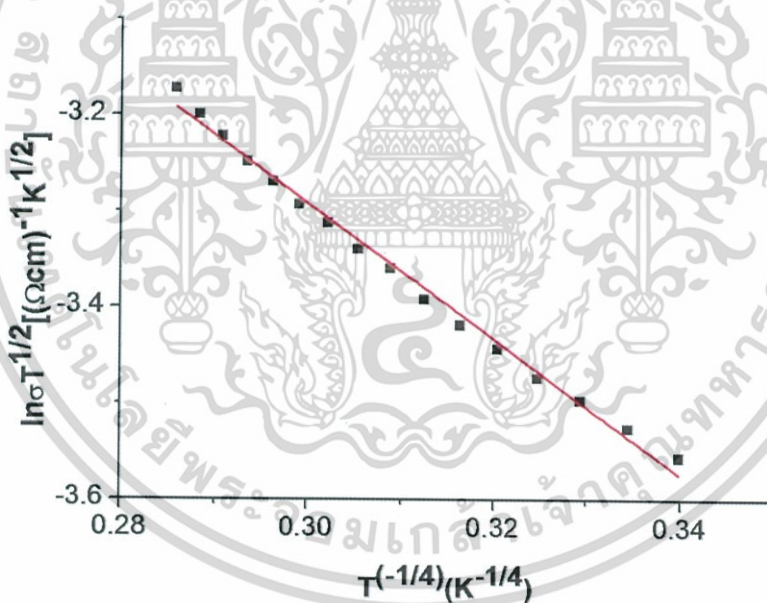
ซึ่ง

$$E_a = \frac{1}{2} E_g - E_t \quad (2.70)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.22 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า  $\ln \sigma T^{1/2}$  กับ  $\frac{1000}{T}$  ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ SnS



รูปที่ 2.23 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า  $\ln \sigma T^{1/2}$  กับ  $T^{-1/4}$  ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ SnS

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.10.3 การนำไฟฟ้าของพาหะแบบกระโดดในระยะไม่คงที่ (Variable Range Hopping Conduction : VRH) (งามนิตย์, 2555; รุติณัย, 2556)

การนำไฟฟ้าของฟิล์มบางที่อุณหภูมิต่ำมากจะเกี่ยวกับการนำไฟฟ้าของพาหะแบบกระโดดระหว่างสถานะถูกจำกัดเฉพาะที่ (localized state) ซึ่งเป็นสถานะพลังงานที่ปรากฏอยู่ในช่องว่างแถบพลังงาน สถานะถูกจำกัดเฉพาะที่เวลานี้มีระยะทางไม่คงที่ ดังนั้นจึงเรียกการนำไฟฟ้าชนิดนี้ว่าการนำไฟฟ้าของพาหะแบบกระโดดในระยะไม่คงที่ (VRH) และจะปรากฏเด่นชัดที่อุณหภูมิต่ำมากซึ่งในกรณี 3 มิติ จะแสดงได้โดยความสัมพันธ์ดังนี้ คือ

$$\sigma_{hop} = \sigma = \frac{\sigma_0}{T^2} \exp\left[-\frac{T_0}{T}\right]^{\frac{1}{4}} \quad (2.71)$$

$$\sigma T^{\frac{1}{2}} = \sigma_0 \exp\left[-\frac{T_0}{T}\right]^{\frac{1}{4}} \quad (2.72)$$

$$\ln\left(\sigma T^{\frac{1}{2}}\right) = -\left(\frac{T_0}{T}\right) + \ln \sigma_0 \quad (2.73)$$

เมื่อ  $\sigma_0$  คือ แฟกเตอร์หน้าพจน์เอ็กซ์โพเนนเชียล (pre-exponential factor)  
 $k$  คือ ค่าคงที่ของโบลต์ซมันน์ซึ่งมีค่าเท่ากับ  $1.38 \times 10^{-23}$  จูลต่อเคลวิน  
 $T$  คือ อุณหภูมิเคลวิน

เมื่อนำเอาสมการที่ (2.73) ไปเขียนกราฟจะได้กราฟเชิงเส้นโดยความชันของกราฟ คือ  $-(T_0)^{\frac{1}{4}}$  ส่วน  $\ln \sigma_0$  คือจุดตัดแกน  $\ln \sigma T^{\frac{1}{2}}$  ที่จุด  $T^{-\frac{1}{4}} = 0$  โดยที่

$$\sigma_0 = 3e^2 v \left[ \frac{N(E_F)}{8\pi\alpha k} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2.74)$$

$$T_0 = \frac{18\alpha^3}{kN(E_F)} \quad (2.75)$$

เมื่อ  $v$  คือ ความถี่ของโฟนอนที่อุณหภูมิเดบาย (Debye temperature) จะค่าประมาณ  $1 \times 10^{13}$  เฮิร์ตซ์

$N(E_F)$  คือ ความหนาแน่นของสถานะถูกจำกัดเฉพาะที่ที่ระดับเฟอร์มิ (density of localized states at Fermi level)

$\alpha$  คือ ค่าคงที่ของการสลายตัวของฟังก์ชันคลื่นของสถานะถูกจำกัดเฉพาะที่ที่ระดับเฟอร์มิ (decay constant of the wave function at the Localized state near Fermi level)

แม้ว่ากรณีโดยทั่วไปแล้ว  $e$  ทั้งสิ้น คือ ประจุอิเล็กตรอนมีค่าเท่ากับ  $1.6 \times 10^{-19}$  คูลอมบ์

$T_0$  คือ องศาของความไม่เป็นระบบ (degree of disorder)

จากสมการที่ (2.74) ถ้ายกกำลังสองทางด้านซ้ายและขวามือของเครื่องหมายเท่ากับจะได้ว่า

$$\sigma_0^2 = 9e^4 v^2 \left[ \frac{N(E_F)}{8\pi\alpha k} \right] \quad (2.76)$$

เอาสมการที่ (2.75) คูณกับสมการที่ (2.76) จะได้

$$\sigma_0^2 T_0 = \frac{\alpha^2 e^4 v^2}{4\pi k^2} \quad (2.77)$$

$$\alpha^2 = \left[ \frac{4\pi k^2}{81e^4 v^2} \right] \sigma_0^2 T_0 \quad (2.78)$$

$$\alpha = \left[ \frac{2\sqrt{\pi} k}{9e^2 v} \right] \sigma_0 T_0^{\frac{1}{2}} \quad (2.79)$$

เมื่อความถี่โฟนอน  $v = 1 \times 10^{13}$  เฮิร์ตซ์ ดังนั้นจะได้ว่า

$$\alpha = 21.23 \sigma_0 T_0^{\frac{1}{2}} \quad (2.80)$$

ถ้าแทนสมการที่ (2.80) ลงในสมการที่ (2.76) จะได้ว่า

$$N(E_F) = \left[ \frac{16\pi^3 k^2}{81e^6 v^3} \right] \sigma_0^3 T_0^{\frac{1}{2}} \quad (2.81)$$

$$= (2.0 \times 10^9) \sigma_0^3 T_0^{\frac{1}{2}} \quad (2.82)$$

ระยะทางเฉลี่ยของการกระโดด (average hopping distance:  $R$ ) มีหน่วยเป็น เซนติเมตร และพลังงานเฉลี่ยของการกระโดด (average hopping energy:  $W$ ) มีหน่วยเป็นอิเล็กตรอนโวลต์ จะแสดงถึงความสัมพันธ์

$$R = \left[ \frac{9}{8\pi\alpha k T N(E_F)} \right]^{\frac{1}{4}} \quad (2.83)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานนั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$W = \frac{3}{4\pi R^3 N(E_F)} \quad (2.84)$$

เมื่อทราบค่า  $N(E_F)$  และ  $N_a$  เราสามารถที่จะคำนวณหาค่า  $N_d$  ได้จากความสัมพันธ์

$$N(E_F) = \left(\frac{2\epsilon_s}{e^2}\right) N_a^{\frac{2}{3}} \left(1 - \frac{N_d}{N_a}\right)^{\frac{4}{3}} \quad (2.85)$$

โดยที่  $N_d$  คือ ค่าความหนาแน่นของอะตอมสารเจือชนิดผู้ให้ ซึ่งเป็นพาหะข้างน้อยของสารกึ่งตัวนำชนิดพี โดยอัตราส่วน  $\frac{N_d}{N_a} = k$  และ  $k < 1$  เสมอ

**2.11 สมบัติทางไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำ** (งามนิตย์, 2545; ฐิตินัย, 2550; งามนิตย์, 2551; ฐิตินัย, 2551; Kittel, 1971; Runyan, 1975; van der Pauw L.J., 1958; วีรัชย์, 2547; สุกฤษฏ์, 2547; อุปถัมภ์, 2548; สมเกียรติ, 2542; ดุสิต, 2535; ดุสิต, 2542; Sze, 2007)

จากทฤษฎีโครงสร้างแถบพลังงานสารกึ่งตัวนำประกอบไปด้วยแถบวาเลนซ์ แถบพลังงานต้องห้ามและแถบนำ สารกึ่งตัวนำมีช่องว่างแถบพลังงานไม่เกิน 3 อิเล็กตรอนโวลต์ ที่อุณหภูมิห้อง อิเล็กตรอนและโฮลจากภายในผลึกจะถูกกระตุ้นด้วยพลังงานจากแถบวาเลนซ์ไปยังแถบนำ จากนั้นจะเกิดโฮลในแถบวาเลนซ์ ดังนั้นสภาพนำไฟฟ้าที่อุณหภูมิใดๆของสารกึ่งตัวนำจะขึ้นอยู่กับความหนาแน่นของพาหะ และความคล่องตัวของพาหะอิสระเหล่านี้

### 2.11.1 สมบัติการนำไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำ

สมบัติการนำไฟฟ้าในสารกึ่งตัวนำขึ้นอยู่กับจำนวนพาหะอิสระเป็นสำคัญ กล่าวคือ ถ้าจำนวนอิเล็กตรอนในแถบนำเพิ่มขึ้น สารกึ่งตัวนำนั้นจะนำไฟฟ้าได้ดียิ่งขึ้น ปริมาณความหนาแน่นพาหะอิสระในสารกึ่งตัวนำถูกกำหนดด้วยขนาดของช่องว่างแถบพลังงาน ความหนาแน่นของอะตอมของสารเจือ และอุณหภูมิเป็นสำคัญ ที่สภาวะสมดุลเชิงความร้อน การกระจายของพาหะอิสระตามระดับพลังงานของผลึกเป็นตามฟังก์ชันของการกระจายแบบเฟอร์มิ-ดิแรก (Fermi-Dirac distribution) ดังสมการ

$$f(E) = \frac{1}{\exp\left[\frac{(E - E_F)}{kT}\right] + 1} \quad (2.86)$$

เมื่อ  $f(E)$  คือ ฟังก์ชันการกระจายแบบเฟอร์มิหรือความน่าจะเป็นที่จะพบอิเล็กตรอนในระดับพลังงาน  $E$  ที่อุณหภูมิ  $T$  ใดๆ

$E_F$  คือ ระดับพลังงานเฟอร์มิ (Fermi energy level)

$k$  คือ ค่าคงตัวของโบลตซ์มันน์ (Boltzmann's constant)  $= 1.38 \times 10^{-23}$  จูลต่อเคลวิน

$T$  คือ อุณหภูมิในหน่วยของเคลวิน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น ลิขสิทธิ์งานนี้เป็นของโครงการนี้และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งหากมีการนำไปใช้

ในการพิจารณาความหนาแน่นพาหะอิสระในสภาวะสมดุลเชิงความร้อนสามารถแยกได้เป็น 2 กรณี คือ กรณีสารกึ่งตัวนำชนิดอินทรีนสิก ซึ่งเป็นสารกึ่งตัวนำที่บริสุทธิ์ที่อุณหภูมิ 0 เคลวิน (intrinsic semiconductor) และกรณีสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็กซ์ทรีนสิก ซึ่งเป็นสารกึ่งตัวนำที่ไม่บริสุทธิ์ (extrinsic semiconductor)

### 2.11.1.1 สารกึ่งตัวนำชนิดอินทรีนสิก

สารกึ่งตัวนำชนิดอินทรีนสิกซึ่งเป็นสารกึ่งตัวนำที่บริสุทธิ์ที่อุณหภูมิ 0 เคลวิน อิเล็กตรอนถูกกระตุ้นด้วยพลังงานความร้อนขึ้นไปยังแถบนำและทิ้งโฮลจำนวนเท่ากันไว้ในแถบวาเลนซ์ ถ้ากำหนดให้  $N_c(E)dE$  เป็นจำนวนสถานะในแถบนำต่อหนึ่งหน่วยปริมาตรที่มีพลังงานอยู่ระหว่าง  $E$  และ  $E + dE$  ดังนั้นความหนาแน่นของอิเล็กตรอนอิสระในแถบนำที่มีค่าพลังงานอยู่ระหว่าง  $E$  และ  $E + dE$  ที่อุณหภูมิใดๆ คือ

$$n(E)dE = N_c(E)f(E)dE \quad (2.87)$$

เมื่อ  $N_c$  คือ ค่าความหนาแน่นของสถานะพลังงาน (density of state) ในแถบนำ ซึ่งเมื่อพิจารณาจากกรณีที่แถบนำมีความสมมาตรในเชิงทรงกลมและมีจุดต่ำสุดเพียงจุดเดียว

$$N_c(E) = 2\pi \left( \frac{2m_c^*}{h} \right)^{\frac{3}{2}} E^{\frac{1}{2}} \quad (2.88)$$

เมื่อ  $m_c^*$  คือ มวลยังผลของอิเล็กตรอนในแถบนำ

$h$  คือ ค่าคงตัวของพลังค์ (Planck's constant) =  $6.625 \times 10^{-34}$  จูล-วินาที

จากสมการที่ (2.88) พิจารณาโดยกำหนดให้ระดับพลังงานศูนย์กลางอยู่ตรงขอบล่างของแถบนำ นั่นคือจะมีความหนาแน่นของอิเล็กตรอนในแถบนำทั้งหมดเท่ากับ

$$\begin{aligned} n_i &= \int_0^{E_i} n(E)dE \\ &= \int_0^{E_i} N_c(E)f(E)dE \end{aligned} \quad (2.89)$$

เมื่อ  $E_i$  คือ ค่าพลังงานที่ขอบบนของแถบนำ

โดยทั่วไปพลังงานความร้อน ( $kT$ ) ของผลึกมีค่าน้อยกว่าค่าช่องว่างแถบพลังงานของผลึกมากจนกระทั่งมั่นใจได้ว่าสถานะพลังงานของแถบนำอยู่ในสภาวะที่เป็นระดับพลังงานซ้อน (non-degeneracy) และ  $n(E)d(E)$  มีค่าใกล้ศูนย์ที่ค่าระดับพลังงานสูงๆ สมการที่ (2.89) จึงสามารถขยายขอบเขต  $E_i$  ไปได้ ออกไปจนถึงอนันต์ และสามารถเขียนสมการใหม่ได้เป็น

$$n_i = 4\pi \left[ \frac{2m_e^*}{h^2} \right] \int_0^\infty \frac{E^{\frac{3}{2}}}{\exp\left[\frac{(E - E_F)}{kT}\right] + 1} dE \quad (2.90)$$

เนื่องจาก  $\exp[(E - E_F)/kT] + 1 \gg 1$  นั่นคือ

$$n_i = N_c \exp\left[\frac{E_F}{kT}\right] \quad (2.91)$$

เมื่อ 
$$N_c = 2 \left[ \frac{2\pi m_e^* kT}{h^2} \right]^{\frac{3}{2}} \quad (2.92)$$

และทำนองเดียวกันเราจะได้ค่าความหนาแน่นของโฮลในแถบวาเลนซ์ดังนี้

$$p_i = N_v \exp\left[-\frac{E_F + E_g}{kT}\right] \quad (2.93)$$

โดย 
$$N_v = 2 \left[ \frac{2\pi m_h^*}{h^2} \right]^{\frac{3}{2}} \quad (2.94)$$

เมื่อ  $E_g$  คือ ค่าช่องว่างของแถบพลังงาน  
 $m_h^*$  คือ มวลยังผลของโฮลในแถบวาเลนซ์  
 $N_v$  คือ ความหนาแน่นของสถานะพลังงานในแถบวาเลนซ์

เนื่องจากในสารกึ่งตัวนำที่บริสุทธิ์ที่อุณหภูมิ 0 เคลวิน โฮลและอิเล็กตรอนมีจำนวนเท่ากัน ดังนั้นจากสมการที่ (2.91) และสมการที่ (2.93) จะได้

$$n_i p_i = n_i^2 = N_c N_v \exp\left[-\frac{E_g}{kT}\right] \quad (2.95)$$

และ 
$$n_i = (N_c N_v)^{\frac{1}{2}} \exp\left[-\frac{E_g}{2kT}\right] \quad (2.96)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานที่อาคารวิจัยเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 หรือ  
 1) ไม่ว่าใครผิดใครถูก ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกสิ่งนี้ออกไปโดยไม่ขออนุญาตของเอกสารทุกครั้งที่มีสำเนาไปใช้

$$n_i = p_i \times 10^{15} T^{\frac{3}{2}} \left[ \frac{m_e^* m_h^*}{m^2} \right]^{\frac{3}{4}} \exp\left[-\frac{E_g}{2kT}\right] \quad (2.97)$$

จากสมการที่ (2.97) พาหะอิสระในสารกึ่งตัวนำที่บริสุทธิ์ที่อุณหภูมิ 0 เคลวิน จะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ ในเทอมของเอ็กซ์โพเนนเชียล อุณหภูมิจึงมีบทบาทสำคัญกับสมบัติไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำที่บริสุทธิ์ที่อุณหภูมิ 0 เคลวิน

### 2.11.1.2 สารกึ่งตัวนำชนิดเอกซ์ทรินสิก

สารกึ่งตัวนำชนิดเอกซ์ทรินสิกเป็นสารกึ่งตัวนำที่ไม่บริสุทธิ์ เมื่อมีการเติมอะตอมของสารเจือลงในสารกึ่งตัวนำที่อาจมีได้ทั้งอะตอมผู้ให้ (donor) หรืออะตอมผู้รับ (acceptor) ในสภาวะสมดุลเชิงความร้อนของผลึก ความหนาแน่นพาหะอิสระทั้งอิเล็กตรอน และโฮล จะหาได้ทำนองเดียวกับสารกึ่งตัวนำที่บริสุทธิ์ที่อุณหภูมิ 0 เคลวิน

นั่นคือค่าความหนาแน่นอิเล็กตรอนในแถบนำคือ

$$n = N_c \exp\left[\frac{E_F}{kT}\right] \quad (2.98)$$

และค่าความหนาแน่นของโฮลในแถบวาเลนซ์คือ

$$p = N_v \exp\left[-\frac{E_F + E_g}{kT}\right] \quad (2.99)$$

ภายใต้สภาวะที่สถานะพลังงานซ้อนจะยังคงมีความสัมพันธ์

$$np = n_i^2 = N_c N_v \exp\left[-\frac{E_g}{kT}\right] \quad (2.100)$$

พิจารณาสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น (n-type) ที่มีทั้งอะตอมผู้ให้ ( $N_d$ ) ที่มีระดับพลังงานลึกจากขอบล่างของแถบนำเป็นสถานะพลังงานของอะตอมผู้ให้ (donor level:  $E_d$ ) และอะตอมผู้รับ ( $N_a$ ) ที่มีระดับพลังงานสูงกว่าขอบล่างของแถบวาเลนซ์เป็นสถานะพลังงานของอะตอมผู้รับ (acceptor level:  $E_a$ ) จากเงื่อนไขความเป็นกลางทางไฟฟ้าของระบบจะได้

$$n + (N_a - n_a) = p + (N_d - n_d) \quad (2.101)$$

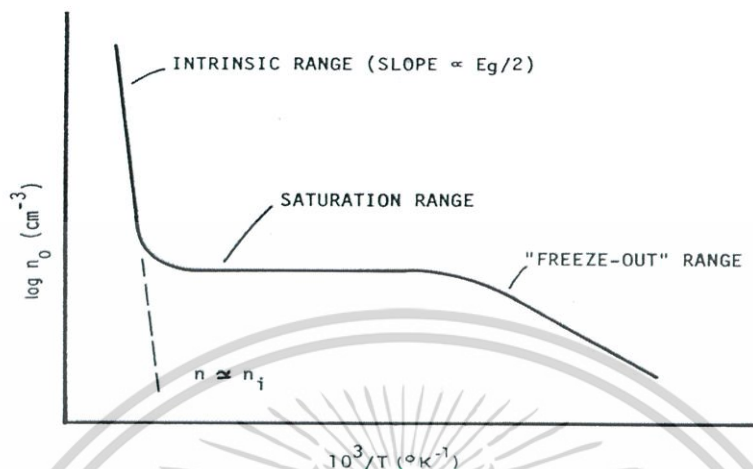
เมื่อ  $n, p$  คือ ความหนาแน่นของอิเล็กตรอนและโฮลอิสระ

$N_d, N_a$  คือ ความหนาแน่นของอะตอมผู้ให้และผู้รับ

$n_d, n_a$  คือ ความหนาแน่นของอะตอมผู้ให้และผู้รับที่ไม่ถูกไอออไนซ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เราสามารถแยกพิจารณาลักษณะการแปรผันตามอุณหภูมิของพาหะได้เป็น 2 กรณี ดังแสดงในรูปที่ 2.24 คือ



รูปที่ 2.24 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความหนาแน่นของอิเล็กตรอนในสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นกับส่วนกลับของอุณหภูมิ

1. กรณีความหนาแน่นของอะตอมของสารเจือมีค่าน้อยหรือที่อุณหภูมิสูง ในกรณีเช่นนี้อะตอมของอะตอมของสารเจือจะถูกไอออไนซ์จนหมดด้วยพลังงานเนื่องจากความร้อนพาหะอิสระเกิดจากสองส่วนที่มาจากสารกึ่งตัวนำบริสุทธิ์ที่อุณหภูมิ 0 เคลวิน และมาจากอะตอมของสารเจือทั้งหมด จากเงื่อนไขความเป็นกลางทางไฟฟ้าสมการที่ (2.101) สดรูปได้เป็น

$$N = p + (N_d - N_a) \tag{2.102}$$

จากสมการที่ (2.100) จะได้ว่า

$$n = \frac{1}{2} \left[ (N_d - N_a) + \sqrt{(N_d - N_a)^2 + 4n_i^2} \right] \tag{2.103}$$

$$p = \frac{n_i^2}{n} \tag{2.104}$$

ในช่วงอุณหภูมิสูงมากจนกระทั่งความหนาแน่นพาหะส่วนใหญ่มาจากสารกึ่งตัวนำที่บริสุทธิ์ที่อุณหภูมิ 0 เคลวิน มากกว่าอะตอมของสารเจือปนมากๆ ( $|N_d - N_a| \ll n_i$ ) ช่วงนี้จะมีการเพิ่มขึ้นของพาหะอิสระตามการเพิ่มของอุณหภูมิอย่างรวดเร็วแบบเอ็กซ์โพเนนเชียล เรียกช่วงนี้ว่า เป็นบริเวณย่านอินทรินสิก (intrinsic region) และสมการที่ (2.103) และสมการที่ (2.104) จะกลายเป็นสมการอินทรินสิก

$$n = p = n_i \tag{2.105}$$

ในช่วงที่อุณหภูมิต่ำกว่าช่วงอินทรีนลิก พาหะที่มาจากสารกึ่งตัวนำที่บริสุทธิ์ที่อุณหภูมิ 0 เคลวิน จะมีน้อยกว่าพาหะที่มากจากอะตอมของสารเจือปนมากๆ ( $|N_d - N_a| \gg n_i$ ) พาหะข้างมากในช่วงนี้จะมีค่าคงที่เรียกช่วงนี้ว่าบริเวณย่านอิ่มตัว (saturation region) จะได้ว่า

$$n \cong N_d - N_a \quad (2.106)$$

2. กรณีความหนาแน่นของอะตอมของสารเจือปนมีมากหรือที่อุณหภูมิต่ำ

ในกรณีนี้พลังงานเนื่องจากความร้อนไม่สามารถไอออไนซ์อะตอมของสารเจือปนได้ทั้งหมดดังนั้นจึงยังมีอะตอมผู้ให้ที่ไม่ถูกไอออไนซ์ ( $N_d$ ) บางส่วนเหลืออยู่ แต่โฮล ( $p$ ) และอะตอมผู้รับที่ไม่ถูกไอออไนซ์ ( $N_a$ ) จะมีค่าน้อยมาก ดังนั้นสมการที่ (2.106) จะเปลี่ยนเป็น

$$n = N_d - N_a - n_d \quad (2.107)$$

และ

$$n_d = N_d \left[ \frac{1}{1 + \beta \exp\left\{\frac{E_d + E_f}{kT}\right\}} \right] \quad (2.108)$$

เมื่อ

$\beta$  คือ แฟกเตอร์สถานะพลังงานซ้อนทับ (degeneracy factor)

ที่สถานะพื้นฐานของอะตอมผู้ให้ สามารถเขียนได้ในรูปดังนี้

$$n^2 + n(N_a + N_c) - (N_d - N_a)N_c = 0 \quad (2.109)$$

เมื่อ

$$N_c = \beta N_a \exp\left(-\frac{E_d}{kT}\right) \quad (2.110)$$

$n$  อยู่ในรูปของสมการควอดราติกซึ่งมีรากของสมการคือ

$$n = -\frac{1}{2}(N_d + N_c) + \frac{1}{2}[(N_d + N_c)^2 + 4N_c(N_d - N_a)]^{\frac{1}{2}} \quad (2.111)$$

เมื่อ  $E_d \gg kT$  และ  $N_c$  จะมีค่าน้อย เราสามารถกระจายสมการที่ (2.111) เทอมที่สองด้านขวามือได้ด้วยอนุกรมทวินาม (binomial series) จะได้ว่า

$$n = -\left(\frac{N_d + N_c}{2}\right) + \frac{1}{2}(N_d + N_c) + \frac{N_c(N_d - N_a)}{N_d + N_c}$$

$$n \cong \frac{N_c(N_d - N_a)}{N_d + N_c} \quad (2.112)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับใช้ในแวดวงวิชาการเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ถ้า  $N_a \gg N'_c$  สมการที่ (2.112) จะกลายเป็น

$$n = \frac{N'_c(N_d - N_a)}{N_a} = \frac{(N_d - N_a)}{2N_a} \beta N_c \exp\left[-\frac{E_g}{kT}\right] \quad (2.113)$$

ถ้า  $N_a$  มีค่าน้อยมากนั่นคือ  $N_d \gg N'_c \gg N_a$  จะทำให้สมการที่ (2.113) สามารถลดรูปได้เป็น

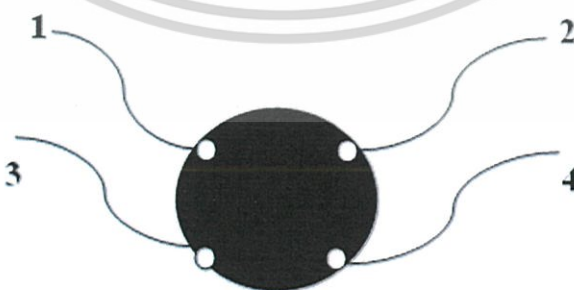
$$\frac{n^2}{N_d} - N'_c = 0 \quad (2.114)$$

หรือ 
$$n \approx \sqrt{\beta N_d N'_c} \exp\left[-\frac{E_d}{2kT}\right] \quad (2.115)$$

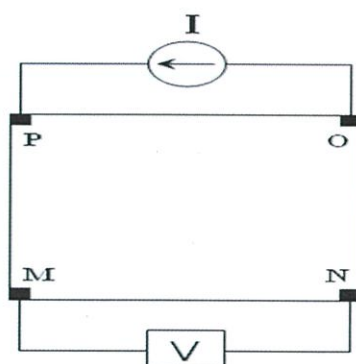
จะเห็นว่าความหนาแน่นของพาหะอิสระจะลดลงตามการลดลงของอุณหภูมิในแบบเอกซ์โพเนนเชียล ซึ่งเรียกช่วงทั้งสองนี้ว่าย่านฟรีซเอาท์ (freeze-out region) โดยการลดลง จะเป็นไปตามสมการที่ (2.114) เมื่ออุณหภูมิต่ำลงจนกระทั่ง  $N_a < n < N_d$  และลดลงตามสมการที่ (2.115) เมื่ออุณหภูมิต่ำลงจนกระทั่ง  $n < N_a < N_d$

### 2.11.2 การวัดความต้านทานแผ่นและสภาพต้านทานไฟฟ้าด้วยเทคนิคแวนเดอร์เพาว์ (รูตินัย, 2550; Runyan, 1975; Elangovan, 2003; Fahrenbruch, 1983; Van Der Pauw, 1958)

วิธีการวัดความต้านทานแผ่นและสภาพต้านทานไฟฟ้าด้วยเทคนิคแวนเดอร์เพาว์ ดังแสดงในรูปที่ 2.25 และ 2.26 เป็นวิธีที่ได้รับการยอมรับสำหรับการวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าของชิ้นสารตัวอย่างที่เป็นฟิล์มบางที่มีความหนาสม่ำเสมอ และมีรูปร่างไม่แน่นอน โดยขั้วสัมผัสจะอยู่บริเวณขอบของชิ้นสารตัวอย่าง รอยต่อระหว่างขั้วสัมผัสที่มีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านจะต้องไม่ขัดขวางการไหลของกระแส



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่าในรูปแบบที่ 2.25 นี้ แสดงตำแหน่งของจุดสัมผัสบนชิ้นสารตัวอย่างเพื่อวัดความต้านทานแผ่นและสภาพ  
ต้านทานไฟฟ้าด้วยเทคนิคแวนเดอร์เพาว์



รูปที่ 2.26 แสดงการต่อขั้วเพื่อวัดความต้านทานและวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าด้วยเทคนิคแวนเดอร์เพาว์

การวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าสามารถทำได้โดยจ่ายกระแสไฟฟ้าเข้าขั้ว  $P-O$  ทำการวัดความต่างศักย์ตกคร่อมขั้ว  $M-N$  จะทำให้ได้ค่า  $R_1$  จากสมการที่ (2.116)

$$R_1 = \frac{V_{MN}}{I_{PO}} \quad (2.116)$$

หลังจากนั้นทำการจ่ายกระแสไฟฟ้าเข้าที่ขั้ว  $P-M$  แล้วทำการวัดความต่างศักย์ตกคร่อมขั้ว  $O-N$  จะได้ค่า  $R_2$  จากสมการที่ (2.117)

$$R_2 = \frac{V_{ON}}{I_{PM}} \quad (2.117)$$

เมื่อได้ค่า  $R_1$  และ  $R_2$  มาแล้วสามารถคำนวณหาค่าความต้านทานแผ่นได้ดังนี้

$$R_{sh} = f \left( \frac{\pi}{\ln 2} \right) \left( \frac{R_1 + R_2}{2} \right) \quad (2.118)$$

เมื่อ  $f$  คือ แฟกเตอร์ค่าแก้ไขของแวนเดอร์เพาว์ (van der Pauw correction factor)

$$\text{โดย } f = 1 \left( \frac{\ln 2}{2} \right) \left( \frac{R_1 - R_2}{R_1 + R_2} \right) \quad (2.119)$$

ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าสามารถคำนวณได้ดังนี้

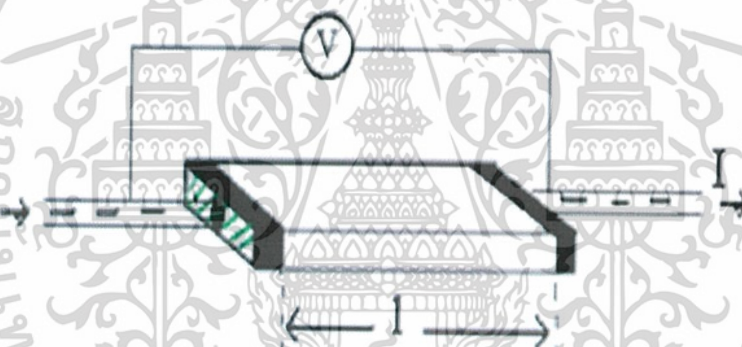
$$\rho = R_{sh} \cdot d \quad (2.120)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
เมื่อ  $d$  คือ ความหนาของชิ้นสารตัวอย่าง  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.11.3 การวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าโดยวิธีวัดโดยตรง (direct resistivity method) (ฐิตินัย, 2550; Runyan, 1975; Elangovan, 2003; Fahrenbruch, 1983; Van Der Pauw, 1958; ดุสิต, 2535; Gangopadhyay, 2004)

โดยทั่วไปแล้วการวัดสภาพต้านทานไฟฟ้ามักจะวัดความต้านทานก่อน ซึ่งเป็นวิธีวัดโดยตรงดังรูปที่ 2.27 นี้ หมายถึง วัดค่าความต้านทานรวมของสสาร จากนั้นมาหาค่าความยาว และพื้นที่หน้าตัดของสสารนั้น การวัดวิธีนี้จะต้องทำให้สสารที่ต้องการวัดมีรูปร่างเรขาคณิตที่แน่นอน เพื่อให้จะวัดค่าพื้นที่หน้าตัดและความยาวให้ได้แน่นอน เช่น แท่งกลมทรงกระบอก แท่งสี่เหลี่ยม เป็นต้น จากนั้นจึงให้กระแสไฟฟ้าเข้าไปที่ปลายด้านหนึ่ง และให้กระแสไหลออกผ่านสารตัวอย่างที่ปลายอีกด้านหนึ่ง ขณะเดียวกันก็วัดความต่างศักย์ไฟฟ้าที่จุดปลายทั้งสองนั้นพร้อมๆกัน

จากที่ทราบค่ากระแสและศักย์ไฟฟ้านี้ สามารถนำมาคำนวณหาค่าความต้านทานจำเพาะทางไฟฟ้าได้ดังต่อไปนี้ เมื่อกำหนด  $R$  เป็นความต้านทานรวมจะมีความสัมพันธ์กับความต้านทานจำเพาะ และพื้นที่หน้าตัด  $A$  บริเวณที่ปล่อยกระแสไหลเข้าไป และ  $l$  เป็นระยะทางระหว่างขั้วศักย์ไฟฟ้าที่วัด



รูปที่ 2.27 แสดงการวัดค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าโดยวิธีวัดโดยตรง

$$R = \rho \frac{l}{A} \quad (2.121)$$

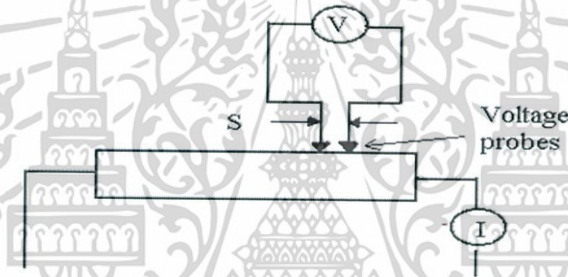
$$\rho = R \cdot \frac{A}{l} = \left( \frac{V}{I} \right) \left( \frac{A}{l} \right) \quad (2.122)$$

จะเห็นว่าวิธีนี้เป็นวิธีที่สะดวกและรวดเร็ว แต่ค่าที่ได้เป็นค่าโดยประมาณซึ่งต้องคำนึงถึงองค์ประกอบอื่นๆ ด้วย ซึ่งความถูกต้องในการวัดโดยวิธีนี้ขึ้นอยู่กับบริเวณผิวสัมผัสที่กระแสไหลเข้าและออกนั้น มีลักษณะเป็นโอห์มมิกที่ดีหรือไม่ ถ้าไม่มีคุณสมบัติโอห์มมิกที่ดีแสดงว่ามีความต้านทานที่ผิวสัมผัสทั้งสองขั้วไฟฟ้าเกิดขึ้นด้วย ค่าความต้านทาน  $R$  ที่วัดได้จึงเป็นค่าความต้านทานรวมทั้งหมด ดังนั้น ค่าความต้านทานจริงของสารกึ่งตัวนำจะน้อยกว่าค่าที่วัดได้แน่นอน ความถูกต้องอีกส่วนหนึ่งขึ้นอยู่กับความแตกต่างระหว่างความต้านทานของสารที่ต้องการวัด และความต้านทานภายใน (impedance) ของโวลต์มิเตอร์ที่ใช้วัดหากความต้านทานนี้ใกล้เคียงกับความต่างศักย์ไฟฟ้าที่วัดได้จะมีค่าน้อยกว่าความเป็นจริง ซึ่งในทางปฏิบัติจะคำนึงถึงผิวสัมผัสโอห์มมิก มากกว่าความผิดพลาดของ

โวลต์มิเตอร์ เนื่องจากที่ผิวสัมผัสจะดีหรือไม่ (เป็นโอห์มมิกหรือไม่) นั้นตรวจสอบได้ยากมาก จึงแก้ไขด้วยการทำให้เกิดผิวสัมผัสบริเวณพื้นที่มากขึ้นเพื่อลดความต้านทานที่ผิวสัมผัสลง จากนั้นจึงวัดศักย์ไฟฟ้าด้วยโวลต์มิเตอร์ โดยเลือกโวลต์มิเตอร์ที่มีความต้านทานภายในสูงๆ เท่าที่จะหาได้เพื่อลดความผิดพลาด

#### 2.11.4 การวัดค่าความต้านทานไฟฟ้าโดยวิธีสองขั้ว (two point probes) (ฐิตินัย, 2550; Runyan, 1975; Elangovan, 2003; Fahrenbruch, 1983; van der Pauw, 1958; ดุสิต, 2535; Gangopadhyay, 2004)

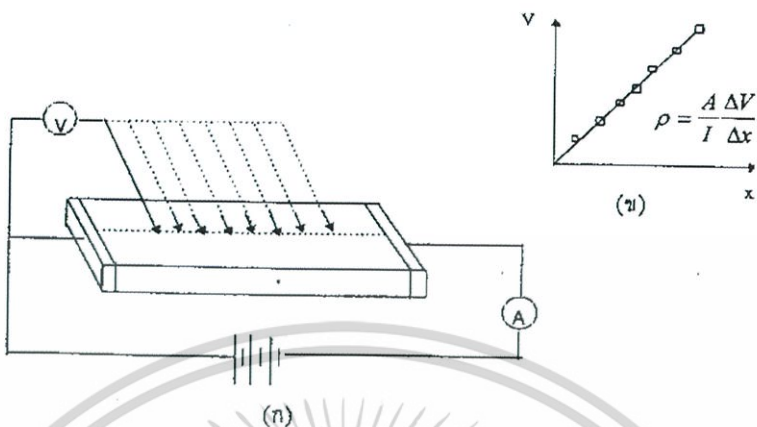
การวัดด้วยวิธีนี้มีลักษณะใกล้เคียงกับวิธีวัดโดยตรง แตกต่างที่ลักษณะของขั้วไฟฟ้าของการวัดศักย์ไฟฟ้าจะวัดบนสารตัวอย่าง ดังแสดงให้เห็นในรูปที่ 2.28 วิธีการวัดชนิดนี้เป็นวิธีที่พัฒนาขึ้นจากแบบแรกเพื่อกำจัดศักย์ไฟฟ้าที่รอยต่อหัวท้ายของผิวสัมผัสให้น้อยลง และสามารถตรวจสอบความสกปรกบนพื้นผิวของชิ้นสารตัวอย่างได้ด้วย



รูปที่ 2.28 แสดงการวัดค่าความต้านทานไฟฟ้าโดยวิธีสองขั้ว

ข้อจำกัดของการวัดด้วยวิธีนี้คือจะต้องวัดบนสารตัวอย่างที่มีความหนาสม่ำเสมอ และมีรูปทรงเรขาคณิตแน่นอน โดยพยายามให้กระแสผ่านเข้าไปในสารตัวอย่างมีค่าน้อยที่สุด เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดความร้อนภายในสาร เพราะค่าความต่างศักย์ที่วัดได้อาจจะไม่ถูกต้อง อีกทั้งในการวัดทุกครั้งจะต้องใช้โวลต์มิเตอร์ที่มีค่าความต้านทานภายในสูง และจุดที่ต้องการวัดศักย์ไฟฟ้าควรอยู่ห่างจากจุดที่ปล่อยกระแสเข้าและออกพอสมควร เพื่อป้องกันสารเจือเข้าไปทำการรวมตัวกันระหว่างจุดที่ทำการวัดค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า หากมีสารเจือเข้ามารวมตัวที่บริเวณที่วัดนี้จะมีผลทำให้เกิดการรวมกับพาหะข้างน้อย (minority carriers) บริเวณนั้น ทำให้การวัดค่าความต้านทานจำเพาะที่วัดได้สูงเกินความเป็นจริง และนอกจากนี้ควรคำนึงถึง ความสม่ำเสมอของเส้นสมศักย์ (equi-potential lines) โดยการวัดที่บริเวณจุดที่คิดว่าเป็น เส้นสมศักย์นั้นสม่ำเสมอ (ตรงกลางของสารตัวอย่าง) สัดส่วนระหว่างระยะขั้วที่วัดศักย์ไฟฟ้าต่อพื้นที่ตรงจุดที่ปล่อยกระแสเข้าและออกจะต้องมีค่ามากกว่าสามเท่า  $l/A > 3$  เมื่อ  $l$  คือ ระยะห่างระหว่างขั้วที่วัดศักย์ไฟฟ้า และ  $A$  คือ พื้นที่บริเวณให้กระแสไฟฟ้า ข้อควรคำนึงถึงอีกประการก็คือ สารที่นำมาวัดมีโครงสร้างผลึกชนิดใด เป็นรูปลูกบาศก์หรือไม่ ถ้าไม่ใช่จะต้องทราบทิศทางของการวัดว่าอยู่ในทิศทางหรือระนาบใดของผลึกการวัดควรใช้วิธีที่ขั้วหนึ่งไว้ และเลื่อนตำแหน่งอีกขั้วหนึ่งออกไปเป็นระยะๆ โดยมีมาตราส่วนบอกระยะและนำมาเขียนกราฟ ดังรูปที่ 2.29(ก) และ 2.29(ข) ความชันที่ได้จะเป็นค่าความต้านทานจำเพาะทางไฟฟ้าข้อดีของ

การวัดแบบสองขั้วในหลายๆตำแหน่งนี้จะสามารถแยกสภาพต้านทานไฟฟ้าที่สภาพผิวระหว่างโลหะกับสารกึ่งตัวนำและความต้านทานจำเพาะภายในของสารกึ่งตัวนำได้



รูปที่ 2.29 แสดงการวัดค่าความต้านทานแผ่นโดยวิธีสองขั้วเชิงเส้น  
 ก. การวัดแบบสองขั้วโดยมีการเลื่อนระยะที่ขั้วหนึ่ง  
 ข. กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า กับ ระยะทางที่ได้จากชนิด  
 เลื่อนขั้วไฟฟ้า

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

ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าสามารถเขียนในเทอมของสภาพคล่องของพาหะได้ และความหนาแน่นพาหะอิสระด้วยความสัมพันธ์กรณีกระแสไฟฟ้าเกิดจากอิเล็กตรอน

$$\rho = \frac{1}{ne\mu_e} \tag{2.123}$$

กรณีกระแสไฟฟ้าเกิดจากโฮล

$$\rho = \frac{1}{pe\mu_p} \tag{2.124}$$

กรณีกระแสไฟฟ้าเกิดจากพาหะสองชนิดคืออิเล็กตรอนและโฮล ซึ่งมีปริมาณใกล้เคียงกัน สภาพต้านทานไฟฟ้าที่แท้จริงคือ

$$\rho = \frac{1}{e(n\mu_e + p\mu_p)} \tag{2.125}$$

เมื่อ  $n$  คือ ความหนาแน่นของอิเล็กตรอนอิสระ  
 $p$  คือ ความหนาแน่นของโฮลอิสระ  
 $\mu_e, \mu_p$  คือ สภาพคล่องของอิเล็กตรอนและสภาพคล่องของโฮล

นั่นคือหากทราบสภาพต้านทานไฟฟ้า และสภาพคล่องของพาหะจะทำให้สามารถคำนวณค่าความหนาแน่นของพาหะข้างมากได้จากสมการที่ (2.126) และ (2.27) คือ

กรณีเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น

ค่าความหนาแน่นของอิเล็กตรอน

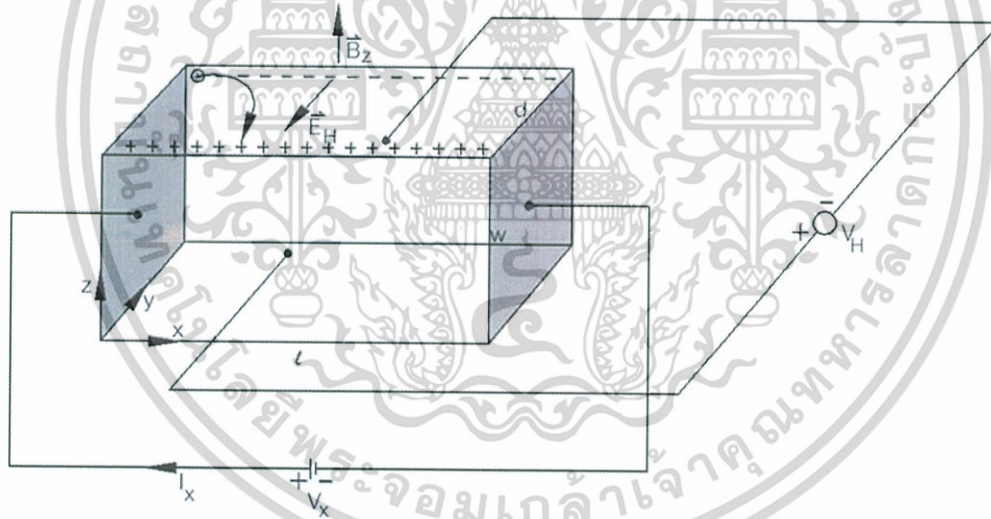
$$n = \frac{1}{e\rho\rho_e} \quad (2.126)$$

กรณีเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดพี

ค่าความหนาแน่นของโฮล

$$n = \frac{1}{e\rho\rho_p} \quad (2.127)$$

เราสามารถคำนวณค่าสภาพต้านทานไฟฟ้า สภาพคล่องของพาหะได้หลายวิธี วิธีที่สะดวกและมักนิยมใช้กันอย่างกว้างขวางคือ การคำนวณจากการศึกษาปรากฏการณ์ฮอลล์ ปรากฏการณ์ฮอลล์ได้ถูกค้นพบในปี พ.ศ. 2422 โดย เอ็ดวินเฮร์เบิร์ตฮอลล์ (Edwin Herbert Hall)



รูปที่ 2.30 แสดงแผนภาพแสดงปรากฏการณ์ฮอลล์บนแผ่นสารกึ่งตัวนำชนิดพี

พิจารณาชิ้นสารกึ่งตัวนำชนิดพี ที่เป็นรูปทรงดังแสดงในรูปที่ 2.30 ซึ่งมีกระแสไฟฟ้า  $I$  ไหลผ่านในแนว  $x$  หรืออาจมองว่ามีประจุบวกเคลื่อนที่ไปในทิศ  $x$  ด้วยความเร็วลอยเลื่อน  $v_x$  เกิดเป็นกระแสไฟฟ้าในแนวทิศทาง  $x$  คือ  $I_x$  ดังสมการที่ (2.128)

จาก  $I = nqvA$  (2.128)

แม้ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้น 
$$I_x = qnV_x(wd) \quad (2.129)$$

จากกฎของโอห์ม 
$$V = IR \quad (2.130)$$

$$R = \frac{\rho L}{A} \quad (2.131)$$

จากรูปที่ 2.30

$$A = w \cdot d \quad (2.132)$$

ถ้าทราบความต่างศักย์ไฟฟ้า ( $V_x$ ) ระหว่างปลายทั้งสองของสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น สามารถหาค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าได้จากสมการที่ (2.133) และ (2.131) และ (2.132)

$$\rho = \frac{V_x}{I_x} \cdot \frac{A}{L} = \frac{V_x}{I_x} \cdot \frac{wd}{L} \quad (2.133)$$

ปรากฏการณ์ฮอลล์เกิดขึ้นเมื่อมีสนามแม่เหล็ก ( $B_z$ ) ที่กระทำกับชิ้นสารในทิศ  $z$  อย่างสม่ำเสมอ อันตรกิริยาจากสนามแม่เหล็กมีผลทำให้แนวกระแสของโฮลเบี่ยงเบนไปในทิศ  $-y$  สอดคล้องในบริเวณขอบด้านนอก ( $y = 0$ ) และเหนี่ยวนำให้เกิดอิเล็กตรอนขึ้นที่ขอบด้านใน ( $y$ ) ทำให้เกิดสนามไฟฟ้าฮอลล์ในทิศ  $-y$  (Hall field:  $E_y$  หรือ  $E_H$ ) และเกิดความต่างศักย์ฮอลล์ หรือเกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าฮอลล์ในทิศ  $y$  (Hall voltage:  $V_H$ ) ขึ้น ทำให้กลุ่มโฮลเคลื่อนที่ไปด้วยแรงลอเรนตซ์ (Lorentz's force)

$$F = q(v_x \times B_z) + qE_y \quad (2.134)$$

เมื่อแรงเนื่องจากสนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้าฮอลล์ที่กระทำต่อโฮลมีค่าเท่ากันจะเกิดสภาวะสมดุลเชิงความร้อน หรือสภาวะคงตัว (steady state) ทำให้โฮลเคลื่อนที่ในทิศ  $x$  ดังเดิม เพราะฉะนั้นจะทำให้ได้ว่า

$$E_y = v_x B_z = \frac{1}{qn} \cdot \frac{I_x}{wd} \cdot B_z \quad (2.135)$$

หากพิจารณาสมการที่ (2.135) จะเห็นว่าสนามไฟฟ้าฮอลล์ที่เกิดขึ้นเป็นปฏิภาคกับความหนาแน่นกระแสและสนามแม่เหล็ก สามารถเขียนได้ในรูปของ

$$E_y = R_H \cdot J_x B_z \quad (2.136)$$

เมื่อ 
$$J_x = \frac{I_x}{wd} \quad (2.137)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ในเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และตั้งอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$R_H = \frac{E_y}{J_x B_z} = \frac{1}{qn} \quad (2.138)$$

เรียก  $R_H$  ว่าเป็นสัมประสิทธิ์ฮอลล์หรือค่าคงตัวฮอลล์ (Hall coefficient) ซึ่งนิยามว่าเป็นสนามไฟฟ้าฮอลล์ที่เกิดจากความหนาแน่นกระแสของพาหะขนาด 1 หน่วย ไหลผ่านภายใต้สนามแม่เหล็กขนาด 1 หน่วย เราอาจทราบศักย์ไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจากสนามไฟฟ้าฮอลล์ โดยอินทิเกรตสนามไฟฟ้าฮอลล์ ตลอดความกว้าง ( $w$ ) ของแผ่นสารและเรียกความต่างศักย์นี้ว่า ความต่างศักย์ไฟฟ้าฮอลล์ ( $V_H$ ) นั่นคือ

$$V_H = \int_0^w E_y dy = \int_0^w \frac{1}{qn} \cdot \frac{I_x B_z}{wd} dy$$

$$= \frac{1}{qn} \cdot \frac{I_x B_z}{d} \quad (2.139)$$

ค่าสัมประสิทธิ์ฮอลล์ที่ได้จากการวัด คือ

$$R_H = \frac{V_H}{I_x} \cdot \frac{d}{B_z} \quad (2.140)$$

ค่าความหนาแน่นของอิเล็กตรอนตามนิยาม คือ

$$n = \frac{1}{qR_H} = \frac{I_x}{V_H} \cdot \frac{B_z}{qd} \quad (2.141)$$

โดยทั่วไปพาหะอิสระที่เคลื่อนที่ในสารกึ่งตัวนำ มักประสบกับกลไกการกระเจิงหลายชนิด กลไกการกระเจิงของพาหะในสารกึ่งตัวนำจะเป็นกลไกที่ขึ้นอยู่กับพลังงานของพาหะ โดยที่ช่วงเวลาปลอดการกระเจิง ( $\tau$ ) จะแสดงได้ดังนี้

$$\tau = \tau(E) \quad (2.142)$$

เมื่อคิดผลรวมจากการกระเจิงที่ขึ้นกับค่าพลังงานของพาหะ ค่าสัมประสิทธิ์ฮอลล์ สามารถเขียนใหม่ได้ดังนี้

ค่าสัมประสิทธิ์ฮอลล์กรณีสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น

$$R_H = \frac{r}{nq} \quad (2.143)$$

ค่าสัมประสิทธิ์ฮอลล์กรณีสารกึ่งตัวนำชนิดพี

$$R_H = \frac{r}{pq} \quad (2.144)$$

เมื่อ  $r$  คือ แฟกเตอร์การกระเจิง (scattering factor) ของพาหะในปรากฏการณ์ฮอลล์ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้า ไม่อนุญาตให้เผยแพร่ประโยชน์ด้านการค้า ซึ่งสามารถนิยามค่า  $r$  ได้จากความสัมพันธ์ดังนี้  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมีเหตุขัดแย้งเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$r = \frac{\langle \tau \rangle^2}{\langle \tau^2 \rangle} \quad (2.145)$$

$r$  มีค่าอยู่ระหว่าง 1 ถึง 2 ขึ้นอยู่กับกลไกการกระเจิงของพาหะ เช่น การกระเจิงเนื่องจากโครงผลึกหรือการกระเจิงเนื่องจากอะตอมของสารเจือปนที่ถูกไอออนซ์ สัมประสิทธิ์ฮอลล์แปรค่าตามสนามแม่เหล็กและอุณหภูมิ ซึ่งจะมีค่าใกล้ 1 เมื่อชั้นสารอยู่ภายใต้สนามแม่เหล็กความเข้มสูงมาก ดังนั้นเราทราบค่าของ  $r$  จากการทดลองด้วยความสัมพันธ์

$$r = \frac{R_H(B)}{R_H(B = \infty)} \quad (2.146)$$

ในทางปฏิบัติสนามแม่เหล็กที่ใช้วัดโดยทั่วไปมีค่าอยู่ระหว่าง 5 ถึง 10,000 เกาส์ ซึ่งค่า  $r$  ในช่วงนี้มีการเปลี่ยนแปลงไม่มาก ดังนั้นอาจประมาณได้ว่าค่าของ

จากสมการที่ (2.144) และ (2.146) สามารถนิยามสภาพคล่องฮอลล์ ( $\mu_H$ ) ได้เป็น

$$\mu_H = \left| \frac{R_H}{\rho} \right| = r \mu \quad (2.147)$$

หรือ

$$\mu_H = \frac{V_H}{I_z} = \frac{h}{B_x} \cdot \frac{1}{\rho} \quad (2.148)$$

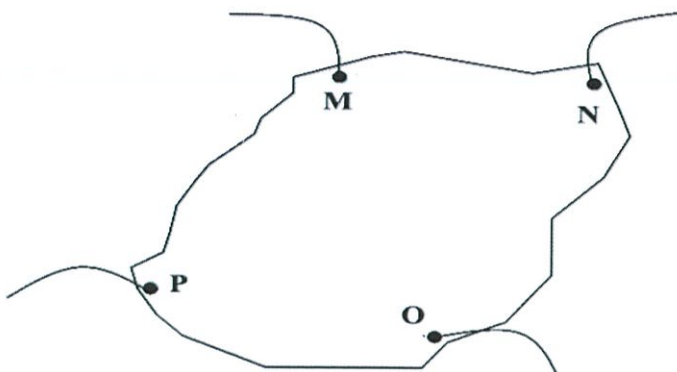
ค่าสภาพคล่องฮอลล์แตกต่างจากค่าสภาพคล่องที่ได้จากการนำไฟฟ้าด้วยอัตราส่วนของ ซึ่งมีความมากกว่า 1 โดยทั่วไปเพื่อลดความซับซ้อนเมื่อคำนวณความหนาแน่นของพาหะจึงมักประมาณว่า  $r$  มีค่าเท่ากับ 1 ความหนาแน่นของพาหะที่คำนวณจากปรากฏการณ์ฮอลล์ จึงอาจสูงกว่าความหนาแน่นของพาหะที่แท้จริงถึง 30 เปอร์เซ็นต์

#### 2.11.6 การศึกษาปรากฏการณ์ฮอลล์ด้วยเทคนิคแวนเดอร์เพาว์ (ฐิตินัย, 2549; ฐิตินัย, 2550; วีรชัย, 2547; อุปถัมภ์, 2548; สุกฤษฏ์, 2547; Marquardt, 2006; Dieter, 1998; Elangovan, 2003; Fahrenbruch, 1983; van der Pauw, 1958; Tilly, 2004)

เทคนิคนี้ได้รับการพัฒนาขึ้นมาจากพื้นฐานของวิชาคณิตศาสตร์ คอนฟอร์มอลแมปปิง (conformal mapping) โดยนักวิทยาศาสตร์ชื่อ แวนเดอร์เพาว์ (van der Pauw) สำคัญสำคัญของเทคนิคนี้อยู่ที่การวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าของแผ่นสารตัวอย่างรูปทรงใดๆ ซึ่งสามารถทำได้อย่างแม่นยำโดยไม่จำเป็นต้องทราบลักษณะของรูปแบบการกระจายของเส้นทางเดินกระแสที่ไหลภายในแผ่นสาร ถ้าสารตัวอย่างประพฤติตามเงื่อนไขต่อไปนี้

1. ขั้วสัมผัสวางอยู่ที่ขอบของชิ้นสาร
2. ขนาดของขั้วสัมผัสต้องมีขนาดเล็กมากเมื่อเทียบกับเส้นรอบรูปของชิ้นสาร
3. สารตัวอย่างต้องมีความหนาแน่นเท่ากันตลอด
4. เนื้อสารตัวอย่างต้องไม่มีรูหรือรอยแยกใดๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ของภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสุโขทัยธรรมาธิราช ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น ผู้ที่นำเอกสารนี้ไปใช้โดยไม่ได้รับอนุญาตถือว่าผิดกฎหมาย และต้องรับผิดชอบต่อเอกสารทุกครั้งหากมีการนำไปใช้บริเวณขอบของแผ่นซึ่งสอดคล้องกับเงื่อนไขข้างต้น



รูปที่ 2.31 แสดงการวัดปรากฏการณ์ฮอลล์ด้วยเทคนิคแวนเดอร์เพอร์บนสารตัวอย่างที่เป็นแผ่นบางที่มีรูปทรงใดๆ

ในการวัดสภาพคล่องฮอลล์ หากกระบวนการวัดกระทำภายใต้สนามแม่เหล็กความเข้ม  $B$  ที่กระทำตั้งฉากกับระนาบแผ่นสาร กระแสไฟฟ้าจะเข้าในแนวทแยงมุมเข้า  $M, O$  และวัดความต่างศักย์จากขั้ว  $N, P$

นิยาม 
$$R_{MNOP} = \frac{V_{NP}}{I_{MO}} \quad (2.149)$$

สัมประสิทธิ์ฮอลล์จากเทคนิคของแวนเดอร์เพอร์ คือ

$$R_H = \left( \frac{V_H}{I} \right) \left( \frac{d}{B} \right) \quad (2.150)$$

เมื่อ  $V_H$  คือ ความต่างศักย์ไฟฟ้าฮอลล์หรือผลต่างระหว่างค่า  $V_{NP}$  ในขณะที่มีสนามแม่เหล็กและไม่มีสนามแม่เหล็ก

$D$  คือ ความหนาของชิ้นสารตัวอย่าง

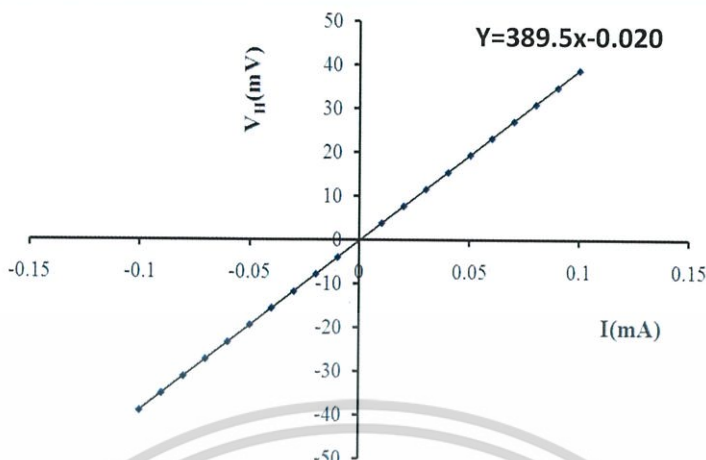
$B$  คือ ความเข้มของสนามแม่เหล็ก

จากสมการที่ (2.150) จะได้ว่า

$$R_H = \frac{V_H}{I} \left( \frac{d}{B} \right) \quad (2.151)$$

เมื่อทำการเขียนกราฟระหว่างค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าฮอลล์ ( $V_H$ ) กับค่ากระแสไฟฟ้า ( $I$ ) ที่ได้จากการทดลองเราจะได้ลักษณะกราฟดังรูปที่ 2.32 โดยที่ความชันของกราฟที่ได้จะเป็นค่า  $\frac{V_H}{I}$  ของสมการที่ (2.152)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.32 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าฮอลล์ ( $V_H$ ) กับค่ากระแสไฟฟ้า ( $I$ )

สภาพคล่องฮอลล์สามารถคำนวณได้จาก

$$\mu_H = \frac{R_H}{\rho} \quad (2.152)$$

เมื่อ  $h$  คือ ค่าคงตัวของพลังค์ =  $6.625 \times 10^{-34}$  จูล-วินาที

ในทางปฏิบัติการเตรียมชิ้นสารให้มีรูปทรงตามเงื่อนไขทั้ง 4 ข้อดังกล่าวอาจเป็นไปได้ยาก โดยเฉพาะขนาดและตำแหน่งของขั้วสัมผัสซึ่งมักไม่เป็นจุดและไม่อยู่ที่ขอบของชิ้นสารตามทฤษฎี จึงทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนของผลการวัด

**2.12 พหะข้างมากและพหะข้างน้อย** (งามนิทย์, 2530; ลีตินัย, 2546; งามนิทย์, 2550; Kittle, 2005; Runyan, 1975; van der pauw L.J., 1958; วีรัชัย, 2547; สุกฤษฏี, 2547; อุปลัมภ์, 2548; สมเกียรติ, 2542; ดุสิต, 2535; ดุสิต, 2542; Sze, 1981)

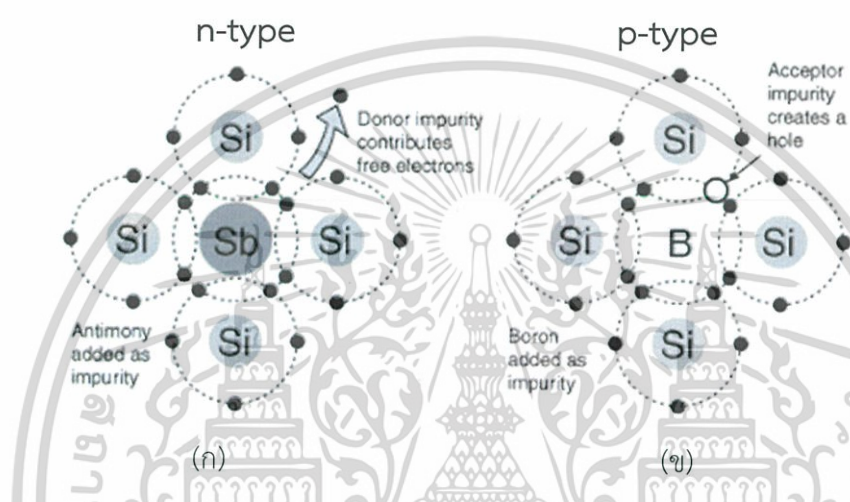
การเจือสารหมู่ 5 ลงไปในสารกึ่งตัวนำบริสุทธิ์ไม่เพียงทำให้เกิดอิเล็กตรอนเป็นพาหะนำไฟฟ้าเท่านั้น แต่ในตัวสารกึ่งตัวนำยังมีโฮลอยู่ด้วยเพียงแต่มีปริมาณน้อยกว่าอิเล็กตรอนเป็นอย่างมาก เราจึงเรียกอิเล็กตรอนในสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น เป็นพาหะข้างมาก และเรียกโฮลเป็นพาหะข้างน้อย ส่วนกรณีสารกึ่งตัวนำชนิดพี จะเรียกโฮล เป็นพาหะข้างมากและอิเล็กตรอนเป็นพาหะข้างน้อย ตารางที่ 2.5 เป็นการสรุปชนิดของพาหะข้างมากและพาหะข้างน้อยในสารกึ่งตัวนำชนิดพีและชนิดเอ็น ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.5 แสดงชนิดของพาหะในสารกึ่งตัวนำทั้งชนิดพีและชนิดเอ็น

| ชนิด                 | พาหะข้างมาก | พาหะข้างน้อย |
|----------------------|-------------|--------------|
| สารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น | โฮล         | อิเล็กตรอน   |
| สารกึ่งตัวนำชนิดพี   | อิเล็กตรอน  | โฮล          |

คุณสมบัติทางไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำบริสุทธิ์สามารถเปลี่ยนแปลงได้ด้วยการเจือจางสารที่ไม่บริสุทธิ์ลงไป ซึ่งเราเรียกว่า การโด๊ป (doping) การเจือสารปนเพียงเล็กน้อย จะเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของแถบพลังงานเป็นอย่างมาก



รูปที่ 2.33 แสดงการสร้างพันธะเคมีระหว่างอะตอมในสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นและชนิดพีของธาตุ Si

#### สารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น

สารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น ได้จากการเติมสารเจือที่เป็นอะตอมของธาตุหมู่ 5 ซึ่งมีวาเลนซ์อิเล็กตรอน 5 ตัว เช่น อะตอมของธาตุแอนติโมนี (Sb) อาร์เซนิก (As) หรือ ฟอสฟอรัส (P) เป็นต้น ลงในอะตอมของธาตุ Ge หรืออะตอมของธาตุ Si บริสุทธิ์ ดังรูปที่ 2.33(ก) แสดงให้เห็นว่า การเติมสารเจือที่เป็นอะตอมของธาตุหมู่ 5 (แอนติโมนี) ที่ทำให้เกิดวาเลนซ์อิเล็กตรอนที่ไม่มีคู่ที่อะตอมของสารเจืออิเล็กตรอนที่ไม่มีคู่นี้ เมื่อได้รับพลังงานเพียงเล็กน้อย ก็พร้อมที่จะเป็นอิเล็กตรอนอิสระที่นำไฟฟ้าได้ สารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น มีสภาพทางไฟฟ้าเป็นลบ (negative)

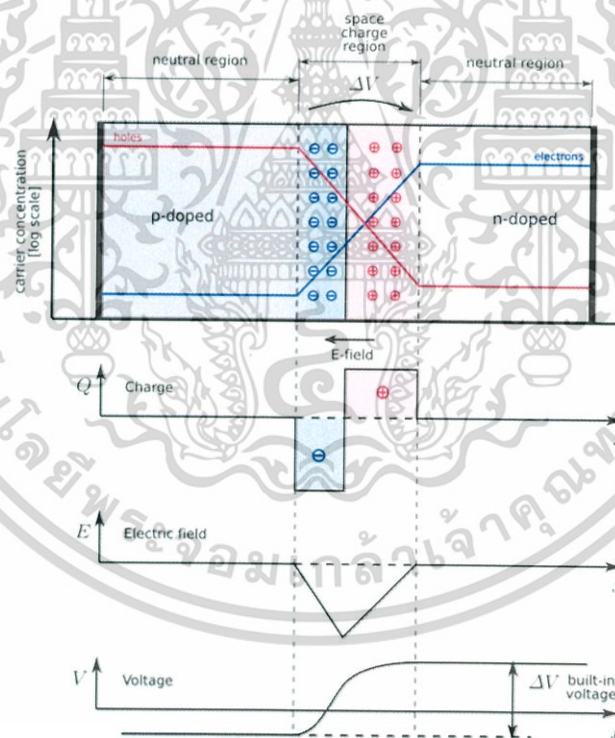
#### สารกึ่งตัวนำชนิดพี (p-type semiconductor)

สารกึ่งตัวนำชนิดพี จะได้รับการเติมสารเจือที่เป็นอะตอมของธาตุหมู่ 3 ที่มีวาเลนซ์อิเล็กตรอน 3 ตัว ได้แก่ อะตอมของโบรอน (B) แกลเลียม (Ga) หรือ อินเดียม (In) เป็นต้น ลงในอะตอมของธาตุ Ge หรืออะตอมของธาตุ Si บริสุทธิ์ดังรูปที่ 2.33(ข) แสดงให้เห็นว่าการเติมสารเจือที่เป็นธาตุหมู่ 3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.13 ไดโอดของสารกึ่งตัวนำที่มีรอยต่อแบบพี - เอ็น (p - n junction semiconductor) (งามนิตย์, 2530; ฐิตินัย, 2546; งามนิตย์, 2550; ฐิตินัย, 2552; Kittle, 2005; Runyan, 1975; van der pauw L J ,1958; วีรัชย์, 2547; สุกฤษฏี, 2547; อุปลัมภ์, 2548; สมเกียรติ, 2542; ดุสิต, 2535; ดุสิต, 2542; Sze, 1981)

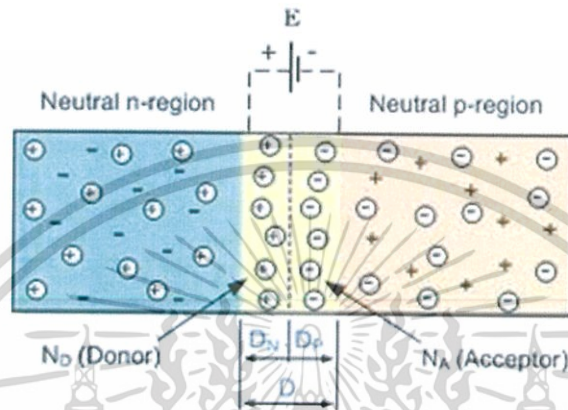
รอยต่อพี-เอ็นของสารกึ่งตัวนำมีความสำคัญเป็นอย่างมากทั้งในด้านไปประยุกต์ใช้ทางอิเล็กทรอนิกส์ที่ทันสมัย และในการทำความเข้าใจเกี่ยวกับสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำสมัยใหม่ ทฤษฎีรอยต่อพี - เอ็นของสารกึ่งตัวนำเป็นพื้นฐานความรู้พื้นฐานที่จำเป็นสำหรับฟิสิกส์ของสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำ ทฤษฎีพื้นฐานของลักษณะสมบัติกระแสไฟฟ้า - แรงดันไฟฟ้า ในรอยต่อพี-เอ็น ของสารกึ่งตัวนำได้ก่อตั้งขึ้นโดยชอคเคิลย์ ทฤษฎีนี้ได้รับการพัฒนาเพิ่มเติมโดย ชาร์ท (Sha) นอยซี (Noyce) และมอลล์ (Moll) ลักษณะสมบัติของกระแสไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้าของรอยต่อพี - เอ็นของสารกึ่งตัวนำที่เบี่ยงเบนไปจากกรณี อุดมคติมีสาเหตุมาจากหลายประการ เช่น การเกิดและรวมตัวของพาหะอิสระผ่านกับดักประจุบริเวณพร่องพาหะ การฉีดพาหะผ่านรอยต่อในปริมาณที่สูงและความต้านทานไฟฟ้าอนุกรม เป็นต้น รอยต่อพี - เอ็น ของสารกึ่งตัวนำเป็นสิ่งประดิษฐ์สองขั้ว โดยที่สมบัติของรอยต่อพี-เอ็นของสารกึ่งตัวนำจะขึ้นกับโปรไฟล์ของความเข้มข้นของสารเจือ รูปทรงเรขาคณิต ของรอยต่อและเงื่อนไขการไบแอส รอยต่อพี-เอ็น ของสารกึ่งตัวนำมีสมบัติการเรียงกระแสไฟฟ้า กล่าวคือ ยอมให้กระแสไฟฟ้าไหลได้ทางเดียว ซึ่งสามารถนำไปประดิษฐ์เป็นไดโอดต่างๆ เช่น ซีเนอร์ไดโอด อะวาลานซ์ไดโอด PIN ไดโอด วาริสเตอร์ และวาร์เรเตอร์ เป็นต้น



รูปที่ 2.34 แสดงไดโอดของสารกึ่งตัวนำที่มีรอยต่อแบบพี-เอ็น

สารกึ่งตัวนำชนิดพี หรือชนิดเอ็น เพียงอย่างเดียวอย่างหนึ่ง จะมีคุณสมบัติทางไฟฟ้าเป็นความต้านทานไฟฟ้า แต่ถ้าเราสามารถสร้างรอยต่อระหว่างสารกึ่งตัวนำชนิดพี และชนิดเอ็นได้อิเล็กตรอนในสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น จะแพร่ข้ามรอยต่อไปรวมกับโฮลในชนิดพี จับเป็นพันธะที่ไม่มีพาหะนำไฟฟ้า

หากทำการพิจารณาคร่าวๆ ที่ความเข้มข้นของสารเจือที่เท่ากัน อาจคิดว่า อิเล็กตรอนจะรวมกับโฮลจนหมดสิ้น และทำให้พาหะไม่นำไฟฟ้าตลอดทั้งเนื้อสาร ในความเป็นจริงจะพบว่าไม่เป็นเช่นนั้น เนื่องจากอะตอมของสารเจือของธาตุในหมู่ 5 ในสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น เมื่อไม่มีอิเล็กตรอนเคลื่อนที่ ก็จะแสดงอำนาจประจุไฟฟ้าบวก และอะตอมสารเจือของธาตุในหมู่ 3 ในสารกึ่งตัวนำชนิดพี เมื่อไม่มีโฮล ก็จะแสดงอำนาจประจุไฟฟ้าเป็นลบ จะสังเกตได้ว่าเกิดกำแพงสนามไฟฟ้าขัดขวางไม่ให้อิเล็กตรอนข้ามรอยต่อไปรวมกับโฮล



รูปที่ 2.35 แสดงการเกิดบริเวณปลอดพาหะที่บริเวณรอยต่อของสารกึ่งตัวนำที่มีรอยต่อแบบพี - เอ็น

การรวมตัวของอิเล็กตรอนกับโฮล จนไม่มีพาหะนำไฟฟ้า (จึงไม่นำไฟฟ้า) จะเกิดเฉพาะตรงบริเวณใกล้ๆ รอยต่อเท่านั้น บริเวณที่เกิดการรวมตัวนี้เรียกว่า บริเวณปลอดพาหะ (depletion region) ดังในรูปที่ 2.35 โดยความกว้างของบริเวณปลอดพาหะใน สภาฟโรสนามไฟฟ้าจากภายนอกจะขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของสารเจือและอุณหภูมิ

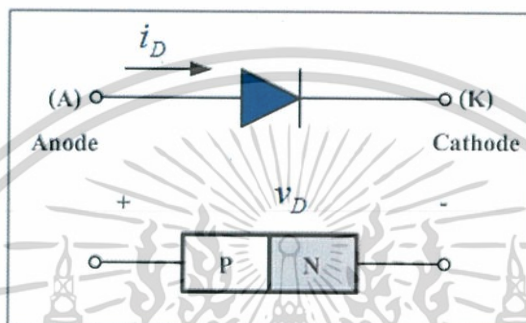
รอยต่อในสภาวะสมดุลเชิงความร้อน

แบบจำลองของรอยต่อพี-เอ็น ของสารกึ่งตัวนำในเชิงอุดมคติจะเริ่มพิจารณาที่รอยต่อแบบโฮโม (homojunction) ซึ่งทั้งสารกึ่งตัวนำชนิดพีและสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นเป็นวัสดุชนิดเดียวกัน จึงมีค่าช่องว่างแถบพลังงานเท่ากัน โดยเริ่มจากอิเล็กตรอนที่มีอยู่จำนวนมากในสารกึ่งตัวนำชนิดพีจะแพร่เข้าไปยังสารกึ่งตัวนำชนิดพี ซึ่งมีอิเล็กตรอนอยู่น้อยมาก ในทำนองเดียวกันโฮล ที่มีอยู่จำนวนมากในสารกึ่งตัวนำชนิดพี จะแพร่เข้าไปยังด้านเอ็น ซึ่งมีโฮลอยู่น้อยมาก การแพร่ของพาหะเหล่านี้จะทำให้เนื้อสารขาดความเป็นกลางทางไฟฟ้า นั่นคือสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นจะสูญเสียอิเล็กตรอนอิสระไป ทำให้บริเวณสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นที่ใกล้รอยต่อแสดงอำนาจไฟฟ้าเป็นบวก เนื่องจากมีประจุของไอออนของอะตอมผู้ให้ถูกทิ้งไว้ สำหรับทางสารกึ่งตัวนำชนิดพีก็จะมีลักษณะคล้ายๆ กัน คือ มีไอออนของอะตอมผู้รับวิ่งมีประจุเป็นลบ ปรากฏอยู่ยังมีผลให้เกิดสนามไฟฟ้าที่รอยต่อ โดยที่สนามไฟฟ้ามักทิศทางจากสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นไปทางสารกึ่งตัวนำชนิดพี ดังนั้นการแพร่ของโฮลและอิเล็กตรอนจะลดลง เนื่องจากอิทธิพลของสนามไฟฟ้าที่ต้านการแพร่ซึม บริเวณรอยต่อนี้จึงปลอดพาหะอิสระและเรียกบริเวณนี้ว่า บริเวณปลอดพาหะ (depletion region) หรือบางครั้งเรียกว่า บริเวณประจุค้าง (space charge region) เนื่องจากมีประจุของไอออนสารเจืออยู่ ซึ่งเป็นประจุที่ถูกตรึงอยู่กับที่ (fixed charge) ไม่ใช่ประจุอิสระ

ปกติไดโอดเป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่มี 2 ขา ซึ่งมีลักษณะพิเศษคือ กระแสไหลผ่านได้ในทิศทางเดียว ซึ่งจากคุณสมบัติพิเศษนี้จึงสามารถนำไดโอดมาใช้เป็นตัวแปลงไฟฟ้ากระแสสลับเป็นกระแสตรง วงจรในภาครับของวิทยุ เป็นต้น

### โครงสร้างและสัญลักษณ์ของไดโอด

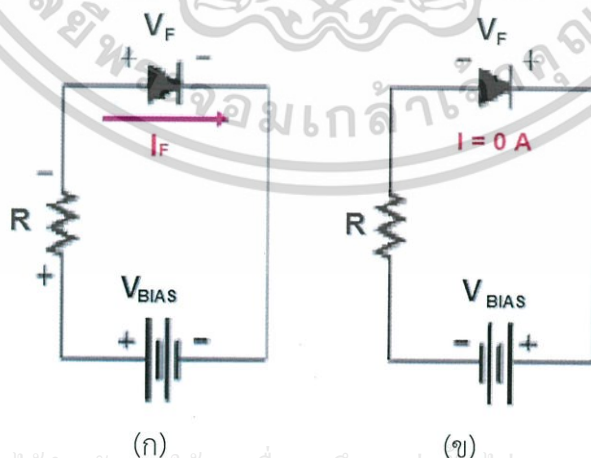
ไดโอดสามารถได้จากรอยต่อพี-เอ็น โดยการดึงขาที่ด้านสารกึ่งตัวนำชนิดพี เป็นขาอานอด (anode : A) และให้สารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น เป็นขาคาทอด (cathode : K) สัญลักษณ์จะใช้ลูกศรแทนขาอานอด โดยทิศทางของลูกศรเป็นทิศทางการไหลของกระแสสมมติ (ตรงข้ามกับทิศทางการไหลของอิเล็กตรอน) และใช้ขีดแทนขาคาทอด



รูปที่ 2.36 แสดงลักษณะของโครงสร้างอย่างง่ายและสัญลักษณ์ของไดโอดของสารกึ่งตัวนำที่มีรอยต่อแบบพี-เอ็น

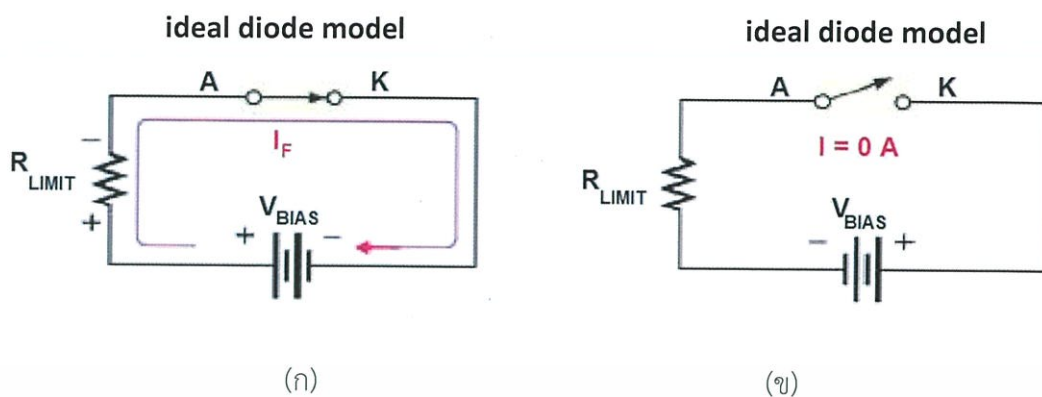
### ไดโอดอุดมคติ

เพื่อให้ง่ายต่อการวิเคราะห์การทำงานของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ เราสามารถใช้แบบจำลองซึ่งเป็นวงจรไฟฟ้าแบบพื้นฐานมาแทนการทำงานของอุปกรณ์ที่เราพิจารณาอยู่ รูปที่ 2.37 ใช้เป็นภาพแสดงการไบแอสไดโอดทั้งแบบไบแอสตรงและไบแอสย้อนกลับ รูปที่ 2.38(ก) แสดงการสวิตช์ปิดวงจรแทนไดโอดเมื่อได้รับไบแอสตรง และรูปที่ 2.38(ข) ใช้สวิตช์เปิดวงจรแทนไดโอดเมื่อได้รับไบแอสย้อนกลับ



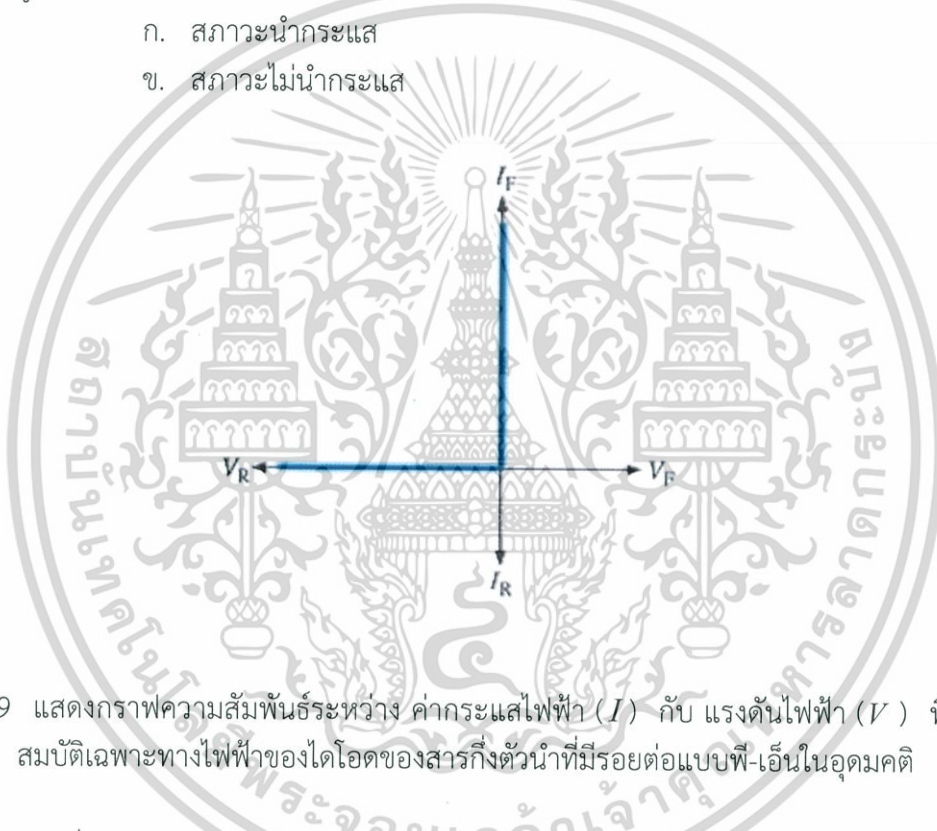
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
รูปที่ 2.37 แสดงการจ่ายแรงดันไฟฟ้าแก่ไดโอดของสารกึ่งตัวนำที่มีรอยต่อแบบพี-เอ็น

- ก. วงจรไดโอดแบบไบแอสตรง
- ข. วงจรไบแอสแบบย้อนกลับ



รูปที่ 2.38 แสดงการเปิดปิดสวิตช์ของวงจรไดโอดของสารกึ่งตัวนำที่มีรอยต่อแบบพี - เอ็น

- ก. สถานะนำกระแส
- ข. สถานะไม่นำกระแส

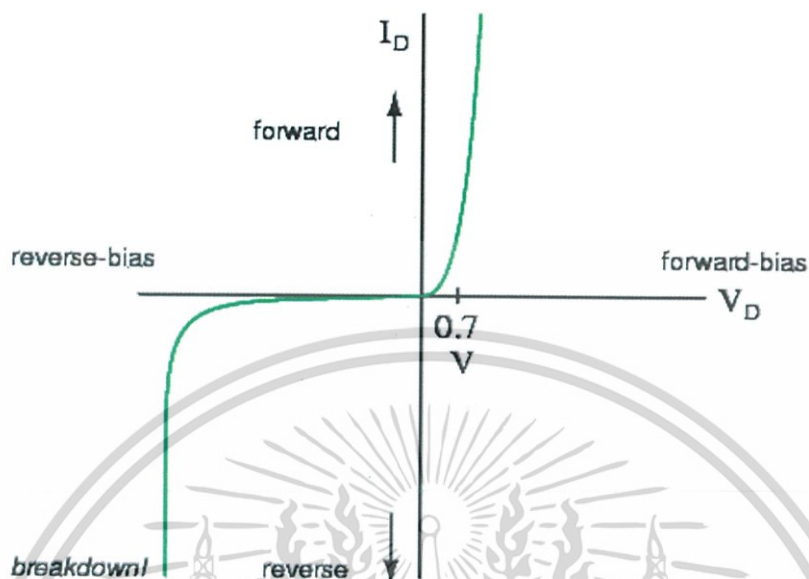


รูปที่ 2.39 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่ากระแสไฟฟ้า ( $I$ ) กับ แรงดันไฟฟ้า ( $V$ ) ที่แสดงสมบัติเฉพาะทางไฟฟ้าของไดโอดของสารกึ่งตัวนำที่มีรอยต่อแบบพี-เอ็นในอุดมคติ

จากรูปที่ 2.39 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า  $I-V$  ของไดโอดอุดมคติ ซึ่งจะเห็นได้ว่าไดโอดอุดมคติไม่มีแรงดันตกคร่อมและความต้านทานไฟฟ้าเป็นศูนย์เมื่อไบแอสตรง และไดโอดอุดมคติมีกระแสรั่วไหลเป็นศูนย์และความต้านทานไฟฟ้าเป็นอนันต์เมื่อได้รับกระแสไบแอสย้อนกลับ

รูปที่ 2.40 เป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า  $I-V$  ของไดโอดของสารกึ่งตัวนำที่ได้จากที่มีรอยต่อแบบพี-เอ็น ที่สร้างจากสารกึ่งตัวนำ Si จะสังเกตเห็นได้ว่าเมื่อแรงดันไบแอสตรง  $V_F$  มีค่าเป็นบวกประมาณ 7 โวลต์ กระแสไฟฟ้าสามารถไหลผ่านไดโอดได้อย่างสะดวก เมื่อพิจารณาความชันของเส้นกราฟจะพบว่ามีความต้านทานไฟฟ้าต่ำ แต่เมื่อแรงดันไบแอสตรงต่ำกว่า 0-7 โวลต์ กระแสไฟฟ้าจะไหลผ่านรอยต่อน้อยมาก หากแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมรอยต่อมีค่าน้อยกว่าศูนย์จะเป็นการให้ไบแอสย้อนกลับ กระแสที่ไหลผ่านจะเกิดจากพาหะข้างน้อย เมื่อพิจารณาความชันจะพบว่ามีความต้านทานไฟฟ้าสูงมาก แต่เมื่อให้แรงดันไบแอสย้อนกลับมีค่าต่ำมากจนถึงจุดหนึ่ง จะพบว่าจะมีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านรอยต่อเป็นจำนวนมาก เราเรียกแรงดันไฟฟ้าที่จุดนี้ว่า แรงดันพังทลาย (break down voltage :  $V_{BR}$ ) ผลของอุณหภูมิมิมีผลต่อรอยต่อตั้งนี้ เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น

แรงดันไฟฟ้าตกคร่อมรอยต่อขณะไบแอสตรงและแรงดันพังทลาย  $V_{BR}$  ขณะไบแอสย้อนกลับมีค่าลดลง กระแสไฟฟ้าวัดในกรณีนี้  $V_{BR} < V < V_F$  จะเพิ่มสูงขึ้น



รูปที่ 2.40 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่ากระแสกระแสไฟฟ้า ( $I$ ) กับ แรงดันไฟฟ้า ( $V$ ) ที่แสดงสมบัติเฉพาะทางไฟฟ้าของไดโอดของสารกึ่งตัวนำที่มีรอยต่อพี-เอ็น

2.14 อิมพีแดนซ์ของวงจร RC ต่อแบบอนุกรมและต่อแบบขนาน (ฐิตินัย, 2550; Runyan, 1975; Elangovan, 2003; Fahrenbruch, 1983; Van Der Pauw, 1958; ดุสิต, 2535; Gangopadhyay, 2004)

#### 2.14.1 วงจร RC ต่อแบบอนุกรม

มีลักษณะคล้ายกับตัวต้านทานสองตัวต่ออนุกรมกัน อิมพีแดนซ์สุทธิจะเท่ากับผลรวมของอิมพีแดนซ์ของตัวต้านทาน ( $Z_R$ ) กับอิมพีแดนซ์ของตัวเก็บประจุ ( $Z_C$ ) ซึ่งจะได้ว่า

$$Z_{RC} = Z_R + Z_C \quad (2.153)$$

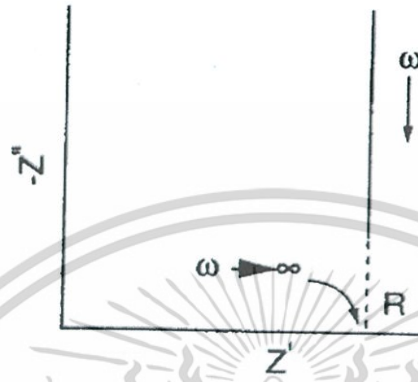
อย่างไรก็ตามค่า  $Z_C$  จะขึ้นอยู่กับความถี่ ดังนั้นจำเป็นต้องเขียนค่าของ  $Z_C$  ในรูปของจำนวนจินตภาพของเลขจำนวนเชิงซ้อนของค่าอิมพีแดนซ์ โดยที่  $j = \sqrt{-1}$  ดังนั้น

$$Z_C = \frac{1}{j\omega C} = \frac{-1}{\omega C}$$

เอกส และ  $Z_R = R_S$  แล้วจะได้ว่า สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$Z_{RC} = R_S - \frac{j}{\omega C} \quad (2.154)$$

โดยที่  $R_s$  เป็นจำนวนจริงของอิมพีแดนซ์ ส่วน  $\frac{1}{\omega C}$  เป็นจำนวนจินตภาพของอิมพีแดนซ์ เมื่อความถี่เข้าใกล้อนันต์หรือกรณี  $C$  มีค่าใหญ่มาก แล้วจะได้ว่า  $Z_{RC}$  เข้าสู่อิมพีแดนซ์  $R_s$  จากกราฟของไนควิสต์ (Nyquist plot) จุดตัดแกน  $Z'$  จะเป็นค่าของ  $Z_R$  ดังรูปที่ 2.41



รูปที่ 2.41 แสดงกราฟของไนควิสต์ที่ระบุถึงค่าอิมพีแดนซ์ของวงจร RC ต่ออนุกรมอย่างง่าย

#### 2.14.2 วงจร RC ต่อแบบขนาน

ในกรณี  $Z_R$  กับ  $Z_C$  ต่อขนานกันดังรูปที่ 2.42 แล้วอิมพีแดนซ์จะมีค่าดังนี้คือ

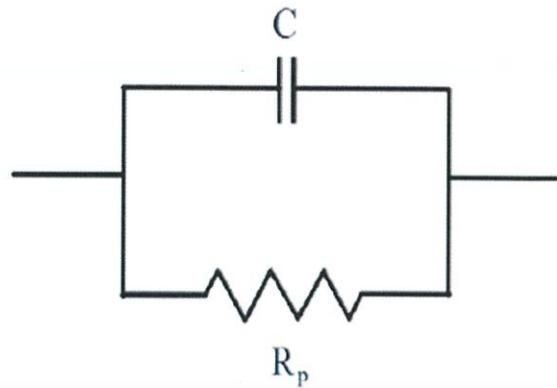
$$\frac{1}{Z_{RC}} = \frac{1}{Z_R} + \frac{1}{Z_C} \quad (2.155)$$

ในกรณีนี้ให้  $Z_R = Z_p$ ,  $Z_R = R_p$  ดังรูปที่ 2.42 ดังนั้นสมการ (2.155) จะกลายเป็น

$$\frac{1}{Z_{RC}} = \frac{1}{R_p} + j\omega C \quad (2.156)$$

$$= \frac{(1 + j\omega R_p C)}{R_p} \quad (2.157)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.42 แสดงวงจร RC ต่อแบบขนานอย่างง่าย

เพื่อที่จะแยกจำนวนจริงและจำนวนจินตภาพออกจากกัน จำเป็นต้องใช้ค่าคอนจูเกต  $(1 - j\omega R_p C)$  คูณทั้งตัวตั้งและตัวหารของสมการที่ (2.157) จะได้

ตั้งนั้น

$$\begin{aligned} \frac{1}{Z_{RC}} &= \frac{(j\omega R_p C + 1)(j\omega R_p C - 1)}{R_p(j\omega R_p C - 1)} \\ &= - \left[ \frac{\omega^2 R_p^2 + 1}{R_p(j\omega R_p C - 1)} \right] \\ Z_{RC} &= - \left[ \frac{j\omega R_p^2 C - R_p}{\omega^2 R_p^2 C + 1} \right] \quad (2.158) \\ Z_{RC} &= \frac{R_p}{\omega^2 R_p^2 C + 1} - j \left( \frac{\omega R_p^2 C}{\omega^2 R_p^2 C + 1} \right) \\ &= Z' - jZ'' \end{aligned}$$

โดยที่

$$Z' = \frac{R_p}{\omega^2 R_p^2 C + 1} = \frac{R_p}{(\omega\tau)^2 C + 1} \quad (2.159)$$

และ

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเพื่อทำซ้ำโดยไม่ได้รับอนุญาต

$$= -(1 + \omega^2 C_p R_p^2)(C_p R_p^2) + (\omega C_p R_p^2)(2\omega C_p^2 R_p^2) \text{ เรนนำไปใช้}$$

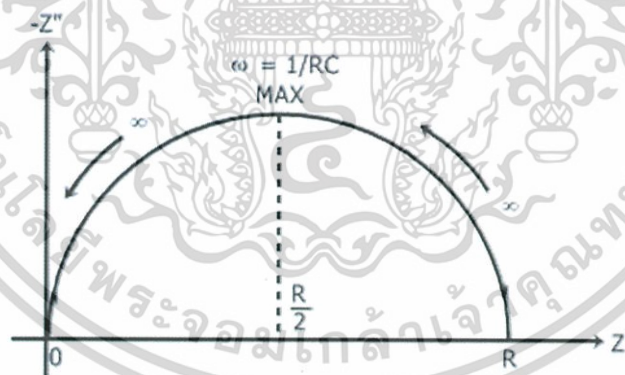
$$\begin{aligned}
 &= -(C_p R_p^2) - (\omega^2 C_p^3 R_p^4) + (2\omega^2 C_p^3 R_p^4) \\
 \frac{1}{C_p R_p^2} \text{ คูณตลอด} &= -1(\omega^2 C_p^2 R_p^2) + (2\omega^2 C_p^2 R_p^2) \\
 &1 = (-\omega^2 + 2\omega^2) C_p^2 R_p^2 \\
 &1 = \omega^2 C_p^2 R_p^2
 \end{aligned}$$

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

$$Z'' = R_p \left[ \frac{\omega\tau}{(\omega\tau)^2 + 1} \right] \quad (2.160)$$

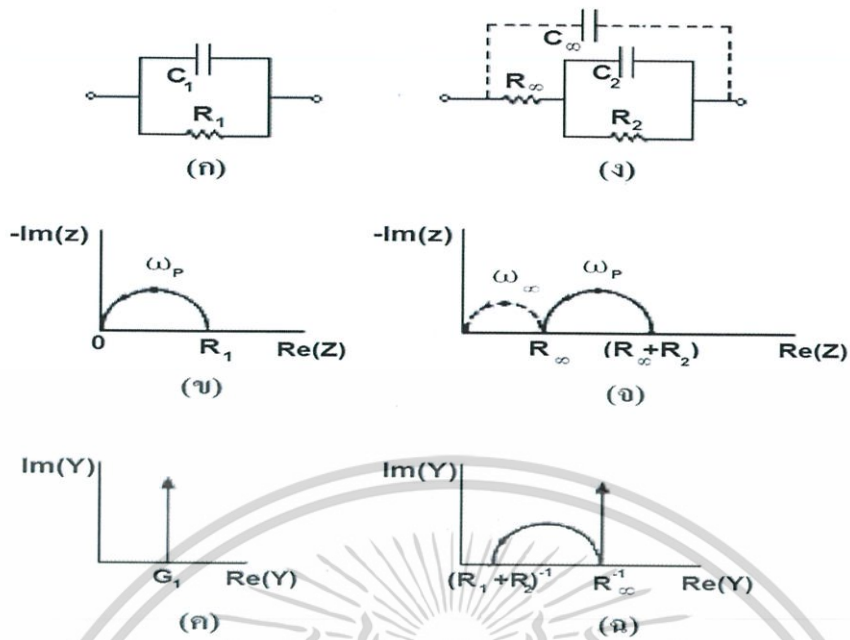
เมื่อ  $\tau$  คือ ค่าคงตัวเวลา (time constant)  $= R_p C$

กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า  $Z'$  กับ  $Z''$  จะเรียกว่ากราฟของไนควิสต์ ซึ่งกราฟวงจร  $RC$  ต่อแบบขนานอย่างง่ายจะแสดงดังรูปที่ 2.43



รูปที่ 2.43 แสดงกราฟของไนควิสต์ของวงจร  $RC$  ต่อแบบขนานอย่างง่ายที่จุดสูงสุดของรูปครึ่งวงกลมเกิดขึ้นเมื่อ  $\omega = \frac{1}{RC}$

วงจร  $RC$  ต่อแบบขนานอย่างง่ายสองรูปแบบที่แสดงตามกราฟของอิมพีแดนซ์สเปกโทรสโกปี (impedance spectroscopy) และ กราฟของแอดมิตแตนซ์สเปกโทรสโกปี (admittance spectroscopy) ดังรูปที่ 2.44



รูปที่ 2.44 แสดงวงจร RC ต่อแบบขนานอย่างง่าย (ก,ง) กราฟของอิมพีแดนซ์สเปกโทรสโกปี (ข,ฉ) และกราฟของแอดมิตแตนซ์สเปกโทรสโกปี (ค,ฅ)

จากข้อมูลการทดลองจะทำให้รู้ค่า  $f_{\max} = (LF)$  ที่ความถี่ต่ำ และจากจุดตัดแกน  $X$  จะได้ค่า  $R_1$  และ  $R_2$  เราสามารถคำนวณหาค่า  $C_2$  ได้จากสูตร

$$\omega_{\max} R_2 C_2 = 1$$

$$C_2 = \frac{1}{\omega_{\max} R_2} = \frac{1}{2\pi f_{\max} (HF) R_2} \quad (2.161)$$

โดยปกติค่า  $CPE_2$  จะมากกว่า  $C_2$  เล็กน้อย ดังนั้นเมื่อรู้ค่า  $C_2$  แล้วก็จะทราบค่า  $CPE_2$  อย่างคร่าวๆ ได้ แล้วจะนำค่าไปใส่โปรแกรม EIS เพื่อจำลองแบบต่อไป

ในทำนองเดียวกันที่ความถี่สูง เราจะได้ค่า  $R_1$  และจะรู้ค่า  $f_{\max} = (LF)$  อย่างคร่าวๆ ได้จากการจำลองแบบ ดังนั้น เราสามารถคำนวณค่า  $C_1$  ได้จากสูตร

$$\omega_{\max} R_1 C_1 = 1$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งาน  $C_1 = \frac{1}{\omega_{\max} R_1} = \frac{1}{2\pi f_{\max} (HF) R_1}$  (2.162) สำหรับการคำนวณค่าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยปกติค่า  $CPE_1$  จะมากกว่า  $C_1$  เล็กน้อย ดังนั้นเมื่อรู้ค่า  $C_1$  แล้วก็จะทราบค่า  $CPE_1$  อย่างคร่าวๆ ได้

อีเล็กโทรดที่ใช้ทำขั้วไฟฟ้าของสิ่งประดิษฐ์ที่ใช้ในการทดลองจะก่อให้เกิดความจุไฟฟ้าที่เรียกว่า ความจุเรขาคณิต (geometrical capacitance:  $C_{geo}$ ) ซึ่งก็คือ  $C_\infty$  ซึ่งก็คือ  $C_1$  ในรูปที่ 2.44 ส่วนค่าความต้านทานของเนื้อสารตัวอย่าง (bulk resistance :  $R_b$ ) ซึ่งก็คือ  $R_\infty$  หรือ  $R_1$  แล้วค่าคงตัวเวลา  $\tau = R_\infty C_\infty = R_1 C_1$  ความหมายของค่าคงตัวเวลานี้ก็คือ ค่าเวลาผ่อนคลายไดอิเล็กทริก ( $\tau_D$ ) ของสารตัวอย่างที่ใช้ศึกษานั้นเอง ความถี่เชิงมุม ( $\omega$ ) ที่ทำให้  $Z''$  มีค่าสูงสุดคือ  $\omega_p$  และจะปรากฏอยู่ที่จุดบนสุดของกราฟครึ่งวงกลมในรูปที่ 2.44(ข) ซึ่งที่จุดบนสุดนี้จะสอดคล้องกับเงื่อนไข  $\omega_p \tau_D = 1$  โดยทั่วไป  $\tau_D < 10^{-7}$  วินาที ที่ความถี่เชิงมุมสูงสุด ( $\omega_{max}$ ) ของเครื่องมือที่ใช้วัดและภายใต้เงื่อนไข  $\omega_{max} \tau_D \leq 1$  มักจะไม่ปรากฏค่า  $Z''$  ในกราฟของอิมพีแดนซ์สเปกโทรสโกปี อย่างไรก็ตามเมื่อลดอุณหภูมิของสารตัวอย่างลงแล้ว  $\tau_D$  จะเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ส่วนโค้งของกราฟ (arc) ปรากฏขึ้นในอิมพีแดนซ์สเปกโทรสโกปี แต่ถ้าอยู่ภายใต้เงื่อนไข  $\omega_{max} \tau_D \leq 1$  แล้วรูปครึ่งวงกลมจะปรากฏอยู่ในกราฟของอิมพีแดนซ์สเปกโทรสโกปี

นอกจากกรณีที่  $R_1 = R_\infty$  และ  $C_1 = C_\infty$  ซึ่งทำให้กราฟครึ่งวงกลม 1 อัน ถ้าอีเล็กโทรดนี้อยู่ในสารละลายเคมี ขณะที่ปฏิกิริยาเคมีเกิดขึ้น เราจะให้  $R_1 = R_R$  และ  $C_1 = C_R$  เมื่อ  $R_R$  คือ ค่าความต้านทานไฟฟ้าขณะเกิดปฏิกิริยาเคมี ส่วน  $C_R$  คือ ค่าความจุไฟฟ้าของบริเวณโพลาริเซชัน (polarization region) ในสารละลายที่อยู่ชิดกับขั้วอีเล็กโทรด ซึ่งในวงจร  $RC$  ของรูปที่ 2.44(ง) ได้กำหนดให้  $R_2 = R_R$  และ  $C_2 = C_R$  ส่วนรูปที่ 2.44(จ) จะแสดงกราฟรูปครึ่งวงกลม 2 รูป ซึ่งค่าคงตัวของเวลาคือ  $R_\infty C_\infty \leq R_2 C_2$  และกราฟรูปครึ่งวงกลมที่เกิดจาก  $R_\infty$  และ  $C_\infty$  จะแสดงจุดไข่ปลาดังรูปที่ 2.44(จ) ซึ่งมักจะเกิดที่ความถี่สูงมากกว่าความถี่ที่เครื่องมือทั่วไปวัดได้ ในกราฟอิมพีแดนซ์สเปกโทรสโกปี ลูกศรจะชี้ทิศทางของความถี่ของการวัดที่เพิ่มขึ้น และนิยมเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า  $-\text{Im}(Z)$  กับ  $\text{Re}(Z)$  มากกว่าที่จะเป็นความสัมพันธ์ระหว่างค่า  $\text{Im}(Z)$  กับ  $\text{Re}(Z)$  เพื่อให้กราฟส่วนใหญ่ปรากฏในควอดแรนต์ที่ 1 ดังนั้น จึงเขียนความสัมพันธ์ใหม่เป็น  $Z^* = Z' - jZ''$  และเขียน  $\text{Im}(Z^*)$  แทน  $-\text{Im}(Z)$

สำหรับแอดมิตแตนซ์สเปกโทรสโกปีของวงจร  $RC$  ต่อขนานของวงจрдังรูปที่ 2.44(ก) ค่าแอดมิตแตนซ์ลัฟท์ คือ ผลรวมของแอดมิตแตนซ์ของตัวต้านทาน ( $G_1$ ) กับแอดมิตแตนซ์ของตัวเก็บประจุ ( $j\omega C_1$ ) ดังนั้นจะได้ว่า

$$Y_a = G_1 + j\omega C_1 \quad (2.163)$$

กราฟของสมการที่ (2.163) จะปรากฏอยู่ในรูปที่ 2.44(ค) ส่วนแอดมิตแตนซ์ของวงจร รูปที่ 2.44(ง) จะแสดงดังความสัมพันธ์

$$Y_a = j\omega C_\infty + \frac{j\omega R_2 C_2}{(R_2 + R_\infty) + j\omega C_2 R_2 R_\infty} \quad (2.164)$$

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และ การทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่งกราฟของสมการที่ (2.164) จะปรากฏอยู่ในรูปที่ 2.44(ฉ) อย่างไรก็ตามกราฟของความเข้าใจกลไกทางฟิสิกส์เคมีของปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นขณะทำการทดลอง ดังนั้นได้มีการเพิ่มแกนที่สามขึ้นมา คือแกน  $\log f$  เพื่อให้เป็น 3 มิติ

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

$$(Z'')^2 - RZ' + (Z')^2 = 0 \quad (2.165)$$

ซึ่งสามารถเขียนใหม่ได้เป็น

$$(Z'')^2 + \left(Z' - \frac{R}{2}\right)^2 = \left(\frac{R}{2}\right)^2 \quad (2.166)$$

โดยรัศมีของครึ่งวงกลมคือ  $R/2$  ดังปรากฏในรูปที่ 2.44 ในกรณีที่ความต้านทานอนุกรม ( $R_s$ ) ของวงจรมีค่าเป็นศูนย์ เราจะได้ว่า จุดตัดแกน  $Z'$  จะอยู่ที่ 0 และ  $R$

### 2.14.3 กราฟของโบด (Bode plot)

อิมพีแดนซ์  $Z^* = Z' + jZ''$  สามารถจะเขียนอยู่ในรูปแบบโคออร์ดิเนตตั้งฉาก (rectangular coordinate) และโคออร์ดิเนตเชิงเส้น (polar coordinate) โดยมีความสัมพันธ์ดังรูปที่ 2.45 ดังนี้คือ

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

และ

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

$$\phi = \tan^{-1} \left( \frac{Z''}{Z'} \right) \quad (2.167)$$

โดยที่โมดูลัสคือ

$$|Z| = \left[ (Z')^2 + (Z'')^2 \right]^{1/2} \quad (2.168)$$

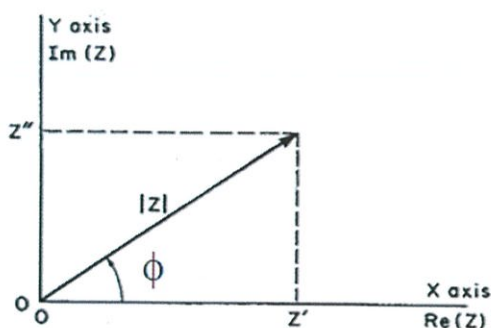
จากความสัมพันธ์ของออยเลอร์ (Euler relation)

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

ดังนั้น

$$Z = |Z| \exp(j\phi) \quad (2.169)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

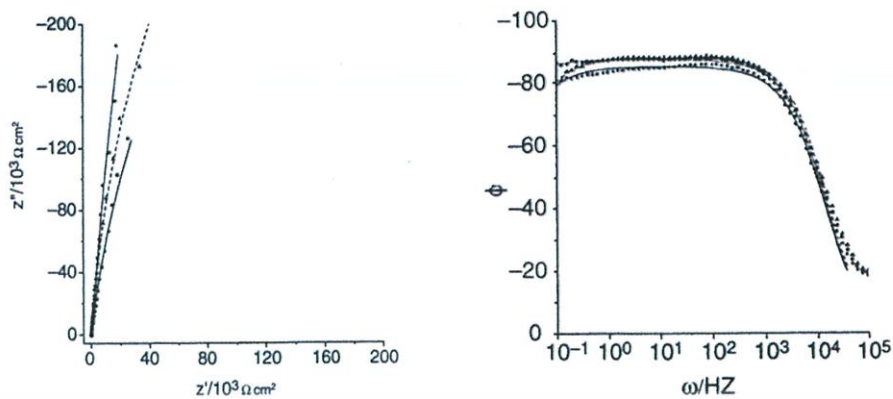


รูปที่ 2.45 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าอิมพีแดนซ์ของโคออร์ดิเนตตั้งฉาก กับ โคออร์ดิเนตเชิงขั้วมุมเฟสระหว่างทิศทางของ  $Z'$  และ  $Z''$  จะขึ้นกับค่าความถี่ที่ใช้ วัดในกรณีที่เป็นตัวเก็บประจุสมบรูณ์แบบ (pure capacitor) มุมเฟส  $\phi = -90$  องศา และมุมเฟสของตัวต้านทานจะมีค่าเป็นศูนย์

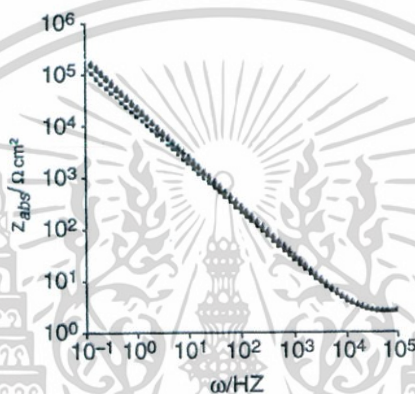
กราฟของโบทจะแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า  $|Z|$  กับค่าความถี่และมุมเฟสกับความถี่ โดยแกนความถี่จะเป็นลอการิทึม (logarithmic scale) ข้อดีของกราฟของโบท คือ น้ำหนัก (weight) ของอิมพีแดนซ์ทั้งความถี่สูงและที่ความถี่ต่ำจะมีค่าเท่ากัน ในขณะที่กราฟของโนควิสต์ค่าอิมพีแดนซ์ จะไปรวมกระจุกอยู่ในย่านความถี่ค่าสูงๆ ในกรณีตัวเก็บประจุสมบรูณ์ที่ความถี่เชิงมุม  $\omega \rightarrow 0$  แล้ว มุมเฟส  $\phi = -90$  องศา กราฟของมุมเฟสที่วัดได้มักจะมีแนวโน้มไปจากมุม  $-90$  องศา

แสดงว่าไม่ใช่เป็นตัวเก็บประจุแบบสมบรูณ์ ดังนั้นพฤติกรรมที่เบี่ยงเบนไปจะถูกจำลองให้อยู่ในพจน์ของอีลิเมนต์เฟสคงที่ (constant phase element : CPE) ตัวอย่างของกราฟโบทสำหรับค่าอิมพีแดนซ์ ( $Z$ ) และมุมเฟสจะแสดงดังรูปที่ 2.46 พฤติกรรมที่เปลี่ยนไปนี้จะขึ้นอยู่กับผิวหน้าของอิเล็กโทรด เช่น ความไม่เรียบของผิวหน้าอิเล็กโทรดและระดับความสมบรูณ์ของผลิตภัณฑ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก.)



(ข.)

รูปที่ 2.46 แสดงกราฟโบดที่เป็นกรณี ความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าอิมพีแดนซ์ ( $Z$ ) และมุมเฟส  
 ก. แสดงกราฟไนควิสต์และกราฟของโบด  
 ข. แสดงกราฟของอิมพีแดนซ์ของวงจรที่มีตัวเก็บประจุของบริเวณโพลาริเซชันที่อยู่ชิดกับขั้วอิเล็กโทรด

ค่าอิมพีแดนซ์ของ  $CPE$  จะนิยามโดยค่าของ  $P$  และ  $n$  เมื่อ  $P$  คือค่าคงตัวที่ไม่ขึ้นอยู่กับความถี่ ส่วน  $n$  เป็นพารามิเตอร์ที่ไม่มีหน่วย และมีค่าอยู่ระหว่าง  $0 \leq n \leq 1$  แต่โดยทั่วไป จะมีค่าอยู่ระหว่าง 0.8 ถึง 0.99 จำนวนจริงของ  $Z(CPE)$  จะเกี่ยวข้องกับความต้านทานไฟฟ้า (resistance) และแปรตาม  $\omega^{-n}$  ส่วนจำนวนจริงจินตภาพจะเกี่ยวกับค่าความจุไฟฟ้า (capacitance) และแปรตาม  $\omega^{-n}$  ด้วยเหมือนกัน ซึ่งจะแสดงได้ดังนี้คือ

$$Z(CPE) = \frac{1}{P(j\omega)^n} \quad (2.170)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ส่วนความจุเนื่องจากบริเวณโพลาริเซชันที่อยู่ชิดกับขั้วอิเล็กโทรด (double – layer capacitance :  $C_{dl}$ ) จะแสดงได้ดังนี้คือ

$$Cd1 = \sqrt{\frac{P}{R_s^{(n-1)}}} \quad (2.171)$$

พารามิเตอร์  $n$  จะสัมพันธ์กับมุมเฟส  $\phi$  ดังนั่นคือ  $\phi = n\left(\frac{\pi}{2}\right)$  ถ้ามุมเฟส  $\phi$  เข้าใกล้ 1 ก็ จะประพฤติตัวเป็นตัวเก็บประจุสมบูรณโดยมุมเฟสมีหน่วยเป็นเรเดียน

## 2.15 การระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ (close-spaced sublimation: CSS) (งามนิตย์, 2545; ฐิตินัย, 2549; ฐิตินัย, 2550; งามนิตย์, 2551; ฐิตินัย, 2551)

การระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ เป็นกระบวนการเกิด ก้อนเนื้อผลึก (bulk) หรือฟิล์มบางของสารตั้งต้นที่กลายเป็นไอแล้วควบแน่นบนแผ่นฐานรองรับที่วาง อยู่บนสารตั้งต้นในระบบปิดในกระบวนการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดภายในระบบ สุญญากาศ สามารถให้อัตราการเคลือบต่ำ ในกระบวนการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะ ประชิดนี้ พิจารณาสมดุลปฏิกิริยาเคมีระหว่างสารตั้งต้นและแผ่นฐานรองรับดังสมการ



จากกฎการคงตัวของมวล (law of mass action) พิจารณาสภาวะสมดุลเชิงความร้อน

$$P\left(\frac{Cd}{CdTe}\right) P^{\frac{1}{2}}\left(\frac{Te_2}{CdTe}\right) = K_p(T) \quad (2.173)$$

เมื่อ  $P$  คือ ความดัน

$K_p(T)$  คือ ค่าคงตัวของปฏิกิริยาที่สภาวะสมดุลเชิงความร้อนที่อุณหภูมิใดๆ

ซึ่งค่าคงตัวของปฏิกิริยาที่สภาวะสมดุลเชิงความร้อน  $K_p(T)$  มีความสัมพันธ์ตามสมการ

$$K_p(T) = \exp\left[\frac{\Delta G}{RT}\right] \quad (2.174)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

เมื่อ  $\Delta G(T)$  คือ พลังงานอิสระของกิบส์  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำแคดเมียมเทลลูไรด์  $\Delta G_{CdTe} = +6.864 - 44.94 \times 10^{-3} T \frac{kcal}{mol}$

เมื่อพิจารณาค่าคงตัวของปฏิกิริยาที่สภาวะสมดุลเชิงความร้อน  $K_p(T)$  ของสารตั้งต้นที่มีอุณหภูมิ ( $T_{so}$ ) และแผ่นฐานรองรับที่มีอุณหภูมิ ( $T_{sub}$ ) มีความสัมพันธ์ตามสมการ

$$K_p(T_{so}) = P\left(\frac{Cd}{CdTe}\right)(T_{so})P^{\frac{1}{2}}\left(\frac{Te_2}{CdTe}\right)(T_{so}) = \exp\left[\frac{-\Delta G}{RT_{so}}\right] \quad (2.175)$$

$$K_p(T_{sub}) = P\left(\frac{Cd}{CdTe}\right)(T_{sub})P^{\frac{1}{2}}\left(\frac{Te_2}{CdTe}\right)(T_{sub}) = \exp\left[\frac{-\Delta G}{RT_{sub}}\right] \quad (2.176)$$

ฟลักซ์ของการแพร่ของอะตอมของธาตุ  $Cd$  และโมเลกุลของแก๊ส  $Te_2$  ระหว่างสารตั้งต้นและแผ่นฐานรองรับซึ่งวางห่างกันเป็นระยะ  $d$  ซึ่งอธิบายได้ด้วยกฎข้อ 1 ของ Fick (Fick's first law)

$$J_{Cd,j} = \frac{C_{Cd,j}}{Rd} \left[ \frac{P_{Cd}(T_{so})}{T_{so}} - \frac{P_{Cd}(T_{sub})}{T_{sub}} \right] \equiv J \quad (2.177)$$

$$J_{Te_2,j} = \frac{C_{Te_2,j}}{Rd} \left[ \frac{P_{Te_2}(T_{so})}{T_{so}} - \frac{P_{Te_2}(T_{sub})}{T_{sub}} \right] \equiv \frac{J}{2} \quad (2.178)$$

เมื่อ  $J_{Cd,j}$  คือ ฟลักซ์ของการแพร่ของอะตอมของธาตุ  $Cd$  ในแก๊ส  $J$   
 $J_{Te_2,j}$  คือ ฟลักซ์ของการแพร่ของโมเลกุลของแก๊ส  $Te_2$  ในแก๊ส  $J$   
 $J$  คือ ฟลักซ์ของการแพร่  
 $D_{i,j}$  คือ สัมประสิทธิ์การแพร่ของอะตอมของธาตุ  $i$  ในแก๊ส  $J$

ซึ่งในกรณีนี้หน้าผิวโมเลกุลและขนาดของโมเลกุลของแก๊ส  $Te_2$  มีค่ามากกว่าอะตอมธาตุ  $Cd$  ดังนั้นจะได้สัมประสิทธิ์การแพร่  $D_{Cd,j} = 1.85 D_{Te_2,j}$  ในบรรยากาศของแก๊ส  $H_2$ ,  $He$  หรือ  $Ar$  จากสมการการส่งผ่านโมเลกุลของ  $CdTe$  ที่อุณหภูมิของสารตั้งต้น ( $T_{so}$ ) มีค่าต่างกัน  $T_{so} - T_{sub}$  เท่ากับ 70 องศาเซลเซียส จะได้  $P_{Cd}(T_{so}) \gg P_{Cd}(T_{sub})$  และ  $P_{Te_2}(T_{so}) \gg P_{Te_2}(T_{sub})$  ดังนั้นจึงสามารถเขียนสมการใหม่ได้เป็น

$$\frac{P_{Cd}(T_{so})}{P_{Te_2}(T_{so})} = \frac{2D_{Te_2,j}}{D_{Cd,j}} = 1.1 \quad (2.179)$$

หมายเหตุ ค่าอุดมคติอัตราส่วนเท่ากับ 1

ดังนั้นจากสมการที่ (2.173), (2.174), (2.175), (2.177), (2.179) สามารถคำนวณหา  $J$  และอัตราการปลูกฟิล์มบาง (growth rate) ซึ่งมีความสัมพันธ์ตามสมการ

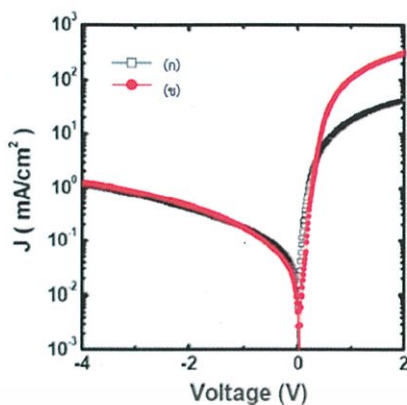
$$GR\left(\frac{\mu\text{m}}{\text{min}}\right) = \frac{J \times M \times 60 \times 10^4}{\rho} \quad (2.180)$$

|       |        |     |                       |
|-------|--------|-----|-----------------------|
| เมื่อ | $J$    | คือ | ฟลักซ์ของการแพร่      |
|       | $M$    | คือ | มวลโมเลกุลของ $CdTe$  |
|       | $\rho$ | คือ | ความหนาแน่นของ $CdTe$ |

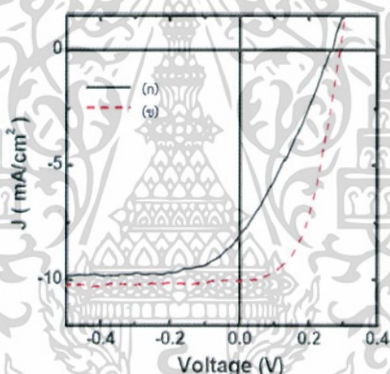
## 2.16 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ฮวงและคณะ (Huang,2013) ได้ทำการศึกษาสมบัติของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-Sn/p-Si ซึ่งฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ SnS จะถูกเคลือบลงบนแผ่นผลึกเดี่ยวของสารกึ่งตัวนำ p-Si ที่มีระนาบเป็น (100) โดยวิธีโซล-เจล ซึ่งมีชนิดการนำไฟฟ้าชนิดพี เนื่องจากเจือด้วยอะตอมของธาตุ B และมีค่าความหนาแน่นของโฮลเท่ากับ  $2 \times 10^{15}$  ต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ส่วนค่าความหนาแน่นของอิเล็กตรอนในฟิล์มบางของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ SnS มีค่าเท่ากับ  $3.18 \times 10^{17}$  ต่อลูกบาศก์เซนติเมตร รูปที่ 2.47 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสไฟฟ้า กับ แรงดันไฟฟ้าของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-Sn/p-Si โดยในรูปที่ 2.47(ก) เป็นกรณีที่แผ่นผลึกเดี่ยวของสารกึ่งตัวนำ p-Si ไม่ได้จุ่มในสารละลาย  $(NH_4)_2S_{x-2.6}$  ส่วนในรูปที่ 2.47(ข) เป็นกรณีที่แผ่นผลึกเดี่ยวของสารกึ่งตัวนำ p-Si จุ่มในสารละลาย  $(NH_4)_2S_{x-2.6}$  ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 40 วินาที การจุ่มแผ่นผลึกเดี่ยวของสารกึ่งตัวนำ p-Si ในสารละลาย  $(NH_4)_2S_{x-2.6}$  เป็นการสร้างชั้นเฉื่อยงาน (sulfur-passivated layer) เพื่อลดกับดักพาหะที่บริเวณรอยต่อ รูปที่ 2.48 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสไฟฟ้า กับ แรงดันไฟฟ้า ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-Sn/p-Si ภายใต้การฉายแสงด้วยความเข้ม 100 มิลลิวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร พบว่ากรณีสร้างชั้นของฟิล์มบางที่เฉื่อยงานให้กับผลึกเดี่ยวของสารกึ่งตัวนำ p-Si จะได้ แรงดันไฟฟ้าเปิดวงจรเท่ากับ 0.29 โวลต์ กระแสไฟฟ้าลัดวงจรเท่ากับ 10.1 มิลลิแอมป์ต่อตารางเซนติเมตร ค่าฟิลแฟกเตอร์เท่ากับ 49.7 เปอร์เซ็นต์ และประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์เท่ากับ 1.46 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งพารามิเตอร์ทั้งหมดเหล่านี้มีค่าสูงกว่าในกรณีแผ่นผลึกเดี่ยวของสารกึ่งตัวนำ p-Si ที่ไม่มีชั้นของฟิล์มบางที่เฉื่อยงาน กระแสลัดวงจรที่เพิ่มขึ้นจาก 7.9 เป็น 0.1 มิลลิแอมป์ต่อตารางเมตร เนื่องจากความต้านทานไฟฟ้าอนุกรมที่มีค่าลดลง ส่วนแรงดันไฟฟ้าเปิดวงจรเพิ่มจาก 0.27 เป็น 0.29 โวลต์ เนื่องจากแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมรอยต่อมีค่าเพิ่มขึ้น แสดงว่าชั้นของฟิล์มบางที่เฉื่อยงานไปลดอิทธิพลของกับดักพาหะที่บริเวณรอยต่อ ส่งผลให้เซลล์แสงอาทิตย์นี้มีประสิทธิภาพสูงขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

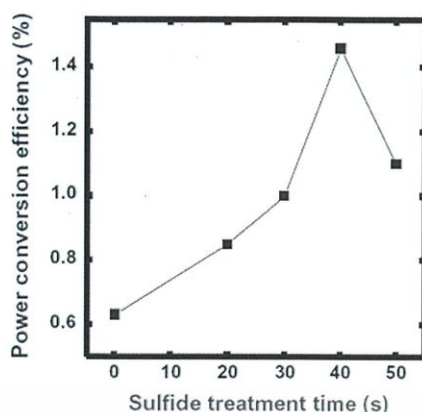


รูปที่ 2.47 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสไฟฟ้า กับ แรงดันไฟฟ้าของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-Sn/p-Si  
 ก. กรณีแผ่นผลึกเดี่ยวของสารกึ่งตัวนำ p-Si ไม่ได้จุ่มในสารละลาย  $(\text{NH}_4)_2\text{S}_{x=2-6}$   
 ข. กรณีแผ่นผลึกเดี่ยวของสารกึ่งตัวนำ p-Si จุ่มในสารละลาย  $(\text{NH}_4)_2\text{S}_{x=2-6}$



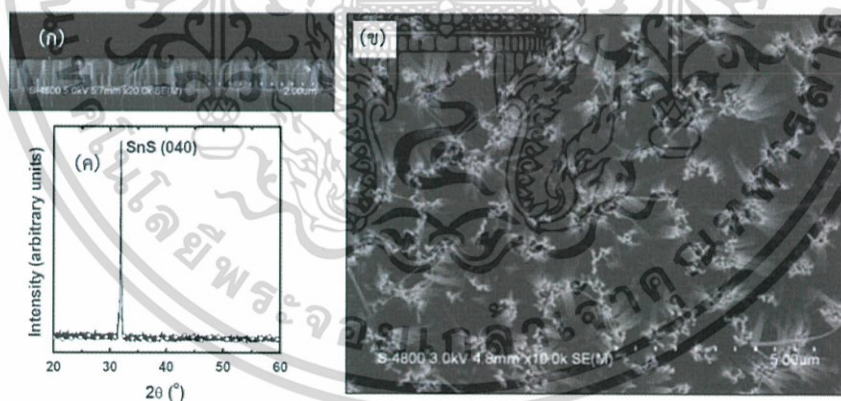
รูปที่ 2.48 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสไฟฟ้า กับ แรงดันไฟฟ้าของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-Sn/p-Si ภายใต้การฉายแสงความเข้มแสงเท่ากับ 100 มิลลิวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร  
 ก. กรณีแผ่นผลึกเดี่ยวของสารกึ่งตัวนำ p-Si ไม่ได้จุ่มในสารละลาย  $(\text{NH}_4)_2\text{S}_{x=2-6}$   
 ข. กรณีแผ่นผลึกเดี่ยวของสารกึ่งตัวนำ p-Si จุ่มในสารละลาย  $(\text{NH}_4)_2\text{S}_{x=2-6}$

ประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์จะมีค่าเพิ่มขึ้นจาก 0.6 ถึงค่าสูงสุด 1.46 เปอร์เซนต์ เมื่อแผ่นผลึกเดี่ยวของสารกึ่งตัวนำ p-Si จุ่มในสารละลาย  $(\text{NH}_4)_2\text{S}_{x=2-6}$  เป็นเวลา 40 วินาที และประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์จะลดลงเมื่อใช้เวลาในการจุ่มสารละลาย  $(\text{NH}_4)_2\text{S}_{x=2-6}$  เกิน 40วินาที การใช้เวลาในการจุ่มสารละลาย  $(\text{NH}_4)_2\text{S}_{x=2-6}$  นานเกินไป จะส่งผลให้เกิดชั้นฟิล์มบางของอะตอมของธาตุซิลเฟอร์หนาเกินไปที่บริเวณรอยต่อ ทำให้ผิวหน้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-Sn ไม่สัมผัสกับแผ่นผลึกเดี่ยวของสารกึ่งตัวนำ p-Si นั่นคือการจุ่มในสารละลาย  $(\text{NH}_4)_2\text{S}_{x=2-6}$  ในช่วงเวลาที่ไม่เหมาะสม จะเป็นสิ่งสำคัญต่อการเพิ่มประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดนี้



รูปที่ 2.49 แสดงค่าประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-Sn/p-Si ที่ขึ้นกับเวลาของการจุ่มในสารละลาย  $(\text{NH}_4)_2\text{S}_{x=2-6}$

ส่วนรวนและคณะ (Ruan, 2015) ได้ทำการศึกษาสมบัติการเรียงกระแสไฟฟ้าของไดโอดที่มีรอยต่อวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-SnS/n-Si ที่เคลือบอยู่บนแผ่นผลึกเดี่ยวของสารกึ่งตัวนำ n-Si ซึ่งแผ่นผลึกเดี่ยวของสารกึ่งตัวนำ n-Si ได้สร้างเป็นเส้นลวดนาโน (nanowire) ไว้บนผิวหน้าโดยการกัดในสารละลายของ  $\text{HF}+\text{AgNO}_3$  ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส อีกทั้งยังได้สร้างชั้นของฟิล์มบางที่เฉื่อยงานให้กับเส้นลวดนาโนของผลึกเดี่ยวของสารกึ่งตัวนำ n-Si โดยการจุ่มในสารละลาย  $(\text{NH}_4)_2\text{S}_{x=2-6}$  เป็นเวลา 60 วินาที เส้นลวดนาโนแต่ละเส้นยาว 535 นาโนเมตร เส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 20 นาโนเมตร เส้นลวดนาโนนี้จะเกาะกันเป็นกลุ่มคล้ายช่อดอกไม้ ดังแสดงในรูปที่ 2.50 ส่วนฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-SnS เตรียมโดยวิธีไฮล-เจล จากสารละลายของ  $\text{SnCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  กับ  $\text{SC}(\text{NH}_2)_2$  โดยมีตัวทำละลายคือ 2-methoxyethanol และ MEA



รูปที่ 2.50 แสดงผลการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคและเชิงมหภาค ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-SnS/SiNWs

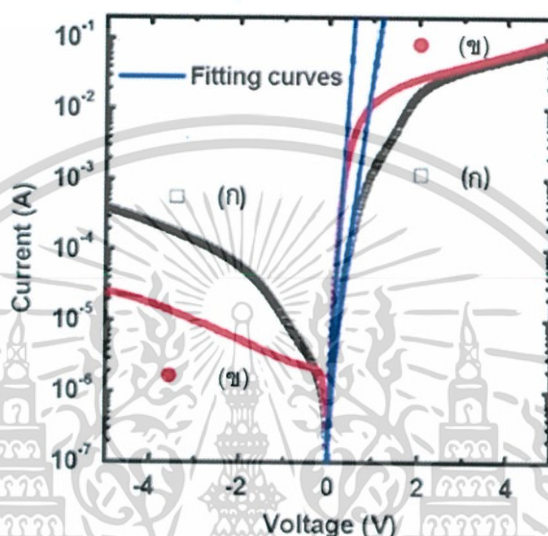
ก. แสดงภาพถ่าย SEM ของภาคตัดขวางของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-SnS/SiNWs

ข. แสดงภาพถ่ายผิวหน้าของแผ่นผลึกเดี่ยวของสารกึ่งตัวนำ p-Si ที่ได้ทำการสร้างเส้นลวดนาโนไว้ที่ผิวหน้า

ค. แสดงสเปกตรัมของพีคความเข้มการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-SnS

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์และสงวนสิทธิ์ในเนื้อหา และต้องอ้างถึงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างถึงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 2.51 แสดงสมบัติการเรียงกระแสไฟฟ้าของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-SnS/ SiNWs ทั้งในกรณีแผ่น SiNWs ไม่ได้จุ่มและจุ่มในสารละลาย  $(\text{NH}_4)_2\text{S}_{x=2.6}$  ตามลำดับ พบว่าการแผ่น SiNWs มีการสร้างชั้นของฟิล์มบางที่เฉื่อยงาน จะให้ค่าแฟกเตอร์อุดมคติเท่ากับ 1.8 ซึ่งต่ำกว่ากรณีแผ่น SiNWs ที่ไม่ได้สร้างชั้นของฟิล์มบางที่เฉื่อยงาน ที่มีค่าแฟกเตอร์อุดมคติเท่ากับ 3.7 ดังนั้น ไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-SnS/ SiNWs ที่ได้มีการสร้างชั้นเฉื่อยงาน แสดงความเป็นไดโอดที่ดี โดยกระแสไฟฟ้ารั่วไหล (leakage current) มีค่าต่ำ ซึ่งหมายถึงความต้านทานชั้นที่ (shunt resistance) มีค่ามาก



รูปที่ 2.51 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสไฟฟ้า กับ แรงดันไฟฟ้า ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-SnS/ SiNWs  
ก. ที่ไม่มีชั้นของฟิล์มบางที่เฉื่อยงาน  
ข. ที่มีชั้นของฟิล์มบางที่เฉื่อยงาน

ชิและคณะ (Shi, 2013) ได้มีการเตรียมฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $\text{SnS}_2$  โดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด ภายในระบบสุญญากาศ โดยกำหนดให้อุณหภูมิของสารตั้งต้นเป็น 650 และ 580 องศาเซลเซียส ตามลำดับ ปฏิกริยาการระเหิดเป็นไปดังสมการ



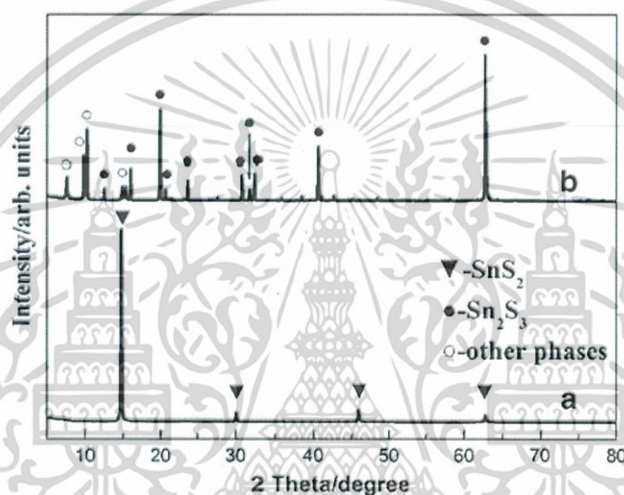
จากการวิเคราะห์ด้วยผลึกของสารกึ่งตัวนำ  $\text{SnS}_2$  ตัวเทอร์โมกราวิเมตริก พบว่าน้ำหนักของสารตัวอย่างหายไป 4.5 เปอร์เซ็นต์ ในช่วงอุณหภูมิ 30 - 270 องศาเซลเซียส เนื่องจากการระเหยไปของโมเลกุลของน้ำ และโมเลกุลของ  $(\text{NH}_4)_2\text{S}_{x=2.6}$  ที่อุณหภูมิช่วง 270-450 องศาเซลเซียส น้ำหนักหายไป 4.3 เปอร์เซ็นต์ เนื่องจากกระบวนการสลายตัวของ  $[\text{SnS}_{2.26}(\text{s}) \rightarrow \text{SnS}_2(\text{s}) + 0.26\text{S}(\text{g})]$  จากนั้นน้ำหนักจะหายไปอีก 5.3 เปอร์เซ็นต์

ในช่วงอุณหภูมิ 550 - 630 องศาเซลเซียส เนื่องจากกระบวนการระเหิดจาก  $\text{SnS}_2(\text{s})$  ไปเป็น  $\text{SnS}_2(\text{g})$  ส่วนที่อุณหภูมิสูงกว่า 630 องศาเซลเซียส กระบวนการสลายตัวจะเป็นไปดังนี้ คือ



ดังนั้นจึงเลือกให้อุณหภูมิของสารตั้งต้นเป็น 580 และ 650 องศาเซลเซียส

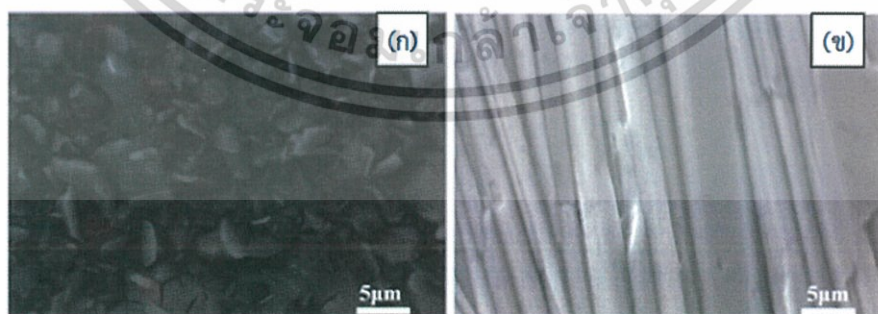
สเปกตรัมการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $\text{SnS}_2$  จะแสดงในรูปที่ 2.52 ส่วนภาพถ่ายผิวหน้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $\text{SnS}_2$  จะแสดงดังรูปที่ 2.53



รูปที่ 2.52 แสดงสเปกตรัมการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $\text{p-SnS}_2$  เมื่อให้อุณหภูมิแก่สารตั้งต้นเท่ากับ

ก. 580 องศาเซลเซียส

ข. 650 องศาเซลเซียส



รูปที่ 2.53 แสดงภาพถ่ายผิวหน้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $\text{SnS}_2$  ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ที่เตรียมได้เมื่อให้อุณหภูมิแก่สารตั้งต้นเท่ากับ

ก. 580 องศาเซลเซียส

ข. 650 องศาเซลเซียส

### บทที่ 3

## วิธีการดำเนินงานวิจัย

โครงการพิเศษนี้ได้ทำการเตรียมฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ SnS และทำการเตรียมไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-SnS/n-Si (100) โดยทำการเคลือบฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ SnS ลงบนแผ่นฐานรองรับทั้งที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ และแผ่นผลึกเดี่ยวของสารกึ่งตัวนำ n-Si (100) ตามลำดับ โดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ เมื่อให้อุณหภูมิแก่แผ่นฐานรองรับที่ต่างกัน จากนั้นจึงทำการศึกษาสมบัติทางฟิสิกส์ต่างๆ ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ SnS และไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-SnS/n-Si (100)

### 3.1 เครื่องมือและอุปกรณ์การวิจัย (Cullity, 1956; Kittle, 1971; งามนิത്യ, 2531; งามนิത്യ, 2545; ฐิตินัย, 2549; ฐิตินัย, 2550; งามนิത്യ, 2551; ฐิตินัย, 2551)

#### 3.1.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์

1. แผ่นกระจกสไลด์ขนาด 12 x 25 ตารางมิลลิเมตร
2. ปากคืบ
3. อ่างอัลตราโซนิก
4. เครื่องเป่าลมร้อน
5. เตาอบ
6. ปีกเกอร์ขนาด 200 มิลลิเมตร
7. นาฬิกาจับเวลา
8. สารเคมี (น้ำยาล้างจาน น้ำปลอດประจุ อะซิโตนและ เอทานอล)

#### 3.1.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นผลึกเดี่ยวของสารกึ่งตัวนำ n-Si (100) ที่มีชนิดการนำไฟฟ้าเป็นแบบเอ็น

1. แผ่นผลึกเดี่ยวของสารกึ่งตัวนำ n-Si (100) ขนาด 12 x 25 ตารางมิลลิเมตร
2. ที่ตัดแผ่นผลึกเดี่ยวของสารกึ่งตัวนำ n-Si (100)
3. แท่งแม่เหล็กกวานสารละลายเคมี
4. สารเคมี (KOH, Isopropyl alcohol, น้ำปลอດประจุ และอะซิโตน)
5. ปีกเกอร์ขนาด 200 มิลลิเมตร
6. เทอร์โทคป์เปิด ชนิด K
7. เครื่องชั่ง 4 ตำแหน่งยี่ห้อ Sartorius
8. ที่ตักสาร
9. ที่คนสาร
10. แก๊สไนโตรเจน
11. เครื่องเป่าลมร้อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่ 11. เครื่องเป่าลมร้อน ใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.1.3 อุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ SnS โดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระบะประชิดภายในระบบสุญญากาศ

1. ระบบระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระบะประชิดภายในระบบสุญญากาศ

- ท่อแก้วควอทซ์ปลายปิดหนึ่งด้าน
- กล่องแกรไฟต์ (target)
- เทอร์โมคัปเปิลชนิด K
- เครื่องควบคุมอุณหภูมิของยี่ห้อ SHIMADEN รุ่น PID FP21
- เครื่องควบคุมอุณหภูมิของยี่ห้อ SHIMADEN รุ่น PID FP93
- หลอดฮาโลเจน 1,500 วัตต์
- ปั้มกลโรตารี
- เครื่องวัดความดัน

2. สารประกอบทินซิลไฟด์ บริสุทธิ์ 99.99%

3. แผ่นฐานรองรับ (กระจกสไลด์ และแผ่นซิลิคอนชนิดเอ็น)

4. เครื่องชั่ง 4 ตำแหน่งยี่ห้อ Sartorius

5. ครกบดสาร

6. ปากคืบ

7. หน้ากากป้องกันการไอระเหยของสารเคมี

8. แวนตากรองแสง

9. ภาชนะใช้สำหรับเก็บสารเคมีที่สามารถควบคุมความชื้นได้

### 3.1.4 เครื่องมือที่ใช้ในการศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาค

เอกซ์เรย์ดิฟแฟรกโตรมิเตอร์ (XRD) ของยี่ห้อ Bruker รุ่น D8 advance ความยาวคลื่นรังสีเอกซ์ 1.5406 อังสตรอม ใช้กระแส 30 มิลลิแอมป์ แรงดัน 30 กิโลโวลต์ โดยวัดมุม  $2\theta$  ในช่วง 20 - 60 องศา

### 3.1.5 เครื่องมือที่ใช้ในการศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงมหภาค

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสองกราด ของยี่ห้อ LEO รุ่น LEO 1455VP โดยใช้แรงดันไฟฟ้า 20 กิโลโวลต์ และกำลังขยายของภาพถ่าย 1,500 2,000 และ 3,000 เท่า

### 3.1.6 เครื่องมือที่ใช้ศึกษาสมบัติทางแสง

เครื่องยูวี - วิสสิเบิลสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ (UV-VIS spectrophotometer) ยี่ห้อ thermo electron corporation รุ่น He ios โดยใช้ความยาวคลื่น 300 - 1100 นาโนเมตร

### 3.1.7 เครื่องวิเคราะห์สมบัติทางความร้อน

เครื่องเทอร์โมกราวิเมตริก อะนาไลเซอร์ (Thermogravimetric Analyzer : TGA) ยี่ห้อ Perkin รุ่น Pyris 1 TGA โดยใช้อุณหภูมิ 0 - 800 องศาเซลเซียส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.1.8 เครื่องมือที่ใช้ในการศึกษาสมบัติทางไฟฟ้า

1. อิเล็กโตรมิเตอร์ของยี่ห้อ Keithley รุ่น 610 CR
2. แหล่งจ่ายไฟกระแสตรงของยี่ห้อ Keithley รุ่น 236
3. เครื่องควบคุมอุณหภูมิยี่ห้อ SHINKO รุ่น MCD100 พร้อมเทอร์โมคัปเปิลชนิด K
4. เครื่องวัดอุณหภูมิยี่ห้อ Digicon รุ่น Dp-50A
5. เต้าให้ความร้อน
6. กาวเงินนำไฟฟ้า
7. สายไฟ
8. คอมพิวเตอร์

3.2 ขั้นตอนการเตรียมฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ SnS โดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ (Cullity, 1956; Kittel, 1971; งามนิตย์, 2531; งามนิตย์, 2545; จิตินัย, 2549; จิตินัย, 2550; งามนิตย์, 2551; จิตินัย, 2556)

#### 3.2.1 การเตรียมและทำความสะอาดแผ่นกระจกสไลด์เพื่อเป็นแผ่นฐานรองรับ

1. นำแผ่นกระจกสไลด์ตัดให้ได้ขนาด 12 x 25 ตารางมิลลิเมตร ไปทำความสะอาดด้วยน้ำยาล้างจานเพื่อทำการล้างคราบไขมันและสิ่งสกปรก
2. ทำความสะอาดแผ่นกระจกสไลด์ด้วยน้ำปอดประจุเป็นเวลา 10 นาที
3. ทำความสะอาดแผ่นกระจกสไลด์ด้วยอะซิโตนเป็นเวลา 10 นาที
4. ทำความสะอาดแผ่นกระจกสไลด์ด้วยเอทานอลเป็นเวลา 10 นาที
5. ทำความสะอาดแผ่นกระจกสไลด์ด้วยน้ำปอดประจุ 3 ครั้งๆละ 10 นาที
6. ขั้นตอนในข้อ 2-5 นำแผ่นกระจกสไลด์ที่ได้เตรียมไว้ใส่ในบีกเกอร์แล้วนำไปใส่ในอ่างอัลตราโซนิก
7. นำแผ่นกระจกสไลด์ไปอบแห้งที่อุณหภูมิ 95 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที

#### 3.2.2 การเตรียมและทำความสะอาดแผ่นผลึกเดี่ยวของสารกึ่งตัวนำ n-Si (100) เพื่อเป็นแผ่นฐานรองรับ

1. นำแผ่นผลึกเดี่ยวของสารกึ่งตัวนำ n-Si (100) ตัดให้ได้ขนาด 12 x 25 ตารางมิลลิเมตร
2. ทำการกัดผิวหน้าแผ่นผลึกเดี่ยวของสารกึ่งตัวนำ n-Si (100) ด้วย KOH 9 กรัม Isopropyl alcohol 20 มิลลิลิตรและน้ำปอดประจุ 90 มิลลิลิตร เป็นเวลา 8 วินาที
3. นำแผ่นผลึกเดี่ยวของสารกึ่งตัวนำ n-Si (100) ที่การกัดเสร็จเรียบร้อยแล้ว มาเป่าด้วยแก๊สไนโตรเจนให้แผ่นผลึกเดี่ยวของสารกึ่งตัวนำ n-Si (100) แห้งสนิท

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.2.3 การเตรียมและทำความสะอาดระบบระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ

1. ทำความสะอาดกล่องแกรไฟต์ด้วยอะซิโตน
2. นำกล่องแกรไฟต์เป่าให้แห้งด้วยเครื่องเป่าลมร้อน
3. นำกล่องแกรไฟต์ไปใส่ในท่อแก้วในระบบเตาแอลนิลทำการอีแวก-รีฟิล (evac- refill) โดยการดูดอากาศภายในท่อแก้วออกแล้วเติมแก๊สไนโตรเจนเข้าไปจนกระทั่งมีความดันเกือบเท่าความดันบรรยากาศ ทำการดูดแก๊สไนโตรเจนออกจากท่อแก้ว ทำซ้ำกันอีก 3 ครั้ง เพื่อให้แน่ใจว่าไม่มีออกซิเจนหลงเหลืออยู่แล้ว
4. ทำการอบกล่องแกรไฟต์ที่ 200 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 1 ชั่วโมง
5. ปิดเครื่องควบคุมอุณหภูมิ รอจนกระทั่งอุณหภูมิของระบบเตาแอลนิลลดลงถึงอุณหภูมิห้องแล้วนำกล่องแกรไฟต์ไปเก็บไว้ในภาชนะควบคุมความชื้น
6. ทำความสะอาดท่อแก้วควอทซ์ปลายปิดหนึ่งด้านด้วยน้ำยาล้างจาน เขย่าทำความสะอาดด้วยน้ำจนกระทั่งไม่มีน้ำยาล้างจานเหลืออยู่ จากนั้นเขย่าทำความสะอาดด้วยเอทานอล 1 ครั้งตามด้วยน้ำปอดประจุ 3 ครั้ง ทำการเป่าแห้งด้วยแก๊สไนโตรเจนปิดปาดท่อเพื่อป้องกันสิ่งสกปรก
7. ทำความสะอาดชิ้นส่วนต่างๆด้วยอะซิโตน
8. ทำความสะอาดขั้วไฟฟ้าด้วยแปรงทองเหลือง ชัดให้เรียบด้วยกระดาษทรายละเอียดทำความสะอาดสิ่งสกปรกที่ตกค้างด้วยน้ำยาทำความสะอาดขั้วไฟฟ้า

### 3.2.4 การเตรียมฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ SnS โดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ

#### 3.2.4.1 การเคลือบฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ SnS ลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ

1. ชั่งสารตั้งต้นทินซัลไฟด์บริสุทธิ์ 99.99 เปอร์เซ็นต์ ให้ได้น้ำหนัก 0.01 กรัม แล้วนำมาบรรจุในกล่องแกรไฟต์ เขย่าเพื่อให้สารตั้งต้นกระจายเท่าๆ กัน ปรับผิวหน้าให้เรียบโดยใช้แท่งแก้วค่อยๆ กัดให้ผิวหน้าสม่ำเสมอ
2. นำแผ่นกระจกสไลด์ที่เตรียมไว้เป็นแผ่นฐานรองรับใส่ในกล่องแกรไฟต์
3. ทำการติดตั้งระบบระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศให้ครบถ้วน
4. ตั้งโปรแกรมให้อุณหภูมิสารแก่ตั้งต้นและอุณหภูมิของแผ่นฐานรองรับ และเวลา ตามที่ต้องการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- กรณีที่ 1 กำหนดให้อุณหภูมิแก๊สสารตั้งต้นเป็น 550 องศาเซลเซียส ใช้เวลา 20 นาทีให้อุณหภูมิคงตัวที่ 550 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 และ 10 นาทีตามลำดับ แล้วลดอุณหภูมิมาถึงอุณหภูมิห้องเป็นเวลา 30 นาที
- กรณีที่ 2 กำหนดให้อุณหภูมิแก๊สสารตั้งต้นเป็น 565 องศาเซลเซียส ใช้เวลา 20 นาทีให้อุณหภูมิคงตัวที่ 565 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 15 และ 20 นาทีตามลำดับ แล้วลดอุณหภูมิมายังอุณหภูมิห้องเป็นเวลา 20 นาที
- กรณีที่ 3 กำหนดให้อุณหภูมิแก๊สสารตั้งต้นเป็น 560 องศาเซลเซียส ใช้เวลา 20 นาทีให้อุณหภูมิคงตัวที่ 560 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 15 และ 20 นาทีตามลำดับ แล้วลดอุณหภูมิมายังอุณหภูมิห้องเป็นเวลา 20 นาที
- กรณีที่ 4 กำหนดให้อุณหภูมิแก๊สสารตั้งต้นเป็น 588 องศาเซลเซียส ใช้เวลา 20 นาทีให้อุณหภูมิคงตัวที่ 588 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 8 นาที แล้วลดอุณหภูมิมายังอุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 20 นาที

5. เปิดปั๊มกลโรตารี แล้วเปิดวาล์วสูบล้ออากาศออกจนได้ความดันประมาณ  $2.0 \times 10^{-2}$  ถึง  $1.8 \times 10^{-2}$  มิลลิบาร์ แล้วเปิดเครื่องควบคุมอุณหภูมิสารตั้งต้นและแผ่นฐานรองรับ
6. เมื่อเคลือบฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ SnS เสร็จแล้วรอกกว่าอุณหภูมิของสารตั้งต้นและแผ่นฐานรองรับลดลงต่ำกว่า 30 องศาเซลเซียส แล้วปิดวาล์วปั๊มกลโรตารี ความดันภายในระบบจะค่อยๆ เพิ่มขึ้นแล้วค่อยๆ เปิดวาล์วให้อากาศเข้าไปจนกระทั่งความดันภายในเท่ากับความดันภายนอก
7. สวมหน้ากากป้องกันไอระเหยจากสารเคมี เปิดระบบเพื่อนำเอาแผ่นฐานรองรับออกจากกล่องแกรไฟต์
8. นำฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ SnS ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์มาตรวจสอบผิวหน้าของฟิล์มบางด้วยกล้องจุลทรรศน์ คุณภาพของฟิล์มบางที่ได้มีผิวหน้าที่สมบูรณ์ คือ ผิวหน้าสม่ำเสมอไม่มีรูพรุนก็นำฟิล์มบางไปเก็บในภาชนะควบคุมความชื้น

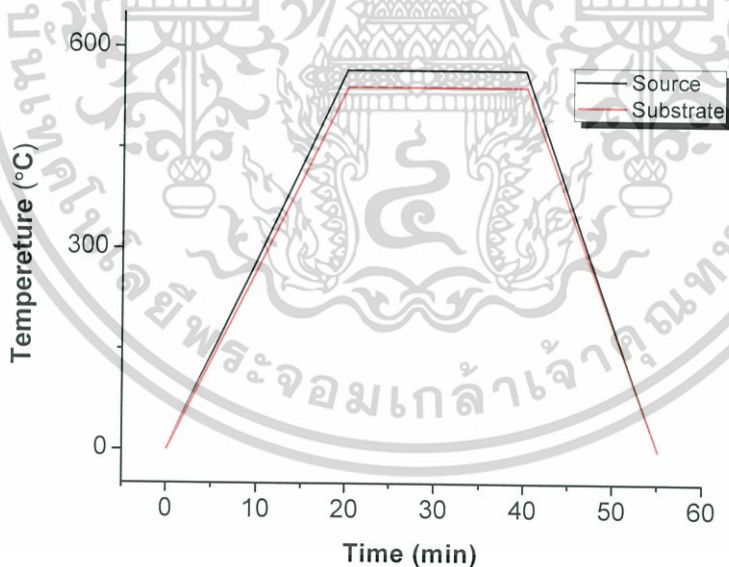
#### 3.2.4.2 การเตรียมไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิธีพันธุของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-SnS/n-Si (100) โดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ

1. ชั่งสารตั้งต้นทินซิลไฟด์บริสุทธิ์ 99.99 เปอร์เซ็นต์ ให้ได้น้ำหนัก 0.01 กรัม แล้วนำมาบรรจุในกล่องแกรไฟต์ เขย่าเพื่อให้สารตั้งต้นกระจายเท่าๆ กัน ปรับผิวหน้าให้เรียบโดยใช้แท่งแก้วค่อยๆ กดให้ผิวด้านหน้าสม่ำเสมอ
2. นำแผ่นผลึกเดี่ยวของสารกึ่งตัวนำ n-Si (100) ที่เตรียมไว้ใส่ในกล่องแกรไฟต์เพื่อใช้เป็นแผ่นฐานรองรับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามให้คัดลอกสิ่งเหล่านี้ และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. ทำการติดตั้งระบบระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดภายใต้ระบบสุญญากาศ ให้ครบถ้วน

4. ตั้งโปรแกรมให้อุณหภูมิแก๊สสารตั้งต้นจากอุณหภูมิห้องถึงอุณหภูมิ 565, 570 และ 580 องศาเซลเซียส ตามลำดับ โดยใช้เวลา 20 นาที ให้อุณหภูมิคงตัวที่ 565, 570 และ 580 องศาเซลเซียสตามลำดับ เป็นเวลา 15 นาที ตามลำดับ แล้วลดอุณหภูมิมาถึงอุณหภูมิห้องเป็นเวลา 20 นาที
5. เปิดปั๊มกลโรตารี แล้วเปิดวาล์วสูบอากาศออกจนได้ความดันประมาณ  $2 \times 10^{-2}$  ถึง  $1.8 \times 10^{-2}$  มิลลิบาร์ แล้วเปิดเครื่องควบคุมอุณหภูมิสารตั้งต้นและแผ่นฐานรองรับ
6. เมื่อปลูกฟิล์มเสร็จแล้ว รอจนกว่าอุณหภูมิของสารตั้งต้นและแผ่นฐานรองรับลดลงต่ำกว่า 30 องศาเซลเซียส แล้วปิดวาล์วปั๊มกลโรตารี ความดันภายในระบบจะค่อยๆ เพิ่มขึ้นแล้วค่อยๆ เปิดวาล์วให้อากาศเข้าไปจนกระทั่งความดันภายในเท่ากับความดันภายนอก
7. สวมหน้ากากป้องกันไอระเหยจากสารเคมี เปิดระบบเพื่อนำเอาฐานรองรับออกจากกล่องแก๊สไฟต์
8. นำไดโอดที่มีรอยต่อแบบวีวีธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-SnS/n-Si (100) มาตรวจสอบผิวหน้าของฟิล์มบางด้วยกล้องจุลทรรศน์ คุณภาพของฟิล์มบางที่ได้มีผิวหน้าที่สมบูรณ์ คือ ผิวหน้าสม่ำเสมอไม่มีรูพรุนก็นำฟิล์มบางไปเก็บในภาชนะควบคุมความชื้น

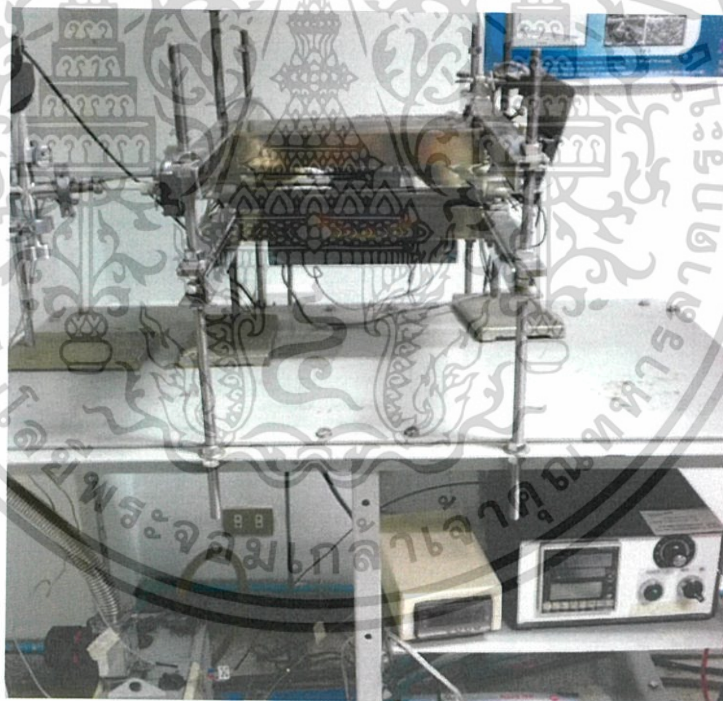


รูปที่ 3.1 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าอุณหภูมิของสารตั้งต้นและอุณหภูมิของแผ่นฐานรองรับ กับ เวลาที่ใช้ในการเคลือบฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ SnS ลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์

และ แผ่นผลึกเดี่ยวของสารกึ่งตัวนำ n-Si (100) โดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระย้า ปรอทภายใต้สุญญากาศ

ตารางที่ 3.1 แสดงเงื่อนไขที่ใช้ในการเคลือบฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ SnS ลงบนแผ่นฐานรองรับทั้งที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ และ แผ่นผลึกเดี่ยวของสารกึ่งตัวนำ n-Si (100) โดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ

| SnS Films                |                             |                       | p-SnS/n-Si Diode         |                             |                       |
|--------------------------|-----------------------------|-----------------------|--------------------------|-----------------------------|-----------------------|
| T <sub>source</sub> (°C) | T <sub>substrate</sub> (°C) | Deposition Time (min) | T <sub>source</sub> (°C) | T <sub>substrate</sub> (°C) | Deposition Time (min) |
| 550                      | 493                         | 5                     | 565                      | 471                         | 15                    |
| 560                      | 460                         | 15                    | 573                      | 475                         | 15                    |
| 565                      | 495                         | 15                    | 580                      | 479                         | 15                    |
| 588                      | 491                         | 10                    | -                        | -                           | -                     |



รูปที่ 3.2 แสดงชุดอุปกรณ์ที่ใช้ในการเคลือบฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ SnS ลงบนแผ่นฐานรองรับทั้งที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ และ แผ่นผลึกเดี่ยวของสารกึ่งตัวนำ n-Si (100) โดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3 การศึกษาสมบัติทางฟิสิกส์พื้นฐานของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ SnS ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับทั้งที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ และเป็นแผ่นผลึกเดี่ยวของสารกึ่งตัวนำ n-Si (100) โดยวิธีระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยาระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ (Cullity, 1956; Kittel, 1971; งามนิตย์, 2531; งามนิตย์, 2545; ฐิตินัย, 2549; ฐิตินัย, 2550; งามนิตย์, 2551; ฐิตินัย, 2556)

### 3.3.1 การศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาค

นำฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ SnS ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับทั้งที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ และเป็นแผ่นผลึกเดี่ยวของสารกึ่งตัวนำ n-Si (100) โดยวิธีระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยาระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ ที่เตรียมได้ทั้งหมดไปศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคด้วยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์จากเครื่องเอกซ์เรย์ดิฟแฟร็กโทรมิเตอร์ของยี่ห้อ Bruker รุ่น D8 advance ความยาวคลื่นรังสีเอกซ์ 1.5406 อังสตรอม โดยใช้กระแส 30 มิลลิแอมป์ และความต่างศักย์ 30 กิโลโวลต์ โดยมุม  $2\theta$  อยู่ในช่วง 20 – 60 องศา และวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของสาร โดยอาศัยสมบัติทางความร้อนด้วยเครื่องเทอร์โมกราวิเมตริก อะนาไลเซอร์ (TGA)

### 3.3.2 การศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงมหภาค

นำฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ SnS ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับทั้งที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์และเป็นแผ่นผลึกเดี่ยวของสารกึ่งตัวนำ n-Si (100) โดยวิธีระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยาระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ ที่เตรียมได้ทั้งหมดไปศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงมหภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope: SEM) ของยี่ห้อ LEO รุ่น LEO 1455 VP โดยใช้แรงดัน 20 กิโลโวลต์ และกำลังขยายของภาพถ่าย 1,500, 2,000 และ 3,000 เท่า ตลอดจนวิเคราะห์ธาตุเชิงปริมาณ และเชิงคุณภาพด้วยเทคนิค EDS

### 3.3.3 การศึกษาสมบัติทางแสง

นำฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ SnS ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับทั้งที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์และเป็นแผ่นผลึกเดี่ยวของสารกึ่งตัวนำ n-Si (100) โดยวิธีระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยาระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ ที่เตรียมได้ทั้งหมดไปศึกษาสมบัติทางแสงด้วยการวัดค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสงด้วยเครื่องยูวี - วิสลิเบิลสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (UV-Vis spectrophotometer) ของยี่ห้อ thermo electron corporation รุ่น He ios โดยใช้ความยาวคลื่น 300 ถึง 1100 นาโนเมตร เพื่อคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงและค่าช่องว่างแถบพลังงาน ( $E_g$ ) นอกจากนี้ยังศึกษา โดยใช้เทคนิคของฟูเรียร์ทรานซอร์มอินฟราเรดสเปกโตรมิเตอร์ (FTIR) และ รามานสเปกโทรสโกปีด้วย

### 3.3.4 การศึกษาสมบัติทางไฟฟ้า

นำฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ SnS ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับทั้งที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยาระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ ที่เตรียมได้ ไปศึกษาสมบัติทางไฟฟ้า โดยการวัดค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าด้วยวิธีสองขั้ว และศึกษาปรากฏการณ์ฮอลล์โดยวิธีแวนเดอเพาว์ และคำนวณค่าพลังงานกระตุ้นจากราฟอาร์เรเนียส (Arrhenius plot) ของความต้านทานไฟฟ้าที่เปลี่ยนไปตามค่าอุณหภูมิ นอกจากนี้ยังวัดค่าสภาพนำไฟฟ้าเชิงแสง (PPC) โดยการฉายแสงด้วยหลอดไฟฮาโลเจน

3.4 การศึกษาสมบัติพื้นฐานของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-SnS/n-Si (100) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ (Cullity, 1956; Kittel, 1971; งามนิตย์, 2531; งามนิตย์, 2545; ฐิตินัย, 2549; ฐิตินัย, 2550; งามนิตย์, 2551; ฐิตินัย, 2556)

- 3.4.1 ทำการวัดความสัมพันธ์ระหว่าง ค่ากระแสไฟฟ้า กับ ค่าแรงดันไฟฟ้า และ ค่าความจุไฟฟ้า กับ ค่าแรงดันไฟฟ้า
- 3.4.2 ทำการวัดค่าอิมพีแดนซ์สเปกโทรสโกปีในช่วงความถี่เท่ากับ 1 กิโลเฮิร์ตซ์ ถึง 2 เมกะเฮิร์ตซ์ ที่ค่าแรงดันไฟฟ้าในช่วง -0.3 ถึง 0.5 โวลต์



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 4

# ผลการวิจัยและการอภิปรายผล

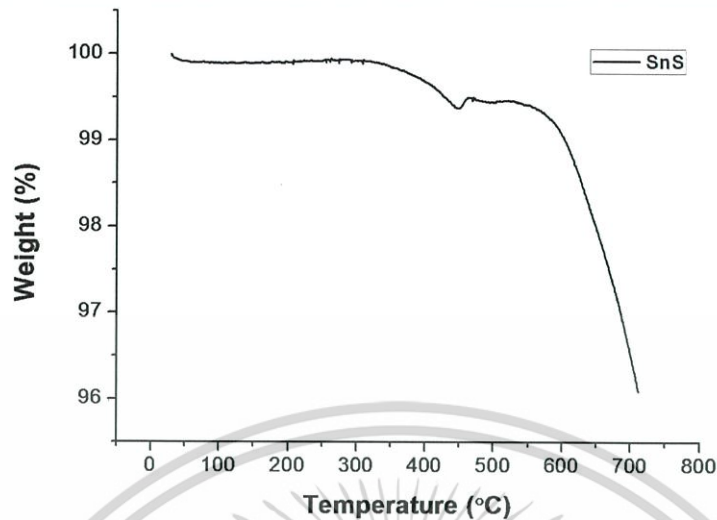
ในงานวิจัยนี้เป็นการศึกษาสมบัติทางฟิสิกส์ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-SnS/n-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยการเคลือบฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ SnS ลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นทั้งที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์และแผ่นผลึกเดี่ยวของสารกึ่งตัวนำ n-Si (100) โดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อน ในระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ โดยนำฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ SnS ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์และไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-SnS/n-Si (100) ที่เตรียมได้ มาทำการศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าโดยการวัดความสัมพันธ์ระหว่าง ค่ากระแสไฟฟ้า กับ ค่าแรงดันไฟฟ้า ที่อุณหภูมิห้อง และที่อุณหภูมิต่ำในช่วง 20 - 300 เคลวิน และทำการวัดความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความจุไฟฟ้า กับ ค่าความถี่ในช่วง 1 กิโลเฮิรตซ์ ถึง 2 เมกะเฮิรตซ์ ในช่วงแรงดันไฟฟ้า -0.3 ถึง 0.5 โวลต์ เพื่อศึกษาพฤติกรรมของกับดักพาหะที่บริเวณผิวยรอยต่อของไดโอดของสารกึ่งตัวนำ p-SnS/n-Si (100) ต่อไป

### 4.1 การวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของสารโดยอาศัยสมบัติทางความร้อนของผลึกของสารกึ่งตัวนำ SnS ที่ได้มาจากการเคลือบฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ SnS ลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ

เครื่องเทอร์โมกราวิเมตริก อะนาไลเซอร์ (TGA) เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของสารโดยอาศัยสมบัติทางความร้อน ภายใต้บรรยากาศก๊าซของออกซิเจน โดยใช้อุณหภูมิตั้งแต่ 0 - 800 องศาเซลเซียส ซึ่งจะใช้บ่งบอกว่าสารตัวอย่าง มีการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักและการเปลี่ยนสถานะ เนื่องจากเกิดการสลายตัวของสารด้วยปฏิกิริยาออกซิเดชัน (oxidation) หรือปฏิกิริยาสลายความชื้น (dehydration) โดยใช้สารตั้งต้น 18.6027 มิลลิกรัม

จากรูปที่ 4.1 แสดงให้เห็นว่าเมื่อให้ความร้อนแก่ผลึกของสารกึ่งตัวนำ SnS ปริมาณของผลึกของสารกึ่งตัวนำ SnS จะลดลงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นในช่วงอุณหภูมิ 350 - 425 องศาเซลเซียส มีการสูญเสีย น้ำหนักของผลึกของสารกึ่งตัวนำ SnS ไป 0.5 เปอร์เซ็นต์ เนื่องจากความชื้นหายไป ที่ช่วงอุณหภูมิประมาณ 550 - 630 องศาเซลเซียส มีการสูญเสียน้ำหนักไป 1.68 เปอร์เซ็นต์ เนื่องจากการระเหิดของผลึกของสารกึ่งตัวนำ SnS ที่เป็นของแข็ง SnS(s) เปลี่ยนเฟสไปเป็นก๊าซ SnS(g) ดังนั้นอุณหภูมิในช่วงอุณหภูมิประมาณ 550 - 630 องศาเซลเซียส จึงถูกเลือกเป็นอุณหภูมิของสารตั้งต้น ซึ่งจะมีอิทธิพลต่อองค์ประกอบทางเคมี โครงสร้างผลึกทั้งเชิงจุลภาค และเชิงมหภาค ลักษณะพื้นผิว และ ค่าช่องว่างแถบพลังงาน ( $E_g$ ) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ SnS

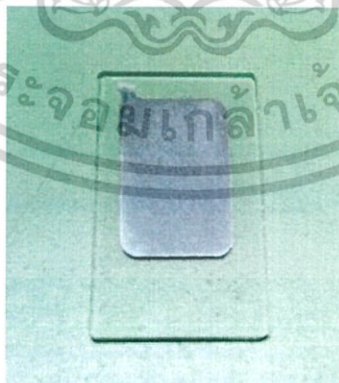
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.1 แสดงน้ำหนักโดยใช้เครื่องเทอร์โมกราวิเมตริก อะนาลิเซอร์ของผงผลึกของสารกึ่งตัวนำ SnS ที่ลดลงตามอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น

4.2 ลักษณะของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ SnS ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับทั้งที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ และแผ่นผลึกเดี่ยวของสารกึ่งนำ n-Si (100) โดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ

ลักษณะผิวหน้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ SnS ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับทั้งที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ และแผ่นผลึกเดี่ยวของสารกึ่งนำ n-Si (100) โดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ จะมีสีเทาเงินเป็นมันวาวยึดติดกับแผ่นกระจกสไลด์ได้ดี



รูปที่ 4.2 แสดงฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ SnS ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ



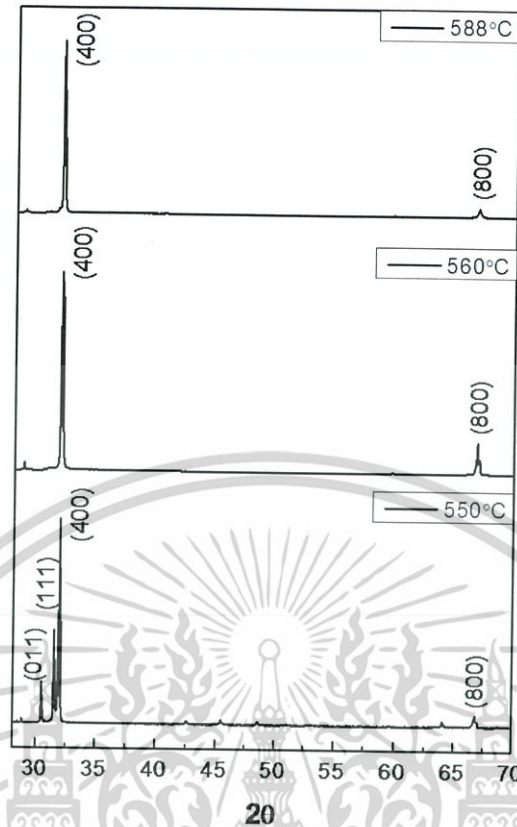
รูปที่ 4.3 แสดงไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-SnS/n-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ

4.3 การศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคด้วยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ ของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำ SnS ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับทั้งที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ และแผ่นผลึกเดี่ยวของสารกึ่งตัวนำ n-Si (100) โดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ

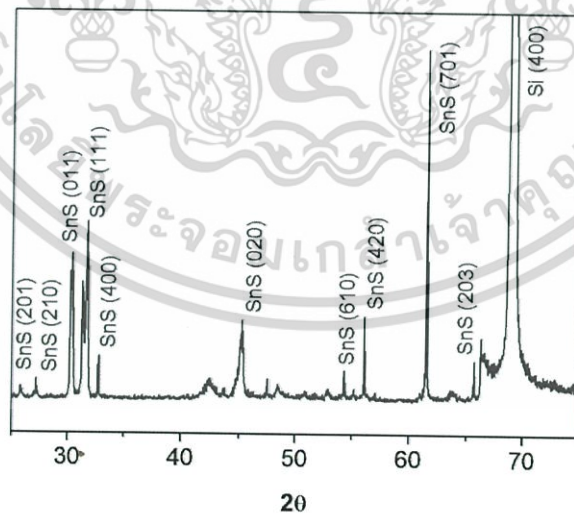
การศึกษาสเปกตรัมการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์จะใช้ในการตรวจสอบโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคของสารกึ่งตัวนำ SnS ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับทั้งที่เป็นทั้งแผ่นกระจกสไลด์ และ แผ่นผลึกเดี่ยวของสารกึ่งตัวนำ n-Si (100) โดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ เมื่อให้อุณหภูมิแก่ของแผ่นฐานรองรับเป็น 550, 560 และ 580 องศาเซลเซียส หนาของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ SnS ที่โดดเด่นอยู่ที่ระนาบ (400) ของเฟสออร์โธโรมบิก (orthorhombic) แสดงดังรูปที่ 4.4 และในส่วนของสเปกตรัมการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-SnS/n-Si (100) หนาของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ SnS ที่โดดเด่นอยู่ที่ระนาบ (701) ของเฟสออร์โธโรมบิก (orthorhombic) และระนาบของแผ่นผลึกเดี่ยวของสารกึ่งตัวนำ Si (100) ที่โดดเด่นอยู่ที่ระนาบ (400) ที่เป็นเฟสของเพนเตกอนเตอร์คิวบิก (face-centered cubic : fcc) แสดงดังรูปที่ 4.5

ตารางที่ 4.1 แสดงค่าคงที่โครงสร้างผลึกที่หาได้จากสเปกตรัมของพีคความเข้มการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ SnS ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับทั้งที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ และแผ่นผลึกเดี่ยวของสารกึ่งตัวนำ n-Si (100) โดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ แสดงให้เห็นว่าฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ SnS มีโครงสร้างผลึกแบบออร์โธโรมบิก ( $a \neq b \neq c$ ) จากนั้นนำไปเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าคงที่โครงสร้างผลึก กับ ค่าอุณหภูมิของสารตั้งต้น ดังแสดงในรูปที่ 4.6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



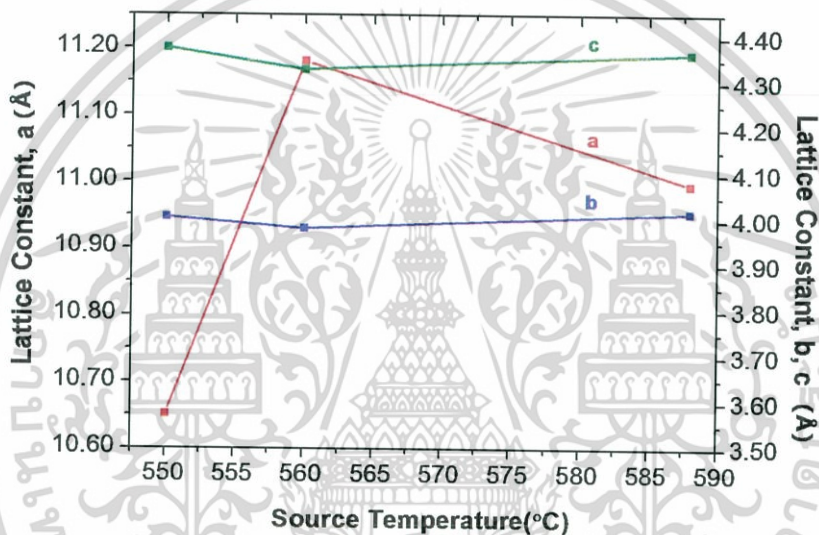
รูปที่ 4.4 แสดงสเปกตรัมของพีคความเข้มการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ SnS ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ



รูปที่ 4.5 แสดงสเปกตรัมของพีคความเข้มการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธ ด้านการค้ำ พันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-SnS/n-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมี ใช้ ไม้ว่ากรณีใดๆทั้ง ด้วยความร้อนในระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ เมื่อให้อุณหภูมิแก่สารตั้งต้นเท่ากับ 565 องศาเซลเซียส

ตารางที่ 4.1 แสดงค่าคงที่โครงสร้างผลึกของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ SnS ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ

| Source Temperature<br>( $^{\circ}\text{C}$ ) | Lattice Constant ( $\text{\AA}$ ) |       |       |
|--|-----------------------------------|-------|-------|
|  | a                                 | b     | c     |
| 550  | 10.65                             | 4.004 | 4.376 |
| 560  | 11.18                             | 3.981 | 4.329 |
| 588  | 10.995                            | 4.016 | 4.364 |



รูปที่ 4.6 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าคงที่โครงสร้างผลึก กับ ค่าอุณหภูมิของสารตั้งต้น ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ SnS ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ

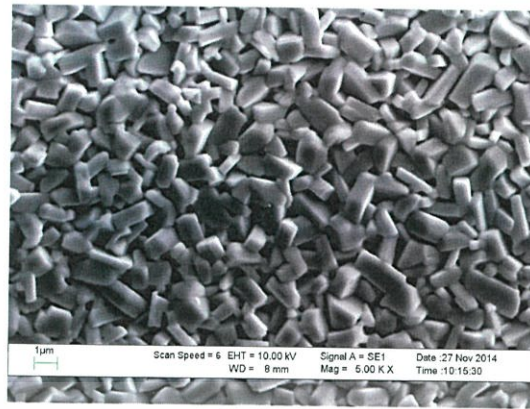
4.4 การศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงมหภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ SnS ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับทั้งที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ และแผ่นผลึกเดี่ยวของสารกึ่งนำ n-Si (100) โดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ

การศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงมหภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำ SnS ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับทั้งที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ และแผ่นผลึกเดี่ยวของสารกึ่งนำ n-Si (100) โดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ เป็นการศึกษาถึงลักษณะสภาพผิวหน้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ SnS ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยให้อุณหภูมิแก๊สสารตั้งต้นต่างกัน คือ 550, 565 และ 588 องศาเซลเซียส ระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงแผ่นฐานรองรับ 7 มิลลิเมตร ใช้

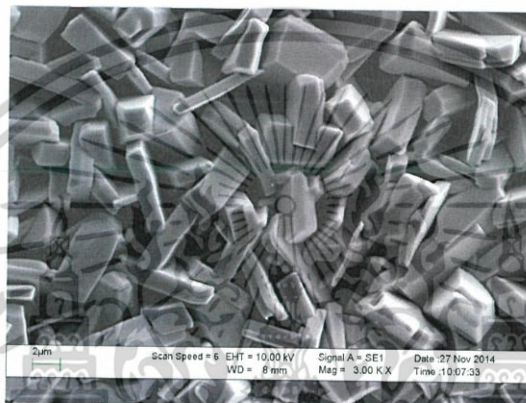
เวลาในการเคลือบ 5, 15 และ 10 นาที ตามลำดับ จากรูปที่ 4.7 เป็นการศึกษาคross-sectionของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ SnS ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ เมื่อใช้อุณหภูมิในการเคลือบ และเวลาที่ใช้ในการเคลือบต่างกัน จะสังเกตเห็นว่าผลึกของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ SnS มีรูปร่างเป็นแถบแกว่งยาว โดยมีพื้นที่หน้าตัดเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ความยาวของเกรนจะเพิ่มขึ้นมาก แต่ความหนาของแถบเกรนจะเพิ่มขึ้นอย่างช้าๆ โดยมีค่าประมาณ 2 ไมโครเมตร จากรูปที่ 4.8 แสดงภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ที่บริเวณภาคตัดขวางของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-SnS/n-Si (100) จะพบว่าเมื่อให้อุณหภูมิแก๊สเริ่มต้น 550 องศาเซลเซียส ใช้เวลาในการเคลือบ 5 นาที ฟิล์มจะบางที่สุด และเมื่อให้อุณหภูมิแก๊สเริ่มต้น 588 องศาเซลเซียส ใช้เวลาในการเคลือบ 10 นาที ความหนาของฟิล์มจะมีค่ามากที่สุด และจากรูปที่ 4.9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของเกรนเมื่อให้อุณหภูมิแก๊สเริ่มต้นต่างๆ ทำให้เห็นว่าเมื่อให้อุณหภูมิแก๊สเริ่มต้นที่ 588 องศาเซลเซียสมีขนาดของเกรนโตสุด

การศึกษาคross-sectionของฟิล์มบางด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-SnS/n-Si (100) ซึ่งจากภาพถ่าย SEM ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-SnS/n-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยการเคลือบฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ SnS ลงบนแผ่นผลึกเดี่ยวของสารกึ่งตัวนำ n-Si (100) ด้วยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในบรรยากาศภายในระบบสุญญากาศ โดยให้อุณหภูมิแก๊สเริ่มต้นต่างกัน คือ 560 และ 580 องศาเซลเซียส ระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงแผ่นฐานรองรับ 7 มิลลิเมตร ใช้เวลาในการเคลือบ 15 นาที จากรูปที่ 4.10 และรูปที่ 4.11 เป็นการศึกษาคross-sectionของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-SnS/n-Si (100) จะสังเกตเห็นว่า เมื่อให้อุณหภูมิแก๊สเริ่มต้น 580 องศาเซลเซียส จะสังเกตเห็นลักษณะรูปร่างเรขาคณิต และขอบเขตของเกรนที่ชัดเจนและดีกว่าเมื่อให้อุณหภูมิแก๊สเริ่มต้น 560 องศาเซลเซียส และจากรูปที่ 4.12 แสดงภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ที่บริเวณภาคตัดขวางของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-SnS/n-Si (100) พบว่าเมื่อให้อุณหภูมิแก๊สเริ่มต้น 580 องศาเซลเซียส จะมีขนาดความหนาของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ SnS มากกว่าเมื่อให้อุณหภูมิแก๊สเริ่มต้น 560 องศาเซลเซียส

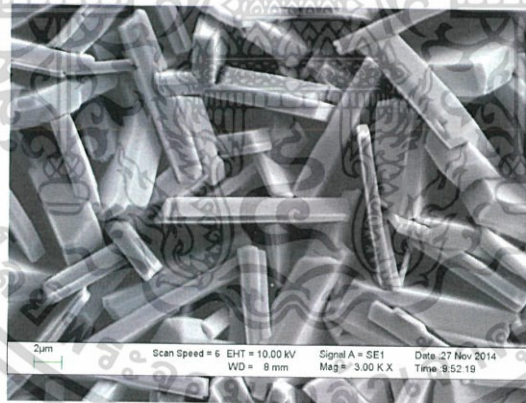
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก)



(ข)



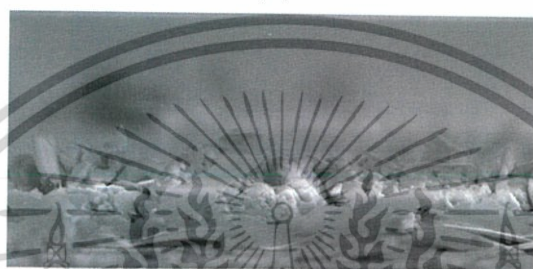
(ค)

รูปที่ 4.7 แสดงภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) กำลังขยาย 3,000 เท่าที่บริเวณผิวหน้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ SnS ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ ก. เมื่อให้อุณหภูมิแก๊สตั้งต้น 550 องศาเซลเซียส และใช้เวลาในการเคลือบ 5 นาที ข. เมื่อให้อุณหภูมิแก๊สตั้งต้น 565 องศาเซลเซียส และใช้เวลาในการเคลือบ 15 นาที ค. เมื่อให้อุณหภูมิแก๊สตั้งต้น 588 องศาเซลเซียส และใช้เวลาในการเคลือบ 10 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับบุคคลที่ใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก)



(ข)



(ค)

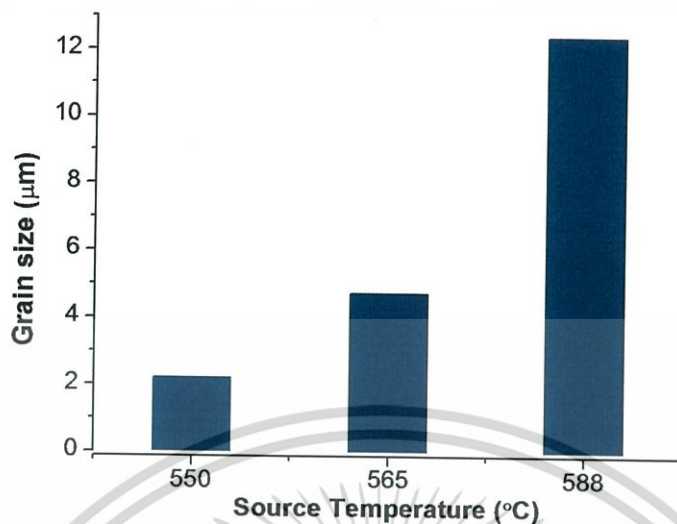
รูปที่ 4.8 แสดงภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) บริเวณภาคตัดขวางของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ SnS ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ

ก. เมื่อให้อุณหภูมิแก๊สสารตั้งต้น 550 องศาเซลเซียส และใช้เวลาในการเคลือบ 5 นาที

ข. เมื่อให้อุณหภูมิแก๊สสารตั้งต้น 565 องศาเซลเซียส และใช้เวลาในการเคลือบ 15 นาที

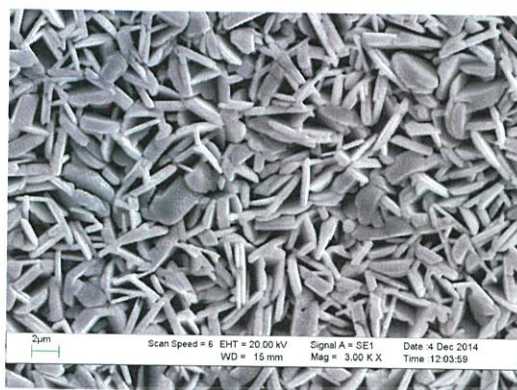
ค. เมื่อให้อุณหภูมิแก๊สสารตั้งต้น 588 องศาเซลเซียส และใช้เวลาในการเคลือบ 10 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารต้นฉบับที่จัดทำขึ้นไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้ทำซ้ำหรือเผยแพร่ในวงกว้างโดยไม่ได้รับอนุญาต  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมีเหตุดเบี่ยงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

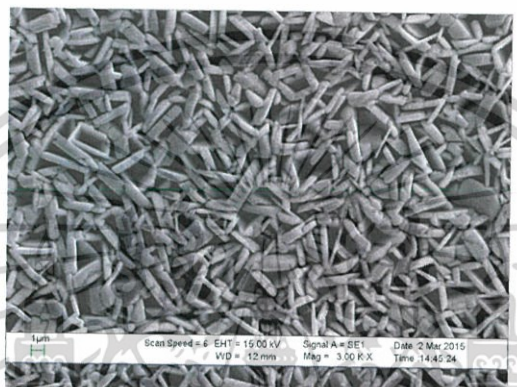


รูปที่ 4.9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของเกรนที่ได้จากภาพถ่าย SEM กับอุณหภูมิของสารตั้งต้นของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ SnS ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ

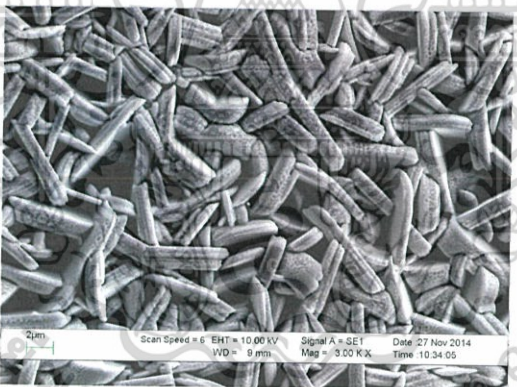
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก)



(ข)



(ค)

รูปที่ 4.10 แสดงภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) กำลังขยาย 3,000 เท่า ที่บริเวณผิวหน้า (บริเวณกลางแผ่นฟิล์ม) ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-SnS/n-Si (100) โดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดภายใน

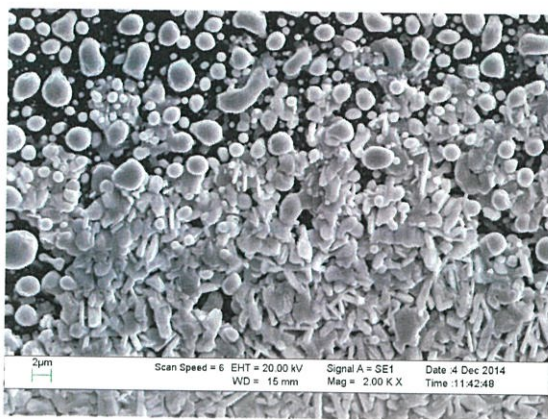
ระบบสุญญากาศ เมื่อใช้เวลาในการเคลือบ 15 นาที

ก. เมื่อให้อุณหภูมิแก๊สเริ่มต้น 560 องศาเซลเซียส

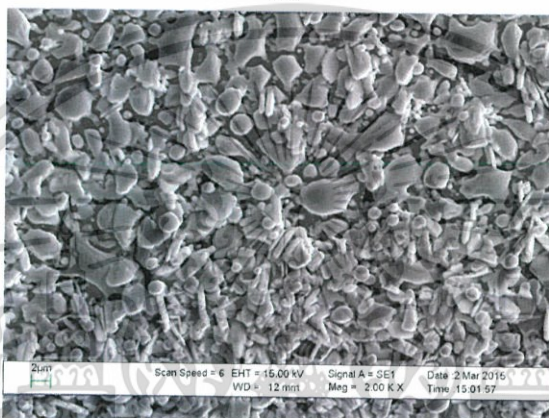
ข. เมื่อให้อุณหภูมิแก๊สเริ่มต้น 573 องศาเซลเซียส

ค. เมื่อให้อุณหภูมิแก๊สเริ่มต้น 580 องศาเซลเซียส

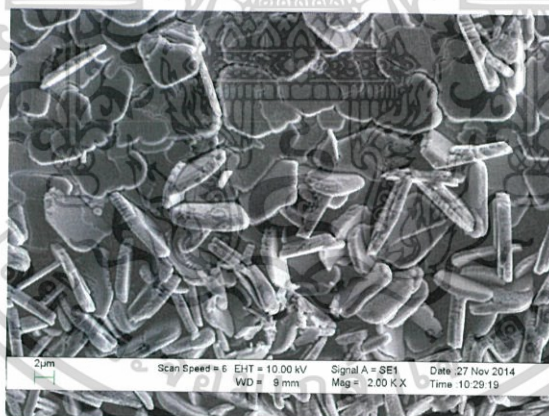
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก)



(ข)



(ค)

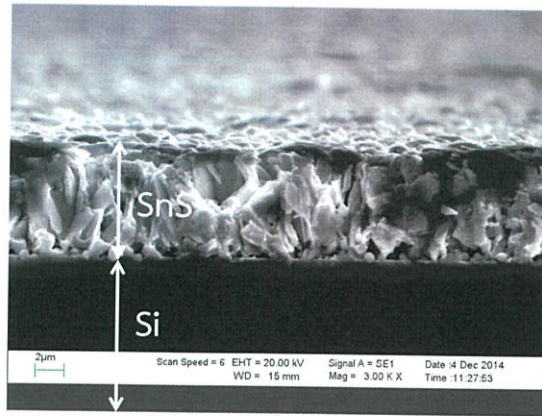
รูปที่ 4.11 แสดงภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) กำลังขยาย 2,000 เท่า ที่บริเวณผิวหน้าของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-SnS/n-Si (100) โดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระบะประชิดภายในระบบสุญญากาศ เมื่อใช้เวลาในการเคลือบ 15 นาที

ก. เมื่อให้อุณหภูมิแก๊สเริ่มต้น 560 องศาเซลเซียส

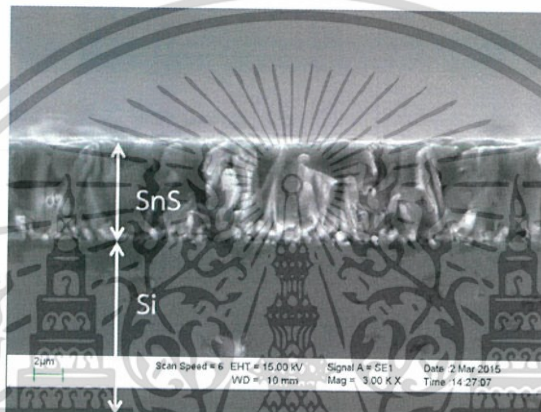
ข. เมื่อให้อุณหภูมิแก๊สเริ่มต้น 573 องศาเซลเซียส

ค. เมื่อให้อุณหภูมิแก๊สเริ่มต้น 580 องศาเซลเซียส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่... ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า... ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น... เจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก)



(ข)



(ค)

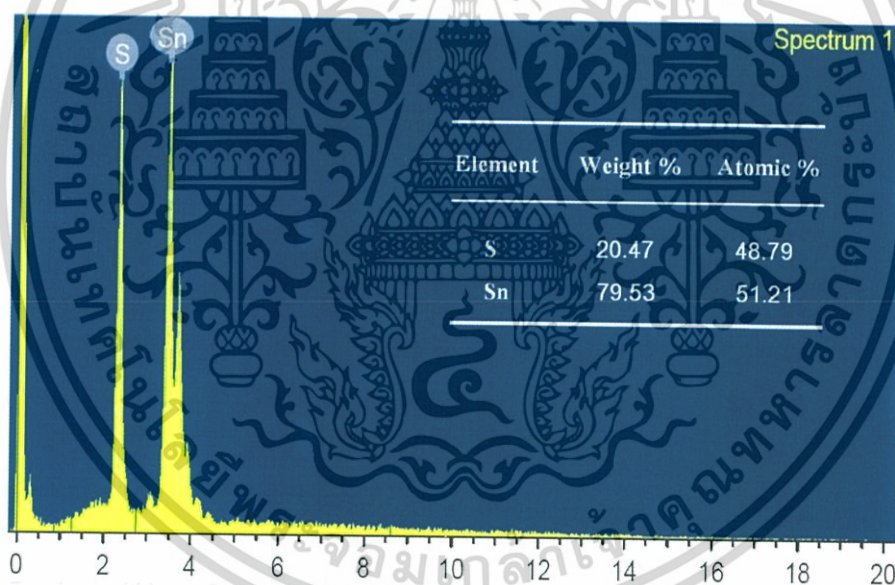
รูปที่ 4.12 แสดงภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) กำลังขยาย 3,000 เท่า ที่บริเวณภาคตัดขวางของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-SnS/n-Si (100) โดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ เมื่อใช้เวลาในการเคลือบ 15 นาที

- ก. เมื่อให้อุณหภูมิแก่สารตั้งต้น 560 องศาเซลเซียส
- ข. เมื่อให้อุณหภูมิแก่สารตั้งต้น 573 องศาเซลเซียส
- ค. เมื่อให้อุณหภูมิแก่สารตั้งต้น 580 องศาเซลเซียส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นเพื่อใช้ในการเรียนการสอน ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งยังเป็นทรัพย์สินของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี และต้องขออนุญาตเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.5 การศึกษาการวิเคราะห์ธาตุเชิงปริมาณ และเชิงคุณภาพด้วยเทคนิคเอ็นเนอร์ยีดีสเพอร์ซีฟสเปกโทรสโกปี (EDS) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ SnS ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ

การวิเคราะห์ธาตุเชิงปริมาณ และเชิงคุณภาพด้วยด้วยเทคนิคเอ็นเนอร์ยีดีสเพอร์ซีฟสเปกโทรสโกปี (EDS หรือ EDX) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ SnS ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ เมื่อให้อุณหภูมิแก่สารตั้งต้นเป็น 565 องศาเซลเซียส โดยการวิเคราะห์ธาตุเชิงคุณภาพ สามารถดูได้จากเส้นสเปกตรัมของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ SnS ที่มีพีคหลักๆ สองพีค คือ พีคของอะตอมของธาตุ S และพีคอะตอมของธาตุ Sn ที่แสดงให้เห็นว่าฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ SnS ที่เตรียมได้ประกอบด้วยสารประกอบ SnS จริงๆ ที่ไม่มีอะตอมของธาตุชนิดอื่นเจือปน ส่วนการวิเคราะห์ธาตุเชิงปริมาณจะแสดงให้เห็นถึงสัดส่วนอะตอมของธาตุ โดยน้ำหนักอะตอมของธาตุ S เป็น 20.47 เปอร์เซ็นต์ (48.79 At%) และอะตอมของธาตุ Sn เป็น 79.53 เปอร์เซ็นต์ (51.21 At%) ดังแสดงในรูปที่ 4.13



รูปที่ 4.13 แสดงสเปกตรัม EDS ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ SnS ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

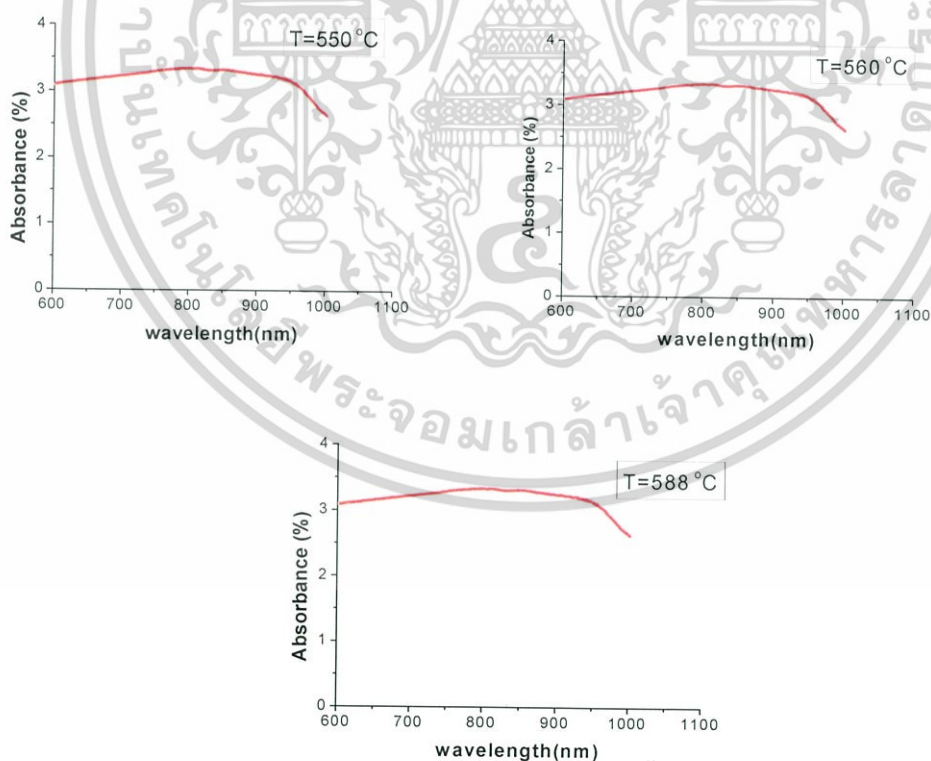
#### 4.6 การศึกษาสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ SnS ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ

สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ SnS ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ เมื่อให้อุณหภูมิแก๊สตั้งต้น ค่าต่างๆ แสดงดังรูปที่ 4.14 ค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง ( $\alpha$ ) สามารถคำนวณหาได้จากความสัมพันธ์

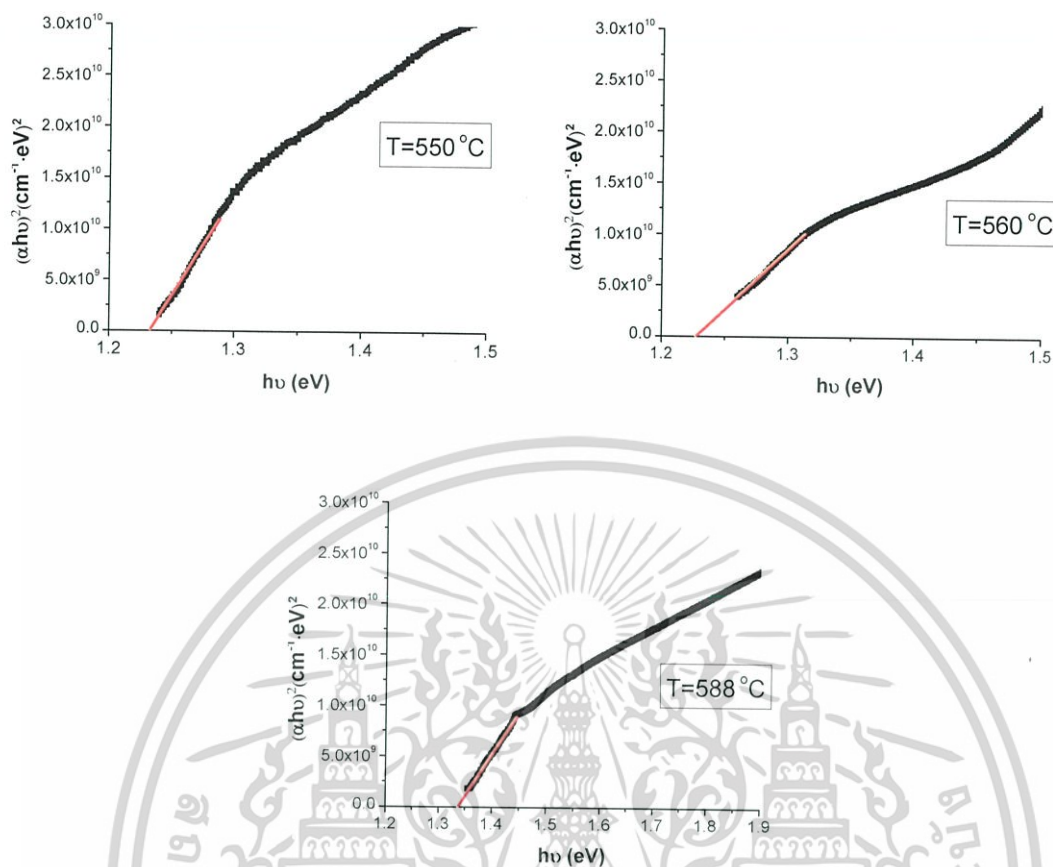
$$\alpha = 2.33 \frac{A}{d}$$

เมื่อ  $A$  คือ ค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง (absorbance)  
 $d$  คือ ความหนาของฟิล์มบาง

เมื่อนำมาเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสงยกกำลังสอง  $(\alpha h \nu)^2$  กับ ค่าพลังงานโฟตอน  $(h \nu)$  แล้วลากเส้นตรงตัดกับแกนพลังงานของโฟตอน โดยค่าตัดแกน  $x$  คือ ค่าช่องว่างแถบพลังงาน ( $E_g$ )



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ารูปที่ 4.14 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง กับ ค่าความยาวคลื่นแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ SnS ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ เมื่อให้อุณหภูมิแก๊สตั้งต้นที่ต่างกัน



รูปที่ 4.15 แสดงกราฟการหาค่าช่องว่างแถบพลังงานของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ SnS ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะเวลาประชิดภายในระบบสุญญากาศ เมื่อให้อุณหภูมิแก่สารตั้งต้นที่ต่างกัน

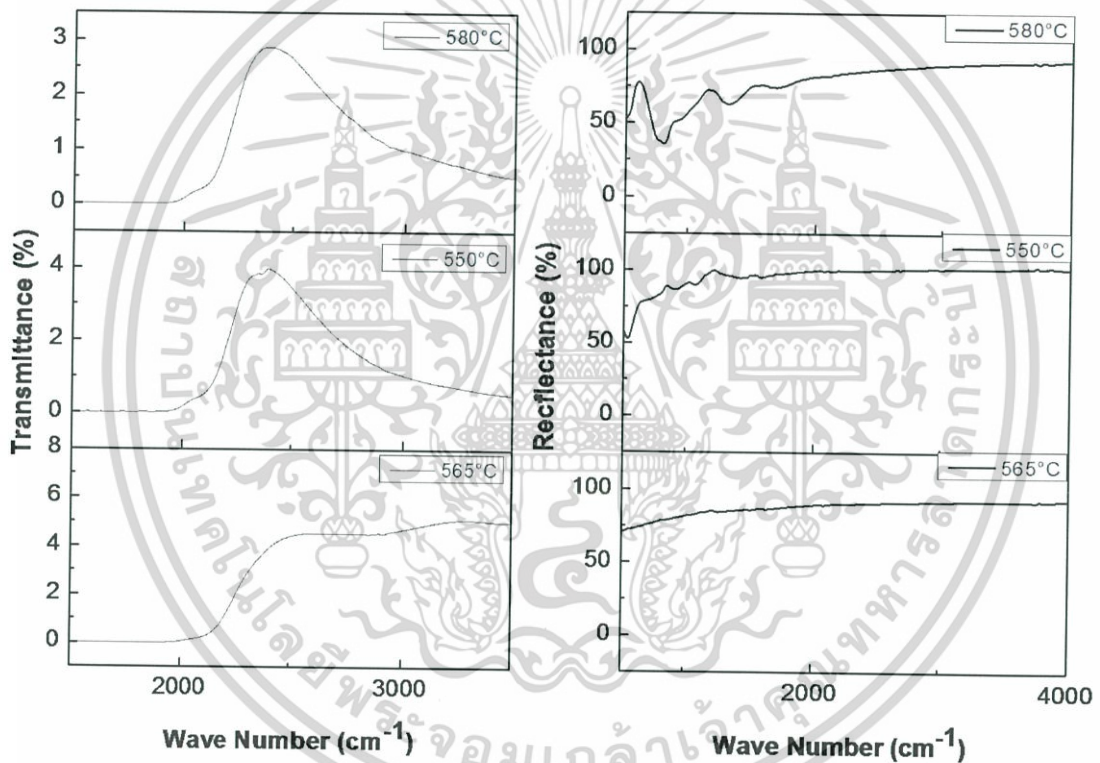
ตารางที่ 4.2 แสดงค่าช่องว่างแถบพลังงาน ( $E_g$ ) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ SnS ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะเวลาประชิดภายในระบบสุญญากาศ เมื่อให้อุณหภูมิแก่สารตั้งต้นที่ต่างกัน

| $T_{\text{source}}$ ( $^{\circ}\text{C}$ ) | Energy Gap (eV) |
|--|-----------------|
| 550  | 1.28            |
| 560  | 1.23            |
| 588  | 1.34            |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.7 การวิเคราะห์เพื่อหาชนิดและโมเลกุลของสารประกอบที่อยู่ในฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ SnS ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ โดยการวัดการดูดกลืนแสงในช่วงอินฟราเรดด้วยเครื่องฟูเรียร์แทรนฟอร์มอินฟราเรด สเปกโทรโฟโตมิเตอร์ (FTIR)

การวิเคราะห์เพื่อหาชนิดและโมเลกุลของสารประกอบที่อยู่ในฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ SnS ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ โดยการวัดการดูดกลืนแสงในช่วงอินฟราเรดด้วยเครื่องฟูเรียร์แทรนฟอร์มอินฟราเรด สเปกโทรโฟโตมิเตอร์ (FTIR) ซึ่งทำการวัดค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสง (Transmittance : % $T$ ) และค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนแสง (Reflectance : % $R$ ) ที่ใช้เลขคลื่นมีค่าในช่วง 1000 - 4000 ต่อเซนติเมตร



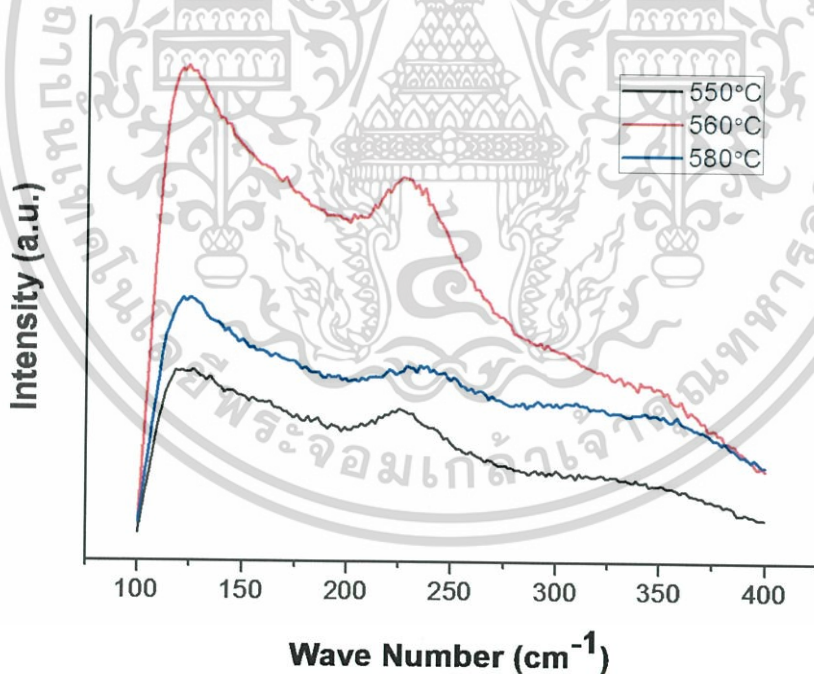
รูปที่ 4.16 แสดงสเปกตรัม FTIR ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ SnS ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ เมื่อให้อุณหภูมิแก่แผ่นฐานรองรับและสารตั้งต้นที่ต่างกัน ซึ่งรูปซ้ายมือแสดงสเปกตรัมของค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสง (Transmittance) ส่วนรูปขวามือแสดงสเปกตรัมของค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนแสง (Reflectance)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

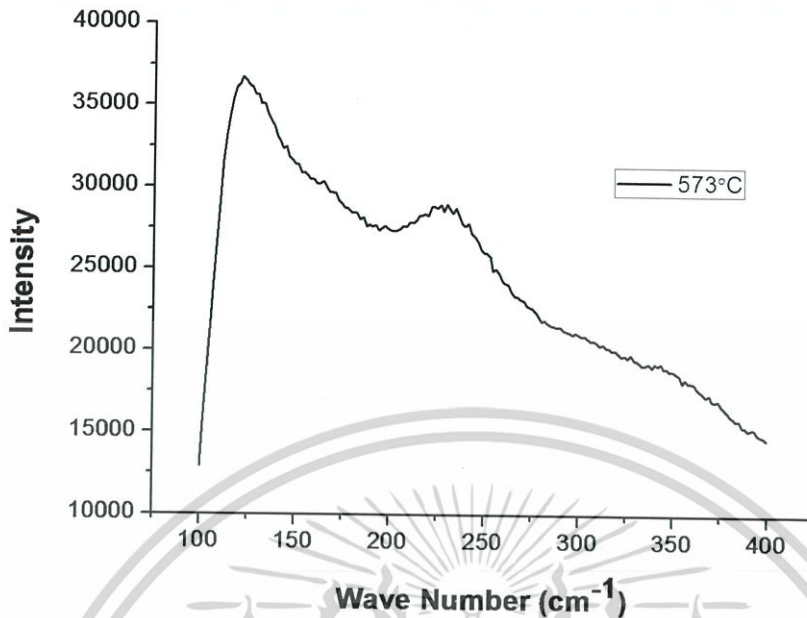
4.8 การศึกษาชนิดการสั่นของโครงผลึกด้วยเทคนิครามานสเปกโทรสโกปี ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ SnS ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ และของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-SnS/n-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ

จากสเปกตรัมรามานสเปกโทรสโกปี ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ SnS ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ และไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-SnS/n-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ แสดงให้เห็นถึงผลต่างพลังงานของโฟตอนที่กระเจิงเมื่อเทียบกับพลังงานของโฟตอนของเลเซอร์ที่ตกกระทบบนสารตัวอย่างจะสอดคล้องกับพลังงานของการสั่นของพันธะเคมีระหว่างโมเลกุลในโครงผลึกของสารตัวอย่างซึ่งจะเป็นแบบควอนไทซ์

จากรูปที่ 4.16 และรูปที่ 4.17 แสดงสเปกตรัมรามานในช่วงเลขคลื่น 100 - 400 ต่อเซนติเมตร ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ SnS ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ และแสดงสเปกตรัมรามานของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-SnS/n-Si (100) ตามลำดับ แสดงให้เห็นถึงพีคที่โดดเด่นสองพีค คือ ที่เลขคลื่นประมาณ 125 และ 230 ต่อเซนติเมตร และเมื่อเลขคลื่นมากกว่า 230 ต่อเซนติเมตร ความเข้มของสเปกตรัมรามานจะลดลงอย่างเห็นได้ชัดเจน



รูปที่ 4.17 แสดงสเปกตรัมรามานสเปกโทรสโกปีของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ SnS ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ เมื่อให้อุณหภูมิแก่สารตั้งต้นต่างกัน



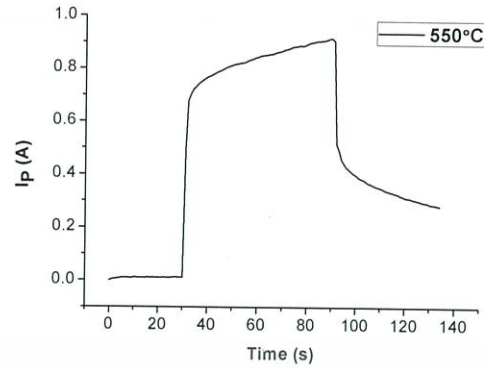
รูปที่ 4.18 แสดงสเปกตรัมรามานสเปกโทรสโกปีของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-SnS/n-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ เมื่อให้อุณหภูมิแก่สารตั้งต้นเท่ากับ 573 องศาเซลเซียส

#### 4.9 การศึกษาสภาพนำไฟฟ้าเชิงแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ SnS ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ และของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-SnS/n-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ

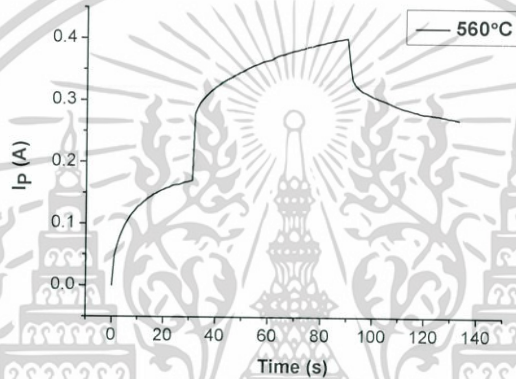
การศึกษาสภาพนำไฟฟ้าเชิงแสงเป็นการหาความสัมพันธ์ระหว่าง ค่ากระแสโฟโต ที่เปลี่ยนแปลงไปตามเวลา ขณะฉายแสงจากหลอดไฟฮาโลเจนที่มีความเข้มแสง 100 มิลลิวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร ภายใต้การไบแอสที่แรงดันไฟฟ้าค่าต่างๆ พบว่าฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ SnS ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ มีการตอบสนองกับแสงสีขาวจากหลอดฮาโลเจนด้วยช่วงเวลาตอบสนองที่สั้นมากทั้งช่วงกระแสโฟโตขาขึ้น และช่วงกระแสโฟโตขาลง

การหาค่าความหนาแน่นของกักพาหะของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ SnS ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ และไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-SnS/n-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ หาได้จากการวัดค่าสภาพนำไฟฟ้าเชิงแสงในช่วงกลาง โดยที่สามารถหาค่าต่างๆ ได้ ดังแสดงในตารางที่ 4.3 และจากนั้นจะเป็นการหาค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของค่าสภาพนำไฟฟ้าเชิงแสง ดังแสดงในตารางที่ 4.4 ที่หาได้จากการปรับผลการทดลองที่อุณหภูมิห้องให้เข้ากับฟังก์ชันมัลติเพิลเอ็กซ์โพเนนเชียล

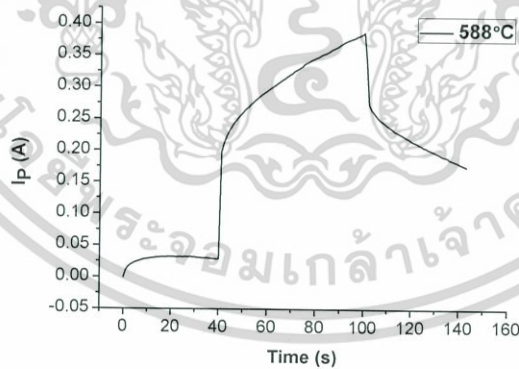
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก)

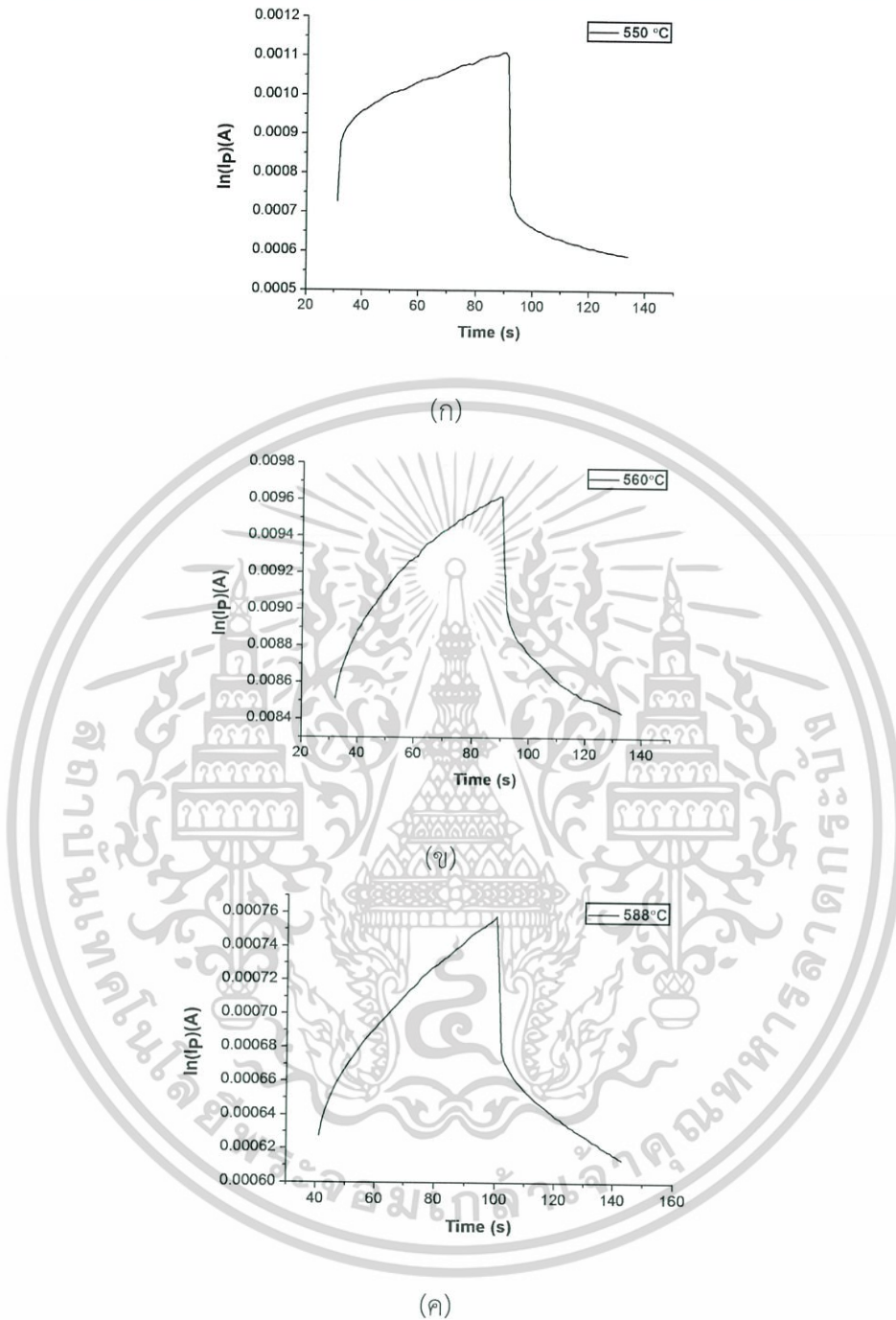


(ข)



(ค)

รูปที่ 4.19 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า  $I_p$  กับ เวลาของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ SnS ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความเอกลสารนี้เป็นเอกลสร้อนในระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ เมื่อให้อุณหภูมิแก๊สสารตั้งต้นต่างกัน ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น. เมื่อให้อุณหภูมิแก๊สสารตั้งต้น 550 องศาเซลเซียส  
 ข. เมื่อให้อุณหภูมิแก๊สสารตั้งต้น 560 องศาเซลเซียส  
 ค. เมื่อให้อุณหภูมิแก๊สสารตั้งต้น 588 องศาเซลเซียส

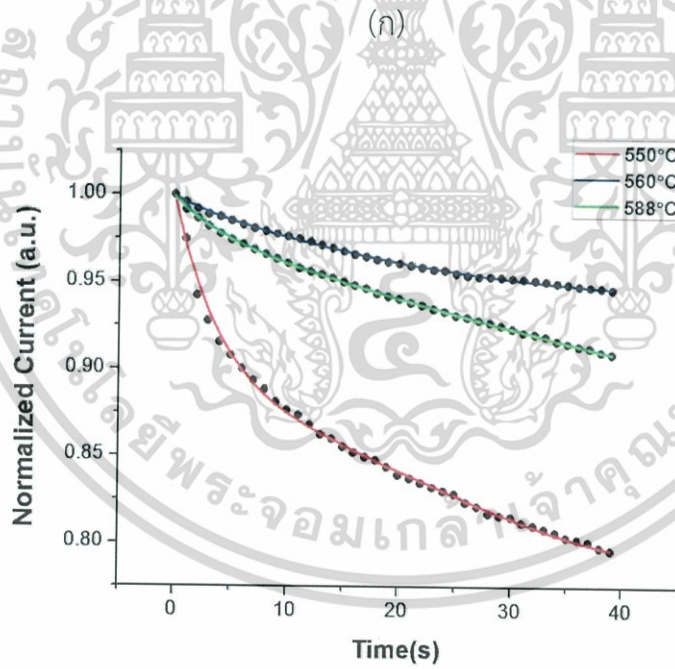
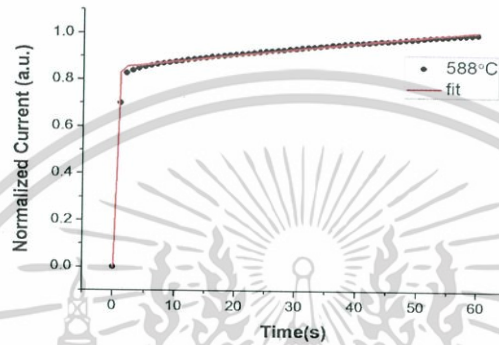
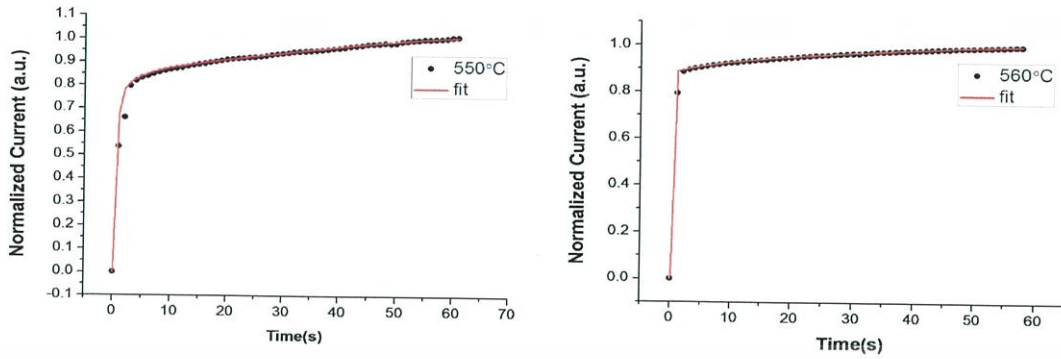


รูปที่ 4.20 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า  $\ln I_p$  กับ เวลา ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ SnS ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะเวลาประชิดภายในระบบสุญญากาศ เมื่อให้อุณหภูมิแก๊สสารตั้งต้นต่างกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สูงงาน ไว้สำหรับใช้ในงานเพื่อการศึกษาค้นคว้าวิจัยในสาขาเทคโนโลยีสารสนเทศให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น ผู้จัดทำเป็นต้นฉบับนี้ขอสงวนสิทธิ์ในเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ก. เมื่อให้อุณหภูมิแก๊สสารตั้งต้น 550 องศาเซลเซียส
- ข. เมื่อให้อุณหภูมิแก๊สสารตั้งต้น 560 องศาเซลเซียส
- ค. เมื่อให้อุณหภูมิแก๊สสารตั้งต้น 588 องศาเซลเซียส



(ข)

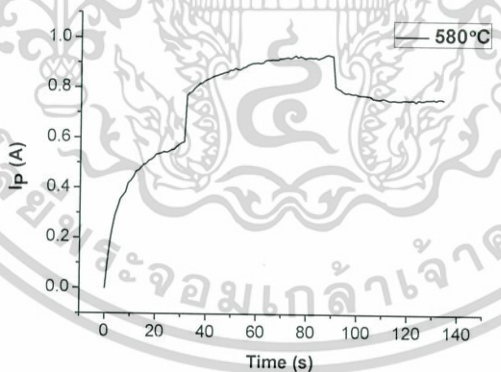
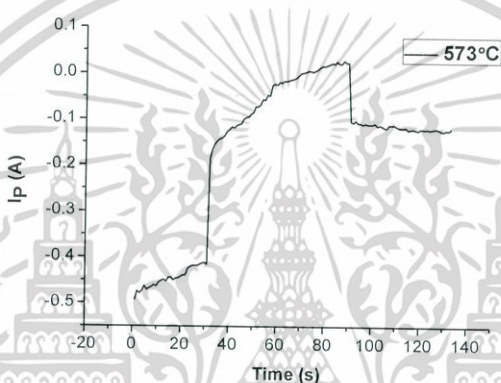
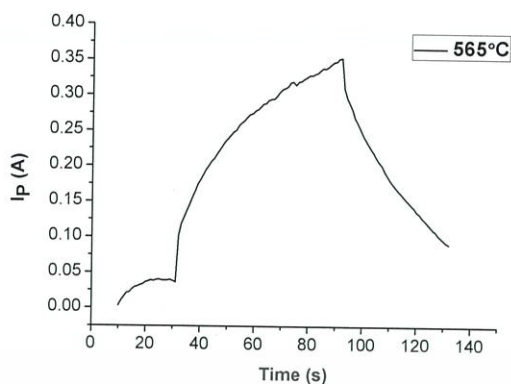
รูปที่ 4.21 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่ากระแสออร์มัลไลซ์ กับ เวลา ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่เคลื่อนลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามให้คัดลอกสิ่งนี้ออกไปเผยแพร่หรือส่งต่อข้อมูลอันถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

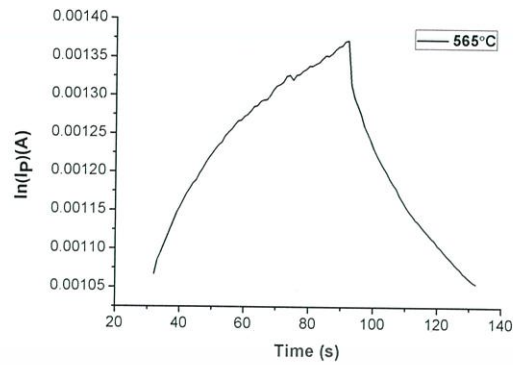
ก. กรณีค่ากระแสโฟโตขาขึ้น

ข. กรณีค่ากระแสโฟโตขาลง

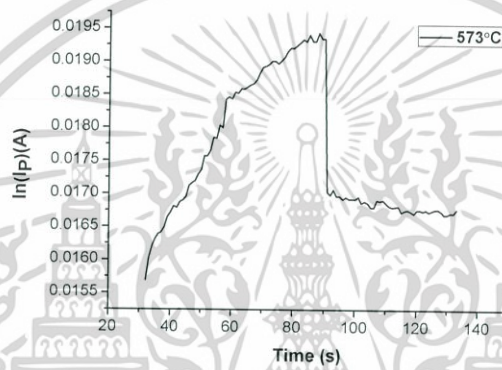


รูปที่ 4.22 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า  $I_p$  กับ เวลา ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-SnS/n-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ เมื่อให้อุณหภูมิแก๊สสารตั้งต้นต่างกัน

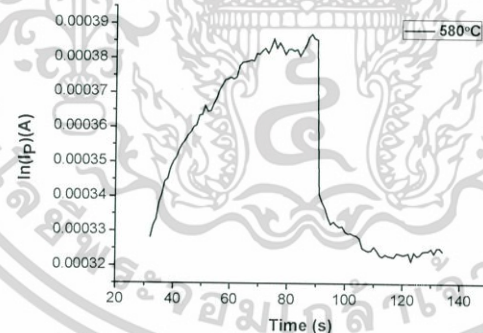
- เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการศึกษาเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น หากท่านมีข้อสงสัย กรุณาติดต่อทางเรา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
- ก. เมื่อให้อุณหภูมิแก๊สสารตั้งต้น 565 องศาเซลเซียส
  - ข. เมื่อให้อุณหภูมิแก๊สสารตั้งต้น 573 องศาเซลเซียส
  - ค. เมื่อให้อุณหภูมิแก๊สสารตั้งต้น 580 องศาเซลเซียส



(ก)



(ข)



(ค)

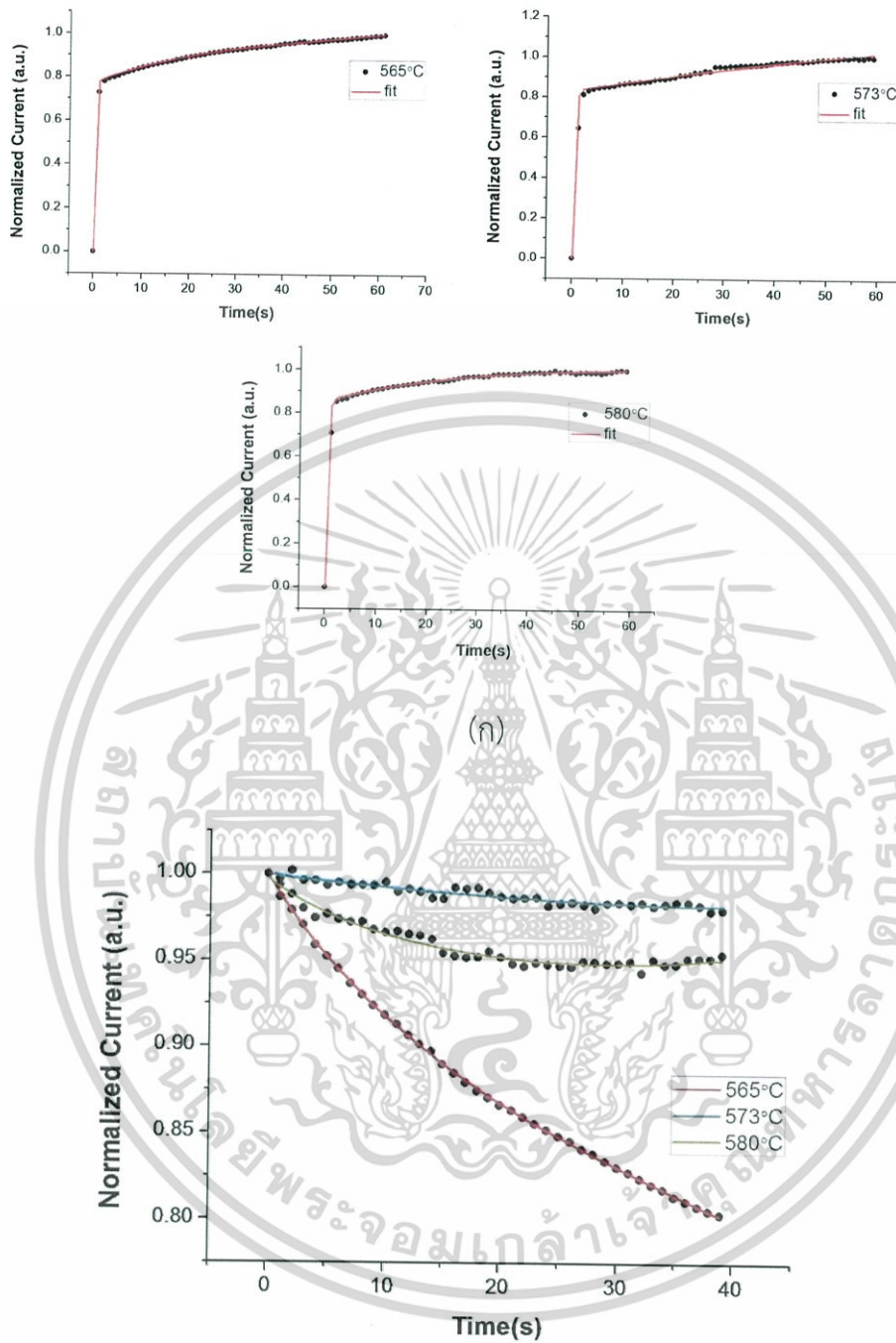
รูปที่ 4.23 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า  $\ln I_p$  กับ เวลา ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-SnS/n-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยษะประชิดภายในระบบสุญญากาศ เมื่อให้อุณหภูมิแก๊สสารตั้งต้นต่างกัน

ก. เมื่อให้อุณหภูมิแก๊สสารตั้งต้น 565 องศาเซลเซียส

ข. เมื่อให้อุณหภูมิแก๊สสารตั้งต้น 573 องศาเซลเซียส

ค. เมื่อให้อุณหภูมิแก๊สสารตั้งต้น 580 องศาเซลเซียส

เอกสารนี้เป็นเอกสารของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น หากมีข้อสงสัย กรุณาติดต่อฝ่ายประชาสัมพันธ์ โทร. 02-2616000 หรือ 02-2616001



รูปที่ 4.24 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่ากระแสไฟโตนอร์มัลไลซ์ กับ เวลา ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบ

วิธีพันธุของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-SnS/n-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ

ก. กรณีค่ากระแสไฟโตขาขึ้น

ข. กรณีค่ากระแสไฟโตขาลง

| Samples | Rise Time (s)                         |  |   |  |   | Decay Time (s)                            |  |                                       |   |   |
|---------|---------------------------------------|--|---|--|---|---|--|---------------------------------------|---|---|
|         | 1 <sup>st</sup> Term                  | 2 <sup>nd</sup> Term                   | 3 <sup>rd</sup> Term                    | 4 <sup>th</sup> Term                   | 5 <sup>th</sup> Term  | 1 <sup>st</sup> Term                      | 2 <sup>nd</sup> Term                   | 3 <sup>rd</sup> Term                  | 4 <sup>th</sup> Term                    | 5 <sup>th</sup> Term  |
| 550     | $\tau_{r1} = 7.67$<br>$A_1 = 0.7389$  | $\tau_{r2} = 169.77$<br>$A_2 = -36.04$ | $\tau_{r3} = 343.64$<br>$A_3 = -0.1201$ | $\tau_{r4} = 366.30$<br>$A_4 = 308$    | $\tau_{r5} = 546.44$<br>$A_5 = -353.7$<br>$\beta = 0.9676$  | $\tau_{d1} = 34.55$<br>$A_1 = 0.1415$     | $\tau_{d2} = 150.60$<br>$A_2 = -206.4$ | $\tau_{d3} = 297.61$<br>$A_3 = 2268$  | $\tau_{d4} = 377.35$<br>$A_4 = -2420$   | $\tau_{d5} = 540.54$<br>$A_5 = 358.3$<br>$\beta = 0.2381$   |
|         | $\tau_{r1} = 10.98$<br>$A_1 = 0.8839$ | $\tau_{r2} = 293.25$<br>$A_2 = 288.9$  | $\tau_{r3} = 543.47$<br>$A_3 = 4.513$   | $\tau_{r4} = 813.00$<br>$A_4 = 6179$   | $\tau_{r5} = 1027.40$<br>$A_5 = 10610$<br>$\beta = 0.6005$  | $\tau_{d1} = 343.64$<br>$A_1 = 0.005661$  | $\tau_{d2} = 584.79$<br>$A_2 = -3666$  | $\tau_{d3} = 578.03$<br>$A_3 = 3556$  | $\tau_{d4} = 1000$<br>$A_4 = 130.5$     | $\tau_{d5} = 1362.5$<br>$A_5 = -19.85$<br>$\beta = 0.828$   |
|         | $\tau_{r1} = 7.77$<br>$A_1 = 0.8505$  | $\tau_{r2} = 234.74$<br>$A_2 = 156.4$  | $\tau_{r3} = 393.70$<br>$A_3 = -3503$   | $\tau_{r4} = 473.93$<br>$A_4 = 6201$   | $\tau_{r5} = 526.31$<br>$A_5 = -3002$<br>$\beta = 0.8503$   | $\tau_{d1} = 234.19$<br>$A_1 = -0.02093$  | $\tau_{d2} = 448.43$<br>$A_2 = -1001$  | $\tau_{d3} = 526.31$<br>$A_3 = 2794$  | $\tau_{d4} = 602.41$<br>$A_4 = 1853$    | $\tau_{d5} = 632.91$<br>$A_5 = 1853$<br>$\beta = 0.006265$  |
| 565     | $\tau_{r1} = 57.07$<br>$A_1 = 0.7762$ | $\tau_{r2} = 169.20$<br>$A_2 = 333$    | $\tau_{r3} = 286.5$<br>$A_3 = -2390$    | $\tau_{r4} = 427.35$<br>$A_4 = 3273$   | $\tau_{r5} = 465.11$<br>$A_5 = -11850$<br>$\beta = 0.05007$ | $\tau_{d1} = 106.04$<br>$A_1 = 0.02197$   | $\tau_{d2} = 168.91$<br>$A_2 = 428.5$  | $\tau_{d3} = 224.21$<br>$A_3 = -1828$ | $\tau_{d4} = 278.55$<br>$A_4 = 1874$    | $\tau_{d5} = 312.5$<br>$A_5 = -473.6$<br>$\beta = 0.729$    |
|         | $\tau_{r1} = 16.80$<br>$A_1 = 0.8352$ | $\tau_{r2} = 279.32$<br>$A_2 = -20.6$  | $\tau_{r3} = 208.76$<br>$A_3 = -1696$   | $\tau_{r4} = 497.51$<br>$A_4 = 9808$   | $\tau_{r5} = 746.26$<br>$A_5 = 9808$<br>$\beta = 0.1242$    | $\tau_{d1} = 155.28$<br>$A_1 = 0.01613$   | $\tau_{d2} = 746.26$<br>$A_2 = -128.7$ | $\tau_{d3} = 826.44$<br>$A_3 = 232.6$ | $\tau_{d4} = 16539.18$<br>$A_4 = 232.6$ | $\tau_{d5} = 1855.73$<br>$A_5 = -497.7$<br>$\beta = 0.4871$ |
|         | $\tau_{r1} = 6.96$<br>$A_1 = 0.8568$  | $\tau_{r2} = 157.23$<br>$A_2 = 0.053$  | $\tau_{r3} = 330.03$<br>$A_3 = 150.8$   | $\tau_{r4} = 540.54$<br>$A_4 = -518.6$ | $\tau_{r5} = 2647.49$<br>$A_5 = 6833$<br>$\beta = 0.1385$   | $\tau_{d1} = 1855.73$<br>$A_1 = 0.000841$ | $\tau_{d2} = 746.26$<br>$A_2 = -628.2$ | $\tau_{d3} = 826.44$<br>$A_3 = 1343$  | $\tau_{d4} = 16539.18$<br>$A_4 = 2684$  | $\tau_{d5} = 1855.73$<br>$A_5 = 3397$<br>$\beta = 0.7966$   |

#### ตารางที่ 4.3

แสดงค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของค่าสภาพนำไฟฟ้าเชิงแสงที่ได้จากการปรับผลการทดลองที่อุณหภูมิห้อง ให้เข้ากับฟังก์ชันมัลติเพิลเอ็กซ์โพเนนเชียล ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ SnS ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกใส และของไดโอดที่มีรอยต่อแบบอิมปริชันของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-SnS/n-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะเวลาภายในระบบสุญญากาศ

ตารางที่ 4.4 แสดงความค่าหนาแน่นของกับดักพาหะ ที่ได้จากการวัดค่าสภาพนำไฟฟ้าเชิงแสงในช่วงกระแสโฟโตฮาลง ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ SnS ที่เคลือบบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยด้วยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระบะประชิดภายในระบบสุญญากาศ เมื่อให้อุณหภูมิแก่สารตั้งต้นเท่ากับ 560 องศาเซลเซียส

| Decay Time (s)                |  |                               |  |                               |  |                               |  |                               |   |
|-------------------------------|--|-------------------------------|--|-------------------------------|--|-------------------------------|--|-------------------------------|---|
| 1 <sup>st</sup> Term          |  | 2 <sup>nd</sup> Term          |  | 3 <sup>rd</sup> Term          |  | 4 <sup>th</sup> Term          |  | 5 <sup>th</sup> Term          |   |
| $I_0$<br>(A)<br>( $10^{-3}$ ) | $\sigma_{II}$<br>( $\text{cm}^{-2}$ )<br>( $10^{11}$ ) | $I_0$<br>(A)<br>( $10^{-3}$ ) | $\sigma_{II}$<br>( $\text{cm}^{-2}$ )<br>( $10^{11}$ ) | $I_0$<br>(A)<br>( $10^{-3}$ ) | $\sigma_{II}$<br>( $\text{cm}^{-2}$ )<br>( $10^{11}$ ) | $I_0$<br>(A)<br>( $10^{-3}$ ) | $\sigma_{II}$<br>( $\text{cm}^{-2}$ )<br>( $10^{11}$ ) | $I_0$<br>(A)<br>( $10^{-3}$ ) | $\sigma_{II}$ ( $\text{cm}^{-2}$ )<br>( $10^{11}$ ) |
| 1.001                         | 9.209  | 1.001                         | 9.209  | 1.001                         | 9.209  | 1.000                         | 9.209  | 1.000                         | 9.209   |

\*หมายเหตุ

$$\sigma_{II} \text{ สามารถหาได้จากความสัมพันธ์ } \sigma_{II} = \frac{I_1}{e\mu V_a} \left( \frac{l}{w} \right)$$

ค่าแรงดันไฟฟ้า ( $V_a$ ) = 25 โวลต์

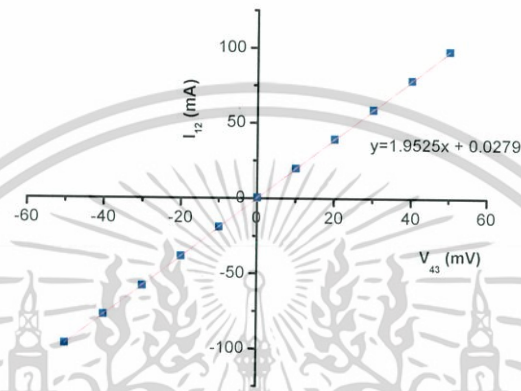
ค่าสภาพคล่องของโฮล = 75.48 ตารางเซนติเมตรต่อ (โวลต์-วินาที)

พื้นที่ผิวของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ SnS ( $w \times l$ ) = 0.12x0.25 ตารางเซนติเมตร

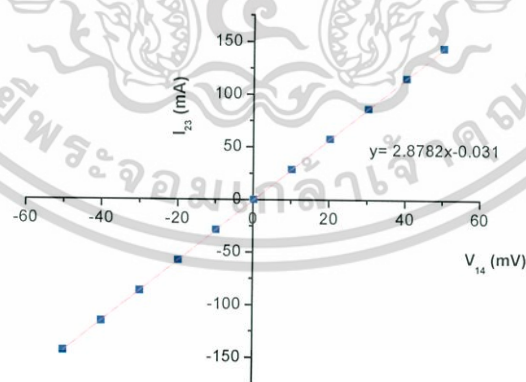
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.10 ผลการศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ SnS ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ

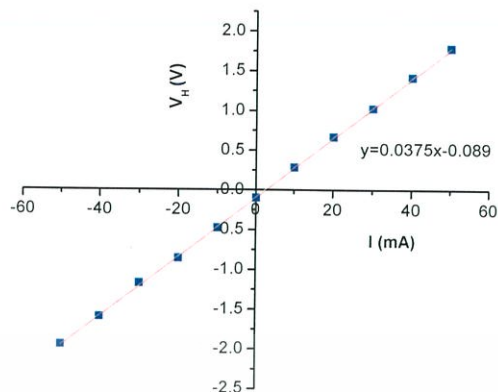
##### 4.10.1 การศึกษาค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ SnS ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ เมื่อให้อุณหภูมิแก่สารตั้งต้นเท่ากับ 565 องศาเซลเซียส



รูปที่ 4.25 แสดงการหาค่าความต้านทาน  $R_1$  ที่ได้จากการวัดค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าด้วยวิธีแวนเดอร์เพาว์ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้อง ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ SnS ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ



รูปที่ 4.26 แสดงการหาค่าความต้านทาน  $R_2$  ที่ได้จากการวัดค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าด้วยวิธีแวนเดอร์เพาว์ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้อง ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ SnS ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ



รูปที่ 4.27 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า  $V_H$  กับ  $I$  เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิอุณหภูมิต่ำของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ SnS ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ

จากค่าความต้านทานไฟฟ้า  $R_1$  และ  $R_2$  ของรูปที่ 4.23 และ 4.24 สามารถนำไปคำนวณหาค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าโดยใช้วิธีแวนเดอร์เพาว์ดังความสัมพันธ์

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

เมื่อ

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

พบว่าค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ SnS มีค่าเท่ากับ 0.54 โอห์ม-เซนติเมตร

ค่าสัมประสิทธิ์ของฮอลล์ ( $R_H$ ) สามารถคำนวณได้จากค่าความชันของกราฟในรูปที่ 4.25 โดยอาศัยความสัมพันธ์ดังสมการ

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

เมื่อ  $d$  คือ ค่าความหนาของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ SnS ส่วน  $B$  คือ ค่าความเข้มของสนามแม่เหล็กซึ่งมีค่าเท่ากับ 4600 เกาส์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

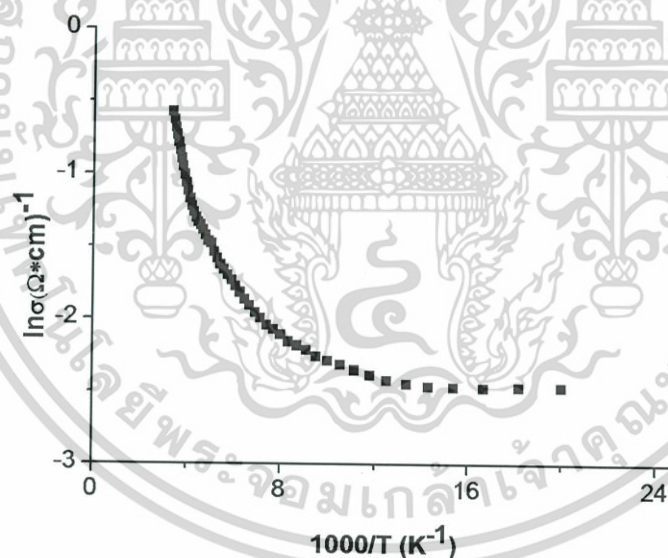
ปริมาณค่าความหนาแน่นของพาหะอิสระ ค่าความหนาแน่นของโฮล และค่าสภาพคล่องพาหะจะคำนวณได้จากความสัมพันธ์ดังสมการ

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

และ 
$$\mu_H = \frac{R_H}{\rho}$$

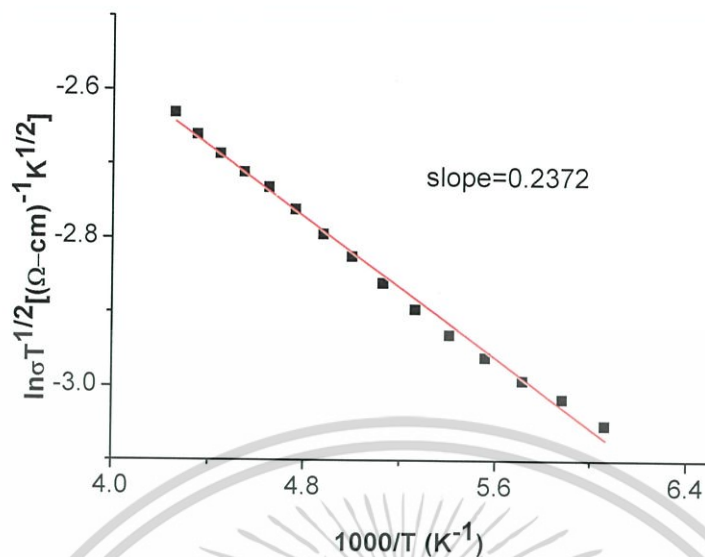
พบว่าค่าสัมประสิทธิ์ของฮอลล์ ค่าความหนาแน่นของโฮล และค่าสภาพคล่องของโฮล เท่ากับ 40.76 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อคูลอมบ์,  $1.53 \times 10^{17}$  ต่อลูกบาศก์เซนติเมตร และ 75.48 ตารางเซนติเมตรต่อโวลต์ต่อวินาที

4.10.2 ผลการศึกษาสภาพนำไฟฟ้าที่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิห้อง ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ SnS ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ เมื่อให้อุณหภูมิแก่สารตั้งต้นเท่ากับ 565 องศาเซลเซียส

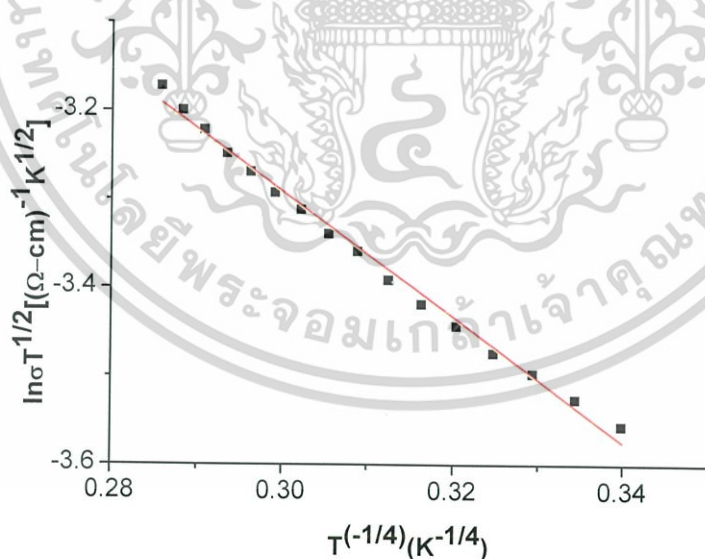


รูปที่ 4.28 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า  $\ln\sigma$  กับ  $\frac{1000}{T}$  ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ SnS ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ เมื่อให้อุณหภูมิแก่สารตั้งต้นเท่ากับ 565 องศาเซลเซียส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.29 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า  $\ln\sigma T^{\frac{1}{2}}$  กับ  $\frac{1000}{T}$  ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ SnS ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ เมื่อให้อุณหภูมิแก่สารตั้งต้นเท่ากับ 565 องศาเซลเซียส



รูปที่ 4.30 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า  $\ln\sigma T^{\frac{1}{2}}$  กับ  $T^{-\frac{1}{4}}$  ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ SnS ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ เมื่อให้อุณหภูมิแก่สารตั้งต้นเท่ากับ 565 องศาเซลเซียส

วิธีการคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ทางไฟฟ้าในที่นี่จะใช้ฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ SnS ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ เมื่อให้อุณหภูมิแก่สารตั้งต้นเท่ากับ 565 องศาเซลเซียส มาเป็นตัวอย่างในการคำนวณ โดยเริ่มจากแบบจำลองของซีโดที่อุณหภูมิปานกลางในช่วง 235 ถึง 165 เคลวิน ซึ่งสามารถคำนวณหาค่าพลังงานกระตุ้น ( $E_a$ ) ได้จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $\ln \sigma T^{\frac{1}{2}}$  กับ  $\frac{1000}{T}$  โดยเริ่มจาก

- การหาค่าพลังงานกระตุ้น ( $E_a$ )

$$\sigma T^{\frac{1}{2}} = \sigma_0 \exp\left(-\frac{E_a}{kT}\right)$$

$$\ln\left(\sigma T^{\frac{1}{2}}\right) = -\frac{E_a}{k}\left(\frac{1}{T}\right) + \ln \sigma_0$$

$$\ln\left(\sigma T^{\frac{1}{2}}\right) = -\frac{E_a}{1000k}\left(\frac{1000}{T}\right) + \ln \sigma_0$$

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

แทนค่า

$$E_a = \frac{(1000)(k)(\text{ความชัน})}{1.6 \times 10^{-19}}; \text{ความชัน} = 0.2372$$

$$E_a = \frac{(1000k)(1.38 \times 10^{-23})(0.2372)}{1.6 \times 10^{-19}}$$

$$E_a = 0.020 \text{ อิเล็กตรอนโวลต์}$$

- การหาค่าเฟอร์มิตติวิตี ( $\epsilon_s$ )

$$(\epsilon_s) = \epsilon_r \epsilon_0$$

แทนค่า

$$\epsilon_s = (10.65)(8.85 \times 10^{-14})$$

$$\epsilon_s = 9.45252 \times 10^{-13} \text{ ฟารัดต่อตารางเซนติเมตร}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- การหาค่าความหนาแน่นของอะตอมผู้รับ ( $N_a$ )

$$E_b = \frac{e^2 L^2 N_a}{8 \epsilon_s}$$

$$N_a = \frac{8 \epsilon_s E_a}{e^2 L^2} \quad ; (L^2 = 4.73 \times 10^{-6})$$

แทนค่า 
$$N_a = \frac{8(9.4252 \times 10^{-13})(0.0204)(1.6 \times 10^{-19})}{(1.6 \times 10^{-19})(4.73 \times 10^{-6})^2}$$

$$N_a = 4.297 \times 10^{16} \text{ ต่อลูกบาศก์เมตร}$$

- การหาค่าความยาวเดอบาย ( $L_D$ )

$$L_D = \left[ \frac{kT \epsilon_s}{e^2 N_a} \right]^{\frac{1}{2}}$$

แทนค่า 
$$L_D = \left( \frac{(1.38 \times 10^{-23})(235)(9.4252 \times 10^{-13})}{(1.6 \times 10^{-19})(4.2970 \times 10^{16})} \right)^{\frac{1}{2}}$$

$$L_D = 1.666 \times 10^{-9} \text{ เซนติเมตร}$$

- การหาค่าระดับพลังงานของกึ่งตัวนำ ( $E_i$ )

$$E_a = \frac{1}{2} E_g - E_i$$

$$E_i = \frac{1}{2} E_g - E_a$$

แทนค่า 
$$E_i = \frac{1}{2}(1.31) - 0.0204$$

$$E_i = 0.634 \text{ อิเล็กตรอนโวลต์}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- การหาค่าความหนาแน่นของกักพาหะ ( $N_i$ )

$$\sigma = \left( \frac{L^2 e^2 N_v N_a N_c}{2kT(N_i - LN_a)} \right) \exp\left(\frac{E_a}{kT}\right)$$

$$N_i = \left( \frac{L^2 e^2 N_v N_a N_c}{2kT\sigma} \right) \exp\left(\frac{E_a}{kT}\right) + LN_a$$

สามารถหาค่า  $v_c$  ได้จาก

$$v_c = \left( \frac{kT}{2\pi m^*} \right)^{\frac{1}{2}}$$

แทนค่า

$$v_c = \left( \frac{(1.38 \times 10^{-23})(235)}{2\pi(1.5 \times 9.1 \times 10^{-31})} \right)^{\frac{1}{2}}$$

$$v_c = 1.944 \times 10^4 \text{ เซนติเมตรต่อวินาที}$$

สามารถหาค่า  $N_v$  ได้จาก

$$N_v = 2 \left[ \frac{2\pi m^* kT}{h^2} \right]^{\frac{3}{2}}$$

$$N_v = 2 \left[ \frac{2\pi(1.5 \times 9.1 \times 10^{-31}) \times (1.38 \times 10^{-23}) \times (235)}{(6.663 \times 10^{-34})^2} \right]^{\frac{3}{2}}$$

$$N_v = 3.183 \times 10^{25} \text{ ต่อตารางเซนติเมตร}$$

และประมาณว่าขนาดเกรนของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ SnS ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ มีค่าประมาณเท่ากับค่าความหนาของแท่งผลึกคือ 2 ไมโครเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ฉะนั้น

$$N_i = \left( \frac{(4.73 \times 10^{-6})^2 (1.6 \times 10^{-19})^2 (3.1833 \times 10^{25}) (4.297 \times 10^{16}) (1.944 \times 10^4)}{2 \left( \frac{1.88 \times 10^{-23}}{1.6 \times 10^{-19}} \right) (235) (281.9 \times 10^{-3})} \right) \exp \left( - \frac{0.0204 \times 1.6 \times 10^{-19}}{1.38 \times 10^{-23} \times 235} \right) + (2.0 \times 10^{-4}) (4.2970 \times 10^{16})$$

$$N_i = 8.594 \times 10^{12} \text{ ต่อตารางเซนติเมตร}$$

สำหรับแบบจำลองชนิดการกระโดดระหว่างสถานะพลังงานท้องถิ่นในระยะไม่คงที่ (VRH) ในช่วงอุณหภูมิ 155 – 75 เคลวิน ซึ่งค่าพารามิเตอร์ต่างๆสามารถคำนวณได้จากกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า  $\ln \sigma T^{\frac{1}{2}}$  กับ  $T^{-\frac{1}{4}}$

- การหาค่าความหนาแน่นของสถานะถูกจำกัดเฉพาะที่ ที่ระดับพลังงานเฟอร์มี  $[N(E_F)]$

จาก VRH  $\ln \left( \sigma T^{\frac{1}{2}} \right) = - \left( \frac{T_0}{T} \right)^{\frac{1}{4}} + \ln \sigma_0$

$$\text{ความชัน} = (T_0)^{\frac{1}{4}}$$

$$T_0 = (7.05992)^4 = 2.484 \times 10^3 \text{ เคลวิน}$$

โดยที่  $T_0 = \frac{18\alpha^3}{kN(E_F)}$  เมื่อ  $\alpha = 1.24 \times 10^7$  ต่อเซนติเมตร

$$N(E_F) = \frac{18\alpha^3}{kT_0} = \frac{18\alpha^3}{\left( \frac{k}{q} \right) T_0}$$

$$N(E_F) = \frac{(18)(1.24 \times 10^7)^3}{1.38 \times 10^{-23} T_0} = \frac{(18)(1.24 \times 10^7)^3}{8.625 \times 10^{-5} T_0}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อ  $1.6 \times 10^{-19}$  เท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$N(E_F) = \frac{3.98 \times 10^{26}}{T_0} = \frac{3.98 \times 10^{26}}{2.4842 \times 10^3}$$

$$N(E_F) = 1.602 \times 10^{21} \text{ ต่อลูกบาศก์เซนติเมตร}$$

- การหาค่าระยะทางเฉลี่ยของการกระโดด ( $R$ )

$$R = \left[ \frac{9}{8\pi\alpha k T N(E_F)} \right]^{\frac{1}{4}}$$

$$R = \left[ \frac{9}{8\pi(1.24 \times 10^7)(8.625 \times 10^{-5}) T N(E_F)} \right]^{\frac{1}{4}}$$

$$R = \frac{0.135}{(T N(E_F))^{\frac{1}{4}}}$$

$$R = \frac{0.135}{(155 \times 1.6021 \times 10^{21})^{\frac{1}{4}}}$$

$$R = 6.04 \times 10^{-8} \text{ เซนติเมตร}$$

- การหาค่าพลังงานเฉลี่ยของการก้าวกระโดด

$$W = \frac{3}{4\pi R^3 N(E_F)}$$

$$W = \frac{3}{4\pi(6.04 \times 10^{-8})^3 (1.6021 \times 10^{21})}$$

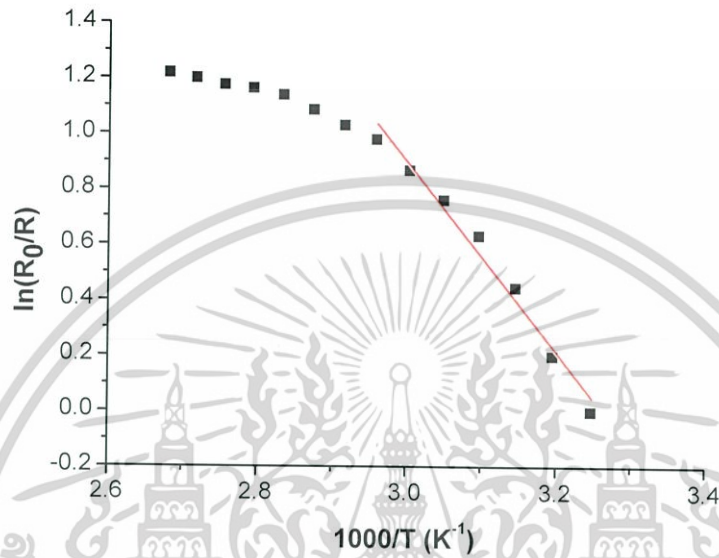
$$W = 0.067 \text{ อิเล็กตรอนโวลต์}$$

และ

$$\alpha R = (1.24 \times 10^7)(6.04 \times 10^{-8})$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานในชั้นเรียนเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.10.3 ผลการศึกษาค่าความต้านทานไฟฟ้าที่อุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิห้องในช่วงอุณหภูมิ 20-200 องศาเซลเซียส ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ SnS ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด ภายในระบบสุญญากาศ



รูปที่ 4.31 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า  $\ln(R_0/R)$  กับ  $1000/T$  ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ SnS ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ

จากรูปที่ 4.31 เป็นผลจากการวัดค่าความต้านทานไฟฟ้าเปลี่ยนไปตามอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ SnS ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ เมื่อให้อุณหภูมิแก่สารตั้งต้นเท่ากับ 588 องศาเซลเซียส โดยทำการวัดอุณหภูมิสูงในช่วงอุณหภูมิ 20 – 200 องศาเซลเซียส ซึ่งจากผลการทดลองนี้ทำให้สามารถหา ค่าพลังงานกระตุ้น ( $E_a$ ) ได้จากสมการ

$$R = R_0 \exp\left(\frac{E_a}{kT}\right)$$

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 1000k ความชัน =  $-\frac{E_a}{1000k}$  จึงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แทนค่า

$$E_a = -\frac{1000k(\text{ความชัน})}{1.6 \times 10^{-19}}$$

$$E_a = -\frac{1000 \times (1.38 \times 10^{-23})(-3.424)}{1.6 \times 10^{-19}}$$

$$E_a = 0.295 \text{ อิเล็กตรอนโวลต์}$$

เมื่อ  $R_0$  คือ ค่าความต้านทานไฟฟ้าที่อุณหภูมิห้อง  
 $E_a$  คือ ค่าพลังงานกระตุ้น

#### 4.11 ผลการศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-SnS/n-Si (100) ที่เตรียมด้วยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระบะประชิดภายในระบบสุญญากาศ

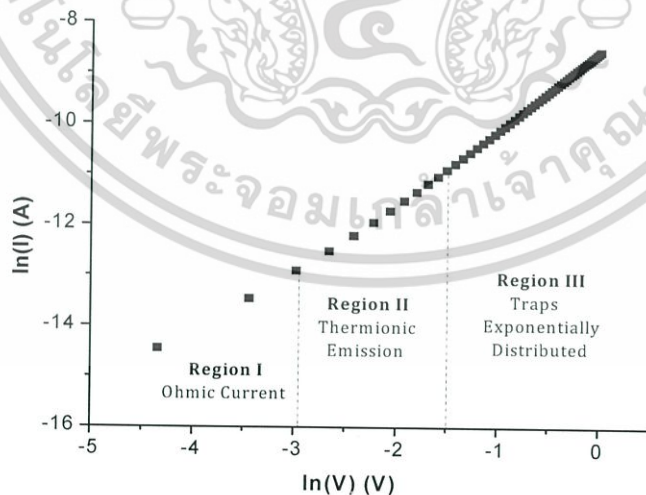
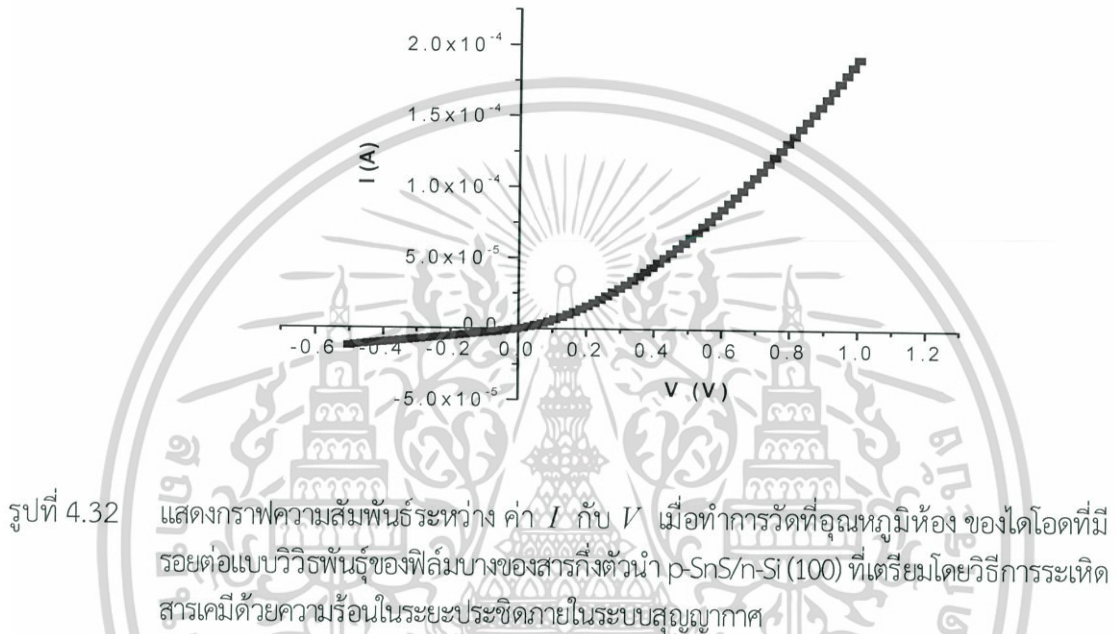
การศึกษสมบัติทางไฟฟ้าของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-SnS/n-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระบะประชิดภายในระบบสุญญากาศ แล้วทำการวัดค่าความสัมพันธ์ระหว่าง ค่ากระแสไฟฟ้าที่อุณหภูมิห้องและที่อุณหภูมิต่ำในช่วงอุณหภูมิ 20 – 300 เคลวิน เพื่อทำการศึกษากลไกการนำกระแสไฟฟ้าของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ p-SnS/n-Si (100) ตลอดจนการศึกษาค่าความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความจุไฟฟ้า กับ ค่าแรงดันไฟฟ้า ที่อุณหภูมิห้อง เพื่อคำนวณหา ค่าความหนาแน่นของอะตอมผู้ให้ ค่าแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมรอยต่อ อีกทั้งยังได้ทำการวัดความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความจุไฟฟ้ากับค่าความถี่ ค่าความนำไฟฟ้า กับ ค่าความถี่ ภายใต้แรงดันไบแอสที่ -0.3, -0.1, 0, 0.1, 0.3 และ 0.5 โวลต์ เพื่อคำนวณหา ค่าความหนาแน่นของสถานะผิวเชื่อมต่อดัชนีพลังงานของกับดักประจุที่แรงดันไบแอสค่าต่างๆ

##### 4.11.1 ผลการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่าง ค่ากระแสไฟฟ้า กับ ค่าแรงดันไฟฟ้า เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้อง ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-SnS/n-Si (100) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระบะประชิดภายในระบบสุญญากาศ

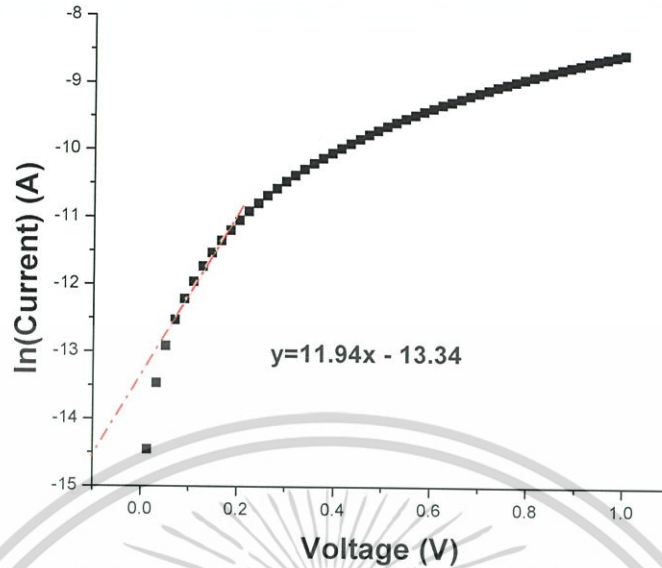
ผลจากการศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-SnS/n-Si (100) โดยการวัดความสัมพันธ์ระหว่าง ค่ากระแสไฟฟ้า กับ ค่าแรงดันไฟฟ้าในช่วง -0.50 ถึง 1.00 โวลต์ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้อง ดังปรากฏในรูปที่ 4.32 พบว่ามีการเรียงกระแสไฟฟ้าในทิศทางเดียวเหมือนไดโอด โดยมีค่าแรงดันไฟฟ้าขีดเริ่ม (threshold voltage) อยู่ที่ 0.6 โวลต์

กลไกของกระแสไฟฟ้าที่ไหลข้ามผ่านกำแพงศักย์ตรงบริเวณรอยต่อของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-SnS/n-Si (100) ที่ช่วงแรงดันไฟฟ้า -0.50 ถึง 1.00 โวลต์ พิจารณาจากความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า  $\ln I$  กับ  $\ln V$  ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-SnS/n-Si (100) ที่อุณหภูมิห้อง พบว่าแรงดันไฟฟ้าน้อยกว่า 0.14 โวลต์ กลไกการนำไฟฟ้าเป็นไปตามกฎของโอห์ม ส่วนช่วงแรงดันไฟฟ้า 0.14 ถึง 0.60 โวลต์ กลไกการนำไฟฟ้าเป็นไปตามกลไกเทอร์มิออนิกอิมมิสชัน และขง

แรงดันไฟฟ้ามากกว่า 0.60 โวลต์ เป็นไปตามกลไกการนำไฟฟ้าชนิดกระแสไฟฟ้าถูกจำกัดโดยประจุค้างที่เกิดจากกับดักประจุในเนื้อสาร ที่มีการแจกแจงแบบเอ็กซ์โพเนนเชียล ดังรูปที่ 4.33 เมื่อเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $\ln I$  กับ  $V$  ดังรูปที่ 4.34 เพื่อหาค่าแฟกเตอร์อุดมคติ และค่ากระแสไฟฟ้าอิมิตัวย้อนกลับ และนำไปใช้เป็นค่าเริ่มต้นในการจำลองข้อมูล เพื่อมาเทียบกับผลจากการวัดความสัมพันธ์ระหว่าง ค่ากระแสไฟฟ้า กับ ค่าแรงดันไฟฟ้า ในช่วงการไหลของกระแสไฟฟ้าข้ามบริเวณรอยต่อของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-SnS/n-Si (100) ที่เป็นกลไกเทอร์มิออนิกอิมิตชันซึ่งแสดงดังรูป 4.36 ค่าแฟกเตอร์อุดมคติ ค่ากำแพงศักย์ และค่าความต้านทานไฟฟ้าอนุกรมที่ได้จากกลไกเทอร์มิออนิกอิมิตชันแสดงในตารางที่ 4.4



รูปที่ 4.33 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า  $\ln I$  กับ  $\ln V$  เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้อง ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-SnS/n-Si (100) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ



รูปที่ 4.34 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $\ln I$  กับ  $V$  เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้อง ของ ไดโอดที่มีรอยต่อแบบวีริธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-SnS/n-Si (100) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ

จากรูป 4.32 คือกราฟความสัมพันธ์ของลอการิทึมของค่ากระแสไฟฟ้า กับ ค่าแรงดันไฟฟ้าเพื่อใช้ในการคำนวณค่ากระแสไฟฟ้าอิมิตัวย้อนกลับ ( $I_s$ ) และ ค่าแฟกเตอร์ในอุดมคติ ( $n$ ) โดยอาศัยกราฟเส้นตรงของช่วงที่มีการนำกระแสที่เป็นกลไกแบบเทอร์มियोอนิกอิมิตชันดังสมการ

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

เมื่อ  $I_s$  คือ กระแสไฟฟ้าอิมิตัวย้อนกลับมีค่าเท่ากับ

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

เขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า  $\ln I$  กับ  $V$  เพื่อหาค่ากระแสไฟฟ้าอิมิตัวย้อนกลับ ได้จากการลากเส้นตรงผ่านบริเวณกราฟที่เป็นกลไกแบบเทอร์มियोอนิกอิมิตชันตัดแกน  $\ln I$  โดยจุดตัดมีค่าเท่ากับ  $\ln I_s$  และ ค่าความชันของกราฟเท่ากับ  $\frac{q}{nkT}$  ซึ่งสามารถนำมาคำนวณหาค่าแฟกเตอร์ในอุดมคติ ( $n$ ) ได้จากสมการที่ (4.2) จะได้ค่าความสูงของกำแพงศักย์คือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตจากเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

ค่าความสูงของกำแพงศักย์  $\phi_{BO}$  ของสมการที่ 4.3 จะเป็นค่าในขณะแรงดันไบแอสเป็นศูนย์ที่อุณหภูมิใดๆ และ  $A^*$  เท่ากับ 12 แอมแปร์ต่อ (ตารางเซนติเมตร - เคลวินยกกำลังสอง)

นอกจากนี้ยังสามารถที่จะหาค่าแฟกเตอร์อุดมคติ ( $n$ ) ของไดโอดที่ขึ้นกับแรงดันไบแอสโดยอาศัยความสัมพันธ์ดังนี้

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

ในความเป็นจริงแล้วไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ p-SnS/n-Si (100) มักจะมีความต้านทานไฟฟ้าอนุกรม ( $R_s$ ) เกิดขึ้นเสมอ ซึ่งเป็นผลเนื่องจากค่าความต้านทานไฟฟ้าของเนื้อสารและขั้วไฟฟ้าด้านหลัง จึงต้องทำการวัดค่ากระแสไฟฟ้าในช่วงแรงดันไฟฟ้าที่มีค่าสูงมาก (Region III) เพื่อให้ค่าความต้านทานไฟฟ้าอนุกรมนั้นแสดงผลออกมา ดังนั้นความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสไฟฟ้าและ ค่าแรงดันไฟฟ้า ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-SnS/n-Si (100) ที่มีความต้านทานไฟฟ้าอนุกรมมาเกี่ยวข้องจะเป็น

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

เมื่อ  $I_s$  คือ ค่ากระแสไฟฟ้าอิ่มตัวย้อนกลับมีค่าเท่ากับ

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

อาจเขียนสมการที่ (4.6) อีกรูปหนึ่งได้เป็น

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

วิธีการหาค่าความต้านทานไฟฟ้าอนุกรมของขวง (Cheung's Method) พิจารณาในช่วงแรงดันไฟฟ้าไบแอสไปข้างหน้าโดยการแทนที่สมการที่ (4.6) แล้วจะได้ว่า

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หาอนุพันธ์ของ  $V$  เทียบกับ  $\ln I$  เพื่อหาค่าความต้านทานอนุกรม จากสมการที่ (4.8) จัดรูปใหม่ได้เป็น

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

ซึ่งสอดคล้องกับกราฟเส้นตรงจากความสัมพันธ์ระหว่าง  $dV/d(\ln I)$  กับ  $I$  ดังรูปที่ 4.14 และรูปที่ 4.15 โดยค่าความชันของกราฟนั้นคือ ความต้านทานอนุกรมของวงจร ( $R_S$ ) และจุดตัดกราฟที่ค่า  $dV/d(\ln I)$  มีค่าเท่ากับ  $nkT/q$

ส่วนการหาค่าความสูงของกำแพงศักย์นั้นหาได้โดยการจัดรูปของสมการที่ (4.9) ให้อยู่ในรูปฟังก์ชันของ  $H(I)$  ดังนี้

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

แล้วสมการที่ (4.10) จะกลายเป็น

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

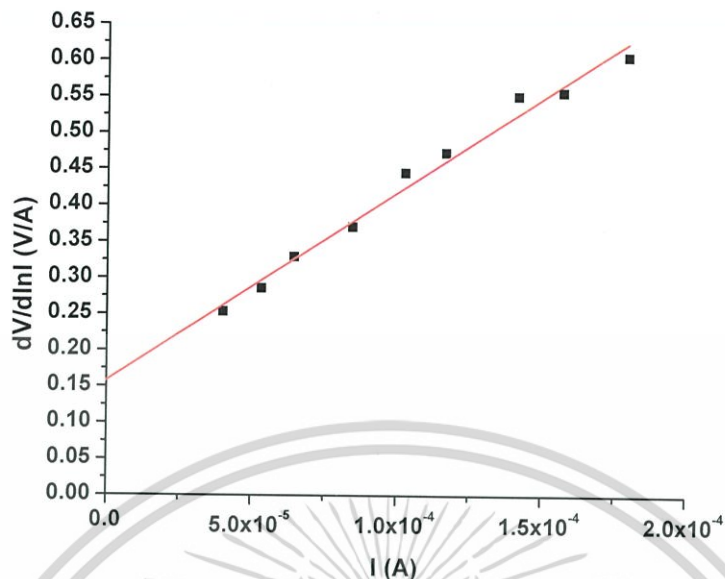
เมื่อทำการคำนวณหาค่า  $H(I)$  จากข้อมูลของ ค่ากระแสไฟฟ้า และ ค่าแรงดันไฟฟ้าแล้วนำมาเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $H(I)$  กับ  $I$  ก็จะได้เห็นผลดังรูปที่ 4.27 และรูปที่ 4.28 โดยจะคำนวณหาค่าความสูงของกำแพงศักย์ได้จากจุดตัดแกนตั้ง ( $n\phi_B$ ) ของกราฟความสัมพันธ์ดังกล่าว แล้วนอกจากนี้ความชันของกราฟที่เขียนขึ้นในรูปของฟังก์ชัน  $H(I)$  นั้นก็คือค่าความต้านทานไฟฟ้าอนุกรมเช่นเดียวกับความสัมพันธ์ในสมการที่ (4.11) ซึ่งจะส่งผลให้ค่าความต้านทานไฟฟ้าอนุกรมที่ได้ นั้นมีค่าใกล้เคียงกัน

กลไกการนำไฟฟ้าชนิดกระแสถูกจำกัดโดยประจุค้าง (SCLC) มักจะเขียนความสัมพันธ์ระหว่าง ค่ากระแสไฟฟ้า กับ ค่าแรงดันไฟฟ้า ดังนี้คือ

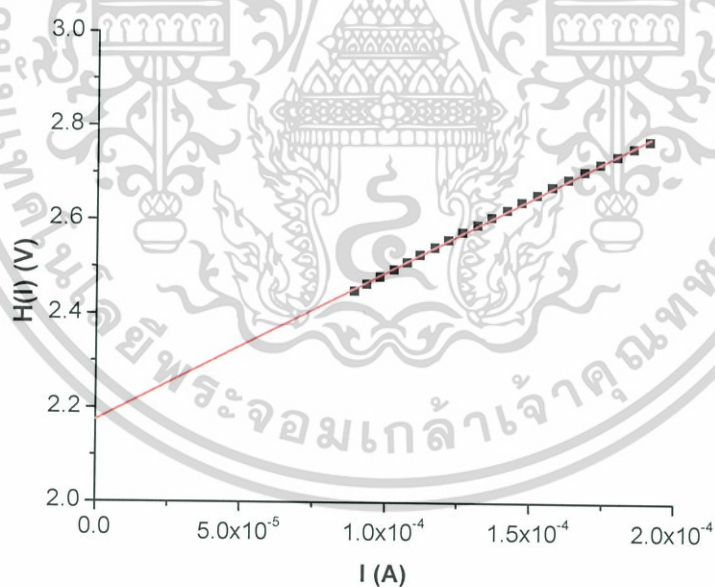
$$I = kV^m$$

$$\ln I = m \ln V + \ln k$$

เมื่อ  $m$  คือค่าความชันของกราฟ ถ้า  $m$  มีค่าเท่ากับ 1.5 กลไกการนำไฟฟ้าชนิดกระแสถูกจำกัดโดยประจุค้างจะเป็นไปตามกฎของไชด์-แลงมัวร์ (Child-Langmuir's law) แต่ถ้า  $m > 2$  จะหมายถึงว่ากับดักประจุมีระดับพลังงานต่อเนื่องและมีการแจกแจงแบบเอ็กซ์โพเนนเชียล ซึ่งจากผลการทดลองได้ค่า  $m$  เท่ากับ 2.04 แสดงว่าเป็นไปตามกฎของมอตต์-เกอร์นีย์ (Mott-Gurney's law)



รูปที่ 4.35 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า  $dV/d(\ln I)$  กับ  $I$  เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้องของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-SnS/n-Si (100) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ



รูปที่ 4.36 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า  $H(I)$  กับ  $I$  เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้องของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-SnS/n-Si (100) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสาร  
 ให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

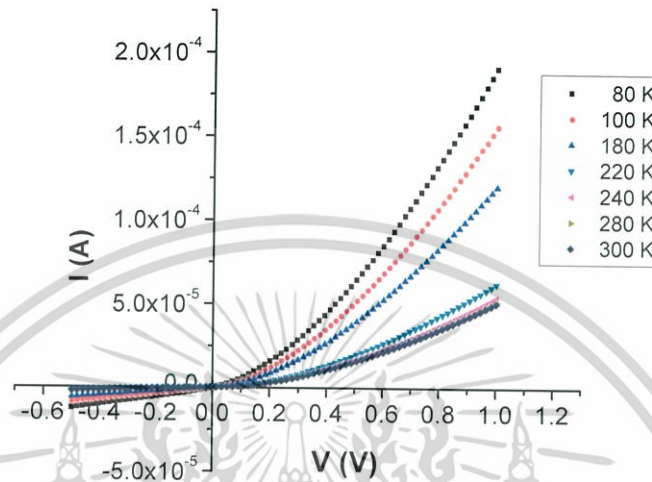
ตารางที่ 4.5 แสดงค่ากระแสไฟฟ้าอิ่มตัวย้อนกลับ ( $I_S$ ) ค่าแฟกเตอร์อุดมคติ ( $n$ ) ค่าความสูงของกำแพงศักย์ในขณะที่ค่าแรงดันไบแอสเป็นศูนย์ ( $\phi_{BO}$ ) และค่าความต้านทานอนุกรม ( $R_S$ ) ที่ได้จากการคำนวณโดยใช้กลไกเทอร์มออิเล็กทริก และวิธีของชวง เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้องของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-SnS/n-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ

| Temperature (K) | Saturation Current $I_S$ (A) | Ideality Factor (n) | Barrier Height $\phi_{BO}$ (eV) |        | Series Resistance $R_S$ ( $\Omega$ ) |               |
|-----------------|------------------------------|---------------------|---------------------------------|--------|--------------------------------------|---------------|
|                 |                              | I-V                 | I-V                             | H(I)-I | H(I)-I                               | [dV/d(lnI)]-I |
| 300             | $4.60 \times 10^{-7}$        | 2.9                 | 0.539                           | 0.737  | 0.32                                 | 0.26          |

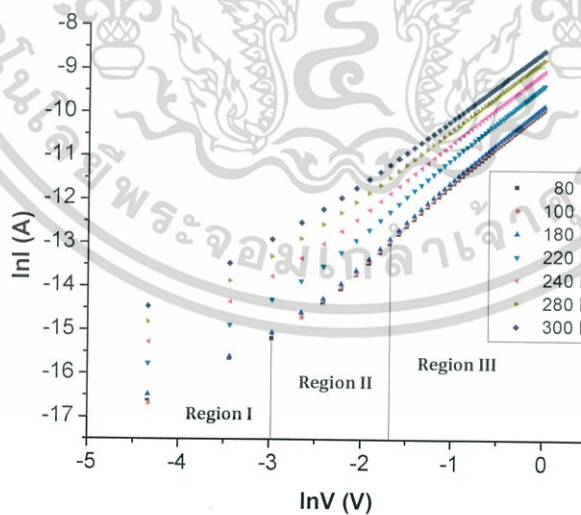
#### 4.11.2 ผลการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่าง ค่ากระแสไฟฟ้า กับ ค่าแรงดันไฟฟ้า เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่ำในช่วงอุณหภูมิ 20-300 เคลวิน ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-SnS/n-Si (100) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ

ผลการศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-SnS/n-Si (100) โดยวัดค่าความสัมพันธ์ระหว่าง ค่ากระแสไฟฟ้า กับ แรงดันไบแอสในช่วง 0.5 ถึง 1.0 โวลต์ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่ำในช่วงอุณหภูมิ 20 – 300 เคลวิน พบว่าเมื่อให้แรงดันไบแอสไปหน้าค่าเท่ากัน กระแสไฟฟ้าที่ไหลข้ามกำแพงศักย์มีค่าเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น ทั้งนี้เนื่องมาจากอุณหภูมิที่สูงขึ้นส่งผลให้อิเล็กตรอนมีพลังงานสูงมากขึ้นจนสามารถเคลื่อนที่ข้ามกำแพงศักย์ค่าสูงได้โดยไม่ต้องใช้แรงดันไบแอสมากนัก จากรูปที่ 4.37 จะพบว่าค่าแรงดันไฟฟ้าขีดเริ่มของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-SnS/n-Si (100) มีค่าเพิ่มขึ้น เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น อีกทั้งยังมีกับดักประจุที่ปรากฏที่บริเวณผิวเชื่อมต่อซึ่งจะช่วยให้เกิดกลไกการชดเชยโมเมนต์ทะลุผ่านกำแพงศักย์ช่วยเสริมการรวมตัวของพาหะ (tunneling enhance recombination) โดดเด่นขึ้นจึงส่งผลให้ค่าแฟกเตอร์อุดมคติมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่ออุณหภูมิลดลง แต่ค่าความสูงของกำแพงศักย์จะมีค่าลดลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น การศึกษากลไกของกระแสไฟฟ้าที่ไหลข้ามกำแพงศักย์ตรงบริเวณรอยต่อของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-SnS/n-Si (100) ที่ช่วงแรงดันไบแอส - 0.5 ถึง 1.0 โวลต์ จากการพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสไฟฟ้า กับ ค่าแรงดันไฟฟ้าของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำ p-SnS/n-Si (100) เมื่อทำการวัดอุณหภูมิต่ำในช่วงอุณหภูมิ 20 - 300 เคลวิน พบว่าที่ค่าแรงดันไฟฟ้าน้อยกว่า 0.15 โวลต์ (Region I) เป็นกลไกการนำไฟฟ้าที่เป็นไปตามกฎของโอห์ม ส่วนที่ช่วงแรงดันไฟฟ้า 0.15-0.45 โวลต์ (Region II) เป็นกลไกการนำกระแสไฟฟ้าที่เป็นไปตามกลไกเทอร์มออิเล็กทริก และที่ค่าแรงดันไฟฟ้ามากกว่า 0.45 โวลต์ (Region III) จะเป็นกลไกการนำไฟฟ้าชนิดกระแสถูกจำกัดโดยประจุค้างที่เกิดจากกับดักประจุในเนื้อสารที่มีการแจกแจงแบบ เอ็กซ์โพเนนเชียลแสดงดังรูปที่ 4.38 เมื่อเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า  $\ln I$  กับ  $V$  แสดงดังรูปที่ 4.39 เพื่อหาค่าแฟกเตอร์อุดมคติ และค่ากระแสไฟฟ้าอิ่มตัวย้อนกลับ แล้วนำไปใช้เป็นตัวเริ่มต้นในการจำลองข้อมูล เพื่อเทียบกับผลจากการวัดความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสไฟฟ้า กับ ค่าแรงดันไฟฟ้า ในช่วงการไหลของค่ากระแสไฟฟ้าข้ามรอยต่อของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-SnS/n-Si (100) ที่เป็นกลไกเทอร์มออิเล็กทริกแสดงดังรูปที่ 4.40

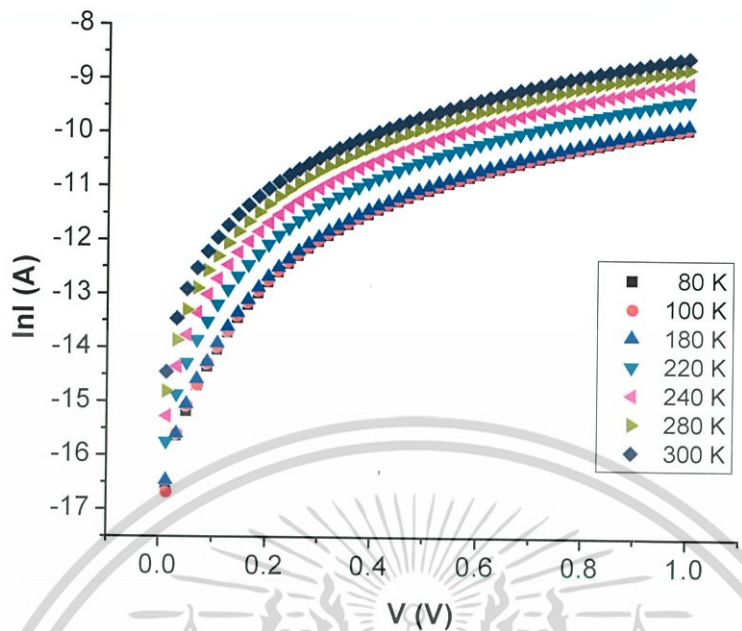
เพื่อใช้ช่วยหาค่ากระแสไฟฟ้าอิมิต์ย้อนกลับ และค่าแพกเตอร์อุดมคติให้ถูกต้องยิ่งขึ้น การหาค่าความต้านทานไฟฟ้าอนุกรมจะใช้วิธีของชวง แสดงดังรูปที่ 4.41 โดยค่ากระแสไฟฟ้าอิมิต์ย้อนกลับที่คำนวณได้จากกลไกเทอร์มิออนิกอิมิต์ชัน ค่าแพกเตอร์อุดมคติ ค่าความสูงของกำแพงศักย์ และค่าความต้านทานไฟฟ้าอนุกรมที่คำนวณได้จากกลไกเทอร์มิออนิกอิมิต์ชัน และวิธีของชวงที่แสดงในตารางที่ 4.6



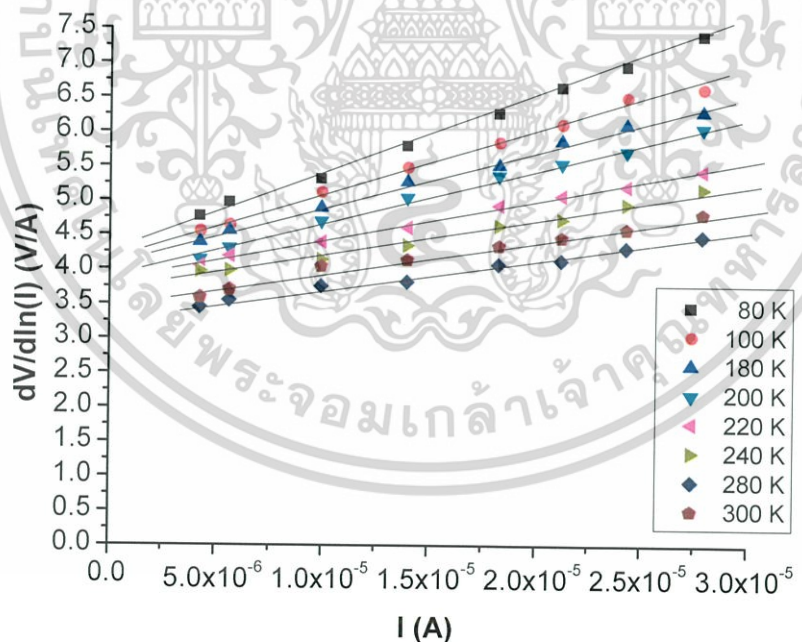
รูปที่ 4.37 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า  $I$  กับ  $V$  เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่ำในช่วงอุณหภูมิ 20-300 เคลวิน ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-SnS/n-Si (100) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ



รูปที่ 4.38 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า  $\ln I$  กับ  $\ln V$  เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่ำในช่วงอุณหภูมิ 20-300 เคลวิน ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ การคำนวณค่า  $\ln I$  และ  $\ln V$  ใช้ค่ากระแสไฟฟ้าอิมิต์ย้อนกลับที่คำนวณได้จากกลไกเทอร์มิออนิกอิมิต์ชัน ค่าแพกเตอร์อุดมคติ ค่าความสูงของกำแพงศักย์ และค่าความต้านทานไฟฟ้าอนุกรมที่คำนวณได้จากกลไกเทอร์มิออนิกอิมิต์ชัน และวิธีของชวงที่แสดงในตารางที่ 4.6

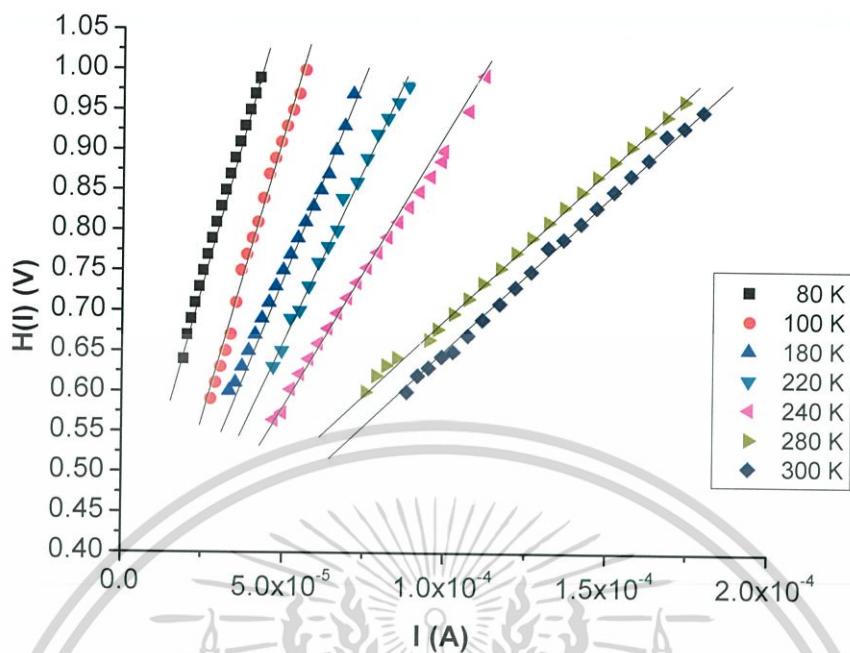


รูปที่ 4.39 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $\ln I$  กับ  $V$  เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่ำในช่วงอุณหภูมิ 20-300 เคลวิน ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-SnS/n-Si (100) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ



รูปที่ 4.40 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า  $dV/d(\ln I)$  กับ  $I$  เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่ำในช่วงอุณหภูมิ 20 - 300 เคลวิน ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-SnS/n-Si (100) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับครู ใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้า ในอนต่อไปหาไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งนี้ ขอสงวนสิทธิ์ในให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



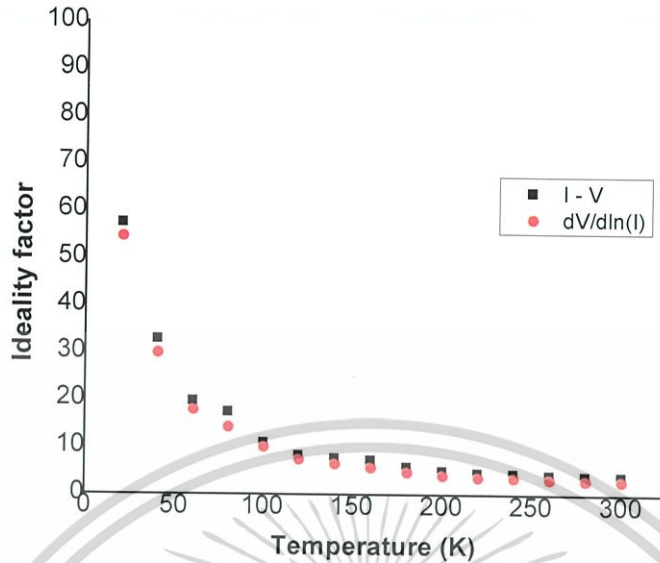
รูปที่ 4.41 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า  $H(I)$  กับ  $I$  เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่ำในช่วงอุณหภูมิ 20 - 300 เคลวิน ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-SnS/n-Si (100) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

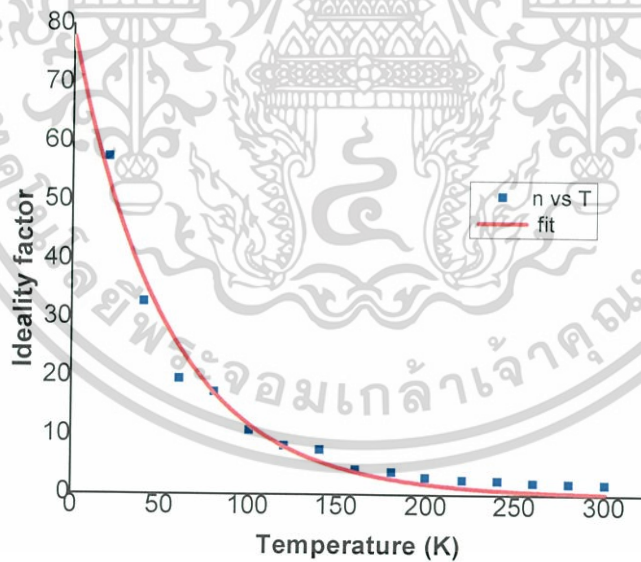
ตารางที่ 4.6 แสดงค่ากระแสไฟฟ้าอิ่มตัวย้อนกลับ ค่าแฟกเตอร์อุดมคติ ค่าความสูงของกำแพงศักย์ และ ค่าความต้านทานไฟฟ้าอนุกรม ที่ได้จากการคำนวณโดยใช้กลไกเทอร์มิโอนิกอิมิสชันและวิธีของชวง เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่ำในช่วงอุณหภูมิ 20 - 300 เคลวิน ของ ไดโอดที่มีรอยต่อวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-SnS/n-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ

| T(K) | $I_s$ (A) | Ideality Factor (n) |                   | Barrier Height (eV) |        | Series Resistance ( $\Omega$ ) |                   |
|------|-----------|---------------------|-------------------|---------------------|--------|--------------------------------|-------------------|
|      |           | I-V                 | $[dV/d(\ln I)]-I$ | I-V                 | H(I)-I | H(I)-I                         | $[dV/d(\ln I)]-I$ |
| 20   | 1.90E-07  | 55.49               | 54.53             | 0.0231              | 0.0224 | 0.87                           | 0.72              |
| 40   | 2.00E-07  | 30.84               | 29.83             | 0.0508              | 0.0508 | 0.83                           | 0.67              |
| 60   | 2.10E-07  | 17.77               | 17.75             | 0.0802              | 0.0801 | 0.78                           | 0.65              |
| 80   | 2.50E-07  | 15.47               | 15.44             | 0.1097              | 0.1092 | 0.74                           | 0.59              |
| 100  | 2.80E-07  | 9.98                | 9.94              | 0.1400              | 0.1430 | 0.71                           | 0.56              |
| 120  | 2.90E-07  | 7.36                | 7.32              | 0.1714              | 0.1709 | 0.69                           | 0.55              |
| 140  | 3.10E-07  | 6.71                | 6.64              | 0.2029              | 0.2025 | 0.67                           | 0.53              |
| 160  | 3.40E-07  | 6.33                | 6.27              | 0.2343              | 0.2342 | 0.64                           | 0.49              |
| 180  | 3.70E-07  | 4.92                | 4.88              | 0.2659              | 0.2657 | 0.51                           | 0.47              |
| 200  | 3.90E-07  | 3.98                | 3.91              | 0.2982              | 0.2982 | 0.53                           | 0.44              |
| 220  | 4.00E-07  | 3.6                 | 3.54              | 0.3312              | 0.3310 | 0.47                           | 0.42              |
| 240  | 4.10E-07  | 3.48                | 3.42              | 0.3644              | 0.3640 | 0.42                           | 0.38              |
| 260  | 4.30E-07  | 3.22                | 3.15              | 0.3973              | 0.3972 | 0.38                           | 0.33              |
| 280  | 4.50E-07  | 3.00                | 2.93              | 0.4303              | 0.4301 | 0.35                           | 0.29              |
| 300  | 4.60E-07  | 2.90                | 2.82              | 0.5390              | 0.5370 | 0.32                           | 0.26              |

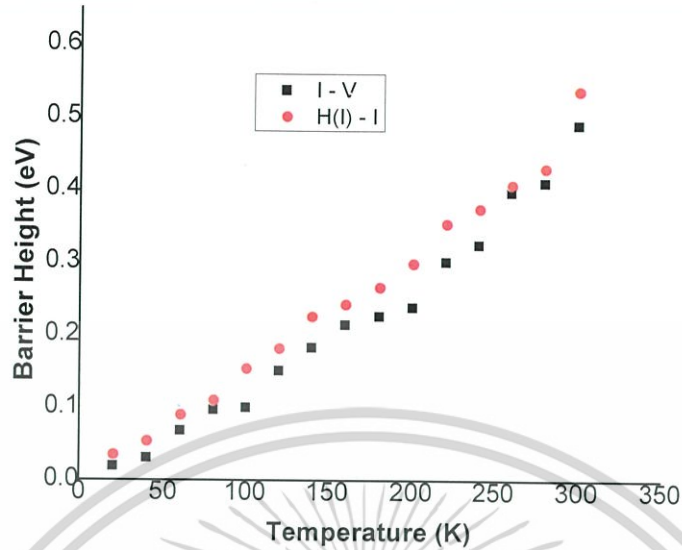
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



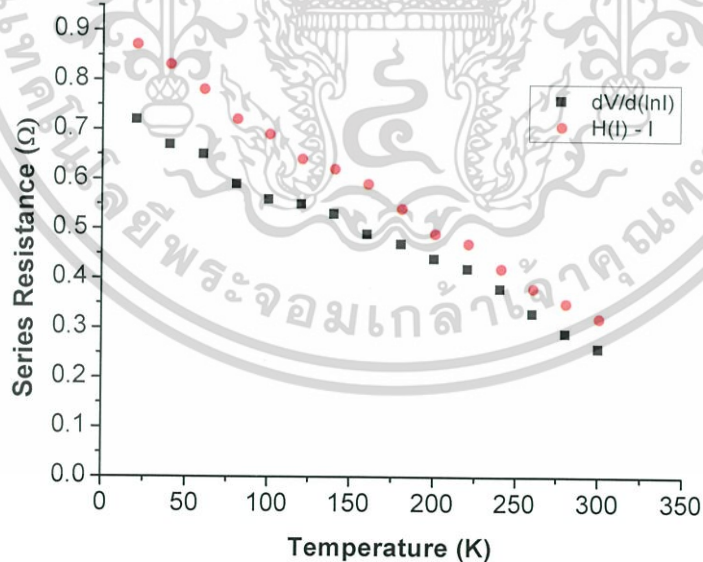
รูปที่ 4.42 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าแฟกเตอร์อุดมคติ กับ ค่าอุดมhuri ที่คำนวณได้จากกลไกเทอร์มออิเล็กทริกและวิธีของชวง เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่ำในช่วงอุณหภูมิ 20 - 300 เคลวินของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-SnS/n-Si (100) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ



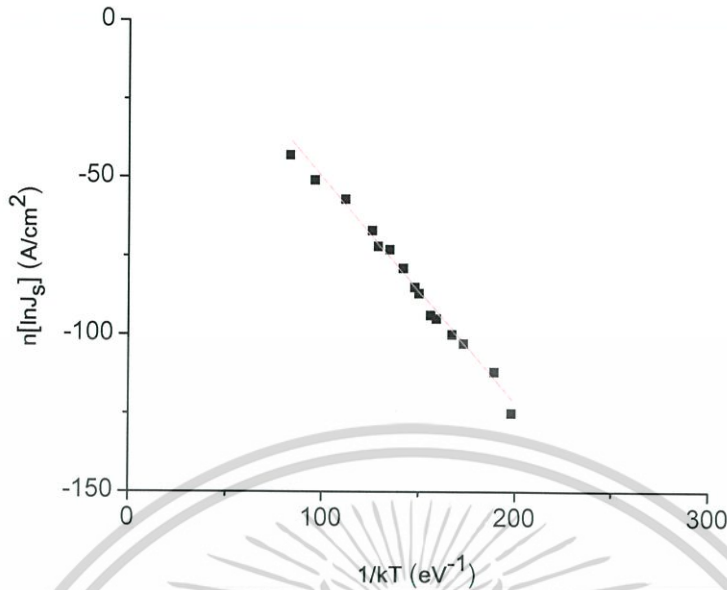
รูปที่ 4.43 แสดงการหาค่า  $E_{00}$  โดยการฟิตกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าแฟกเตอร์อุดมคติ กับ ค่าอุดมhuri เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่ำในช่วงอุณหภูมิ 20 - 300 เคลวินของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-SnS/n-Si (100) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ



รูปที่ 4.44 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความสูงกำแพงศักย์ กับ ค่าอุณหภูมิ ที่คำนวณได้จากกลไกเทอร์มิออนิกอิมิสชันและวิธีของชวง เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่ำในช่วงอุณหภูมิ 20 – 300 เคลวิน ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-SnS/n-Si (100) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ



รูปที่ 4.45 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความต้านทานไฟฟ้าอนุกรม กับ ค่าอุณหภูมิ ที่ได้จากวิธีของชวงเมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่ำในช่วงอุณหภูมิ 20-300 เคลวิน ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-SnS/n-Si (100) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ



รูปที่ 4.46 แสดงกราฟอาร์เรเนียสของ  $n \ln[J_s]$  เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่ำในช่วงอุณหภูมิ 20 - 300 เคลวิน ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-SnS/n-Si (100) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ

จากค่าความชันของกราฟในรูปที่ 4.46 สามารถคำนวณหาค่าพลังงานกระตุ้นของรอยต่อได้จากสมการที่ (4.12)

$$n \ln[J_s] = -E_a \left[ \frac{1}{kT} \right] \quad (4.12)$$

ค่าพลังงานกระตุ้น  $E_a$  หได้จากค่าความชันของรูปที่ 4.46

ดังนั้น

$$\text{ความชัน} = E_a$$

จะได้

$$E_a = 0.721 \text{ อิเล็กตรอนโวลต์}$$

จากผลการทดลองพบว่า กระแสไฟฟ้าอิ่มตัวย้อนกลับเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น ส่วนค่าแพกเตอร์อุดมคติที่ได้จากกลไกเทอร์มิออนิกอิมิสชันและวิธีของชวงมีค่าที่ลดลง เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น จะพบว่ามีลักษณะไม่เป็นเชิงเส้น แสดงดังรูป 4.42 และเมื่อนำกราฟความสัมพันธ์ไปเทียบกับสมการที่ 4.13 เพื่อหาค่าลักษณะเฉพาะของพลังงานการชูดุโม่งค์ทะลุผ่านกำแพงศักย์ ( $E_{00}$ ) พบว่ามีค่าเท่ากับ 0.108 อิเล็กตรอนโวลต์

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องแจ้งเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$n = \frac{E_{00}}{kT} \coth\left(\frac{E_{00}}{kT}\right) \quad (4.13)$$

และจากทฤษฎีเทอร์มิออนิกอิมิสชันจะได้ว่า

$$E_{00} = \left( \frac{q\hbar}{2} \right) \left[ \frac{N_D}{m^* \epsilon_S} \right] \quad (4.14)$$

และคำนวณหาค่าพลังงานกระตุ้นจากสมการ

$$n \ln(I_S) = \frac{-E_a}{kT} + n \ln(J_{00}) \quad (4.15)$$

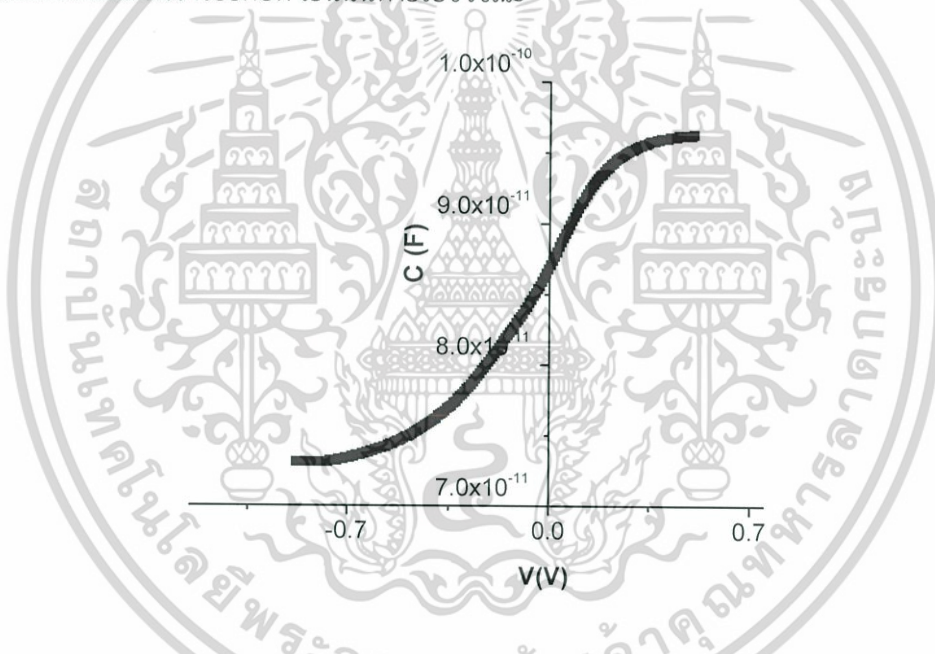
และจากค่าความชันของกราฟในรูปที่ 4.46 จะทำให้ทราบถึงค่าพลังงานกระตุ้นของไดโอดที่มีรอยต่อแบบบิวริวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-SnS/n-Si (100) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ มีค่าเท่ากับ 0.721 อิเล็กตรอนโวลต์ ส่วน  $E_{00}$  ที่คำนวณได้มีค่าสูงกว่า 25 มิลลิอิเล็กตรอนโวลต์ แสดงว่าที่อุณหภูมิต่ำๆ นั้น กลไกการชดเชยโมเมนต์ทะลุผ่านกำแพงศักย์ของโฮลเด่นกว่ากลไกเทอร์มิออนิกอิมิสชัน จากนั้นโฮลกับอิเล็กตรอนจะรวมตัวกันที่สถานะผิวเชื่อมต่อที่บริเวณพร่องพาหะ

การที่ค่าแฟกเตอร์อุดมคติและค่าความสูงของกำแพงศักย์ที่มีค่าเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิ เนื่องจากได้ใช้การวัดกระแสไฟฟ้าที่ไหลข้ามกำแพงศักย์มาคำนวณหาค่าตัวแปรเหล่านี้ โดยอาศัยทฤษฎีเทอร์มิออนิกอิมิสชัน ดังนั้นค่าตัวแปรจะขึ้นอยู่กับปริมาณของกระแสไฟฟ้าที่วัดได้ ที่อุณหภูมิสูงพลังงานความร้อนจะกระตุ้นพาหะอิสระให้มีพลังงานสูงและมีจำนวนมากขึ้น เมื่อทำการให้แรงดันไบแอสไปข้างหน้าพาหะอิสระที่มีพลังงานความร้อนสูงเหล่านี้จะสามารถข้ามกำแพงศักย์ที่มีค่าสูงได้ ดังนั้นจะได้ค่ากำแพงศักย์ที่มีค่ามากและค่าแฟกเตอร์อุดมคติที่มีค่าเข้าใกล้หนึ่ง แต่ที่อุณหภูมิต่ำพาหะอิสระจะมีพลังงานต่ำ จึงจำเป็นต้องใช้แรงดันไฟฟ้าเพิ่มขึ้นเพื่อจะข้ามกำแพงศักย์ ขณะป้อนแรงดันไบแอสไปข้างหน้าให้มีค่าเพิ่มขึ้น กลไกการชดเชยโมเมนต์ทะลุผ่านกำแพงศักย์จะโดดเด่นขึ้น แต่เมื่ออุณหภูมิลดลง กลไกเทอร์มิออนิกอิมิสชันจะลดความโดดเด่นลง และในทางกลับกันกลไกการชดเชยโมเมนต์ทะลุผ่านกำแพงศักย์จะโดดเด่นมากขึ้น จะเสมือนว่าพาหะอิสระสามารถไหลข้ามรอยต่อได้ เนื่องจากความสูงของกำแพงศักย์มีค่าลดลง ส่วนค่าแฟกเตอร์อุดมคติ ( $n$ ) จะมีค่าสูงขึ้น ซึ่งจะแสดงว่าการนำกระแสผ่านรอยต่อในช่วงอุณหภูมิต่ำสอดคล้องกับกลไกเทอร์มิออนิกอิมิสชันน้อยลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.11.3 ผลการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความจุไฟฟ้า กับ ค่าแรงดันไฟฟ้า ที่ความถี่เท่ากับ 1 เมกะเฮิรตซ์ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้อง ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-SnS/n-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด ภายในระบบสุญญากาศ เมื่อให้อุณหภูมิแก่สารตั้งต้นเท่ากับ 565 องศาเซลเซียส

รูปที่ 4.47 แสดงผลการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความจุไฟฟ้า กับ ค่าแรงดันไฟฟ้า ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-SnS/n-Si (100) โดยจ่ายแรงดันไบแอสในช่วง -1 ถึง 0.5 โวลต์ ที่ความถี่เท่ากับ 1 เมกะเฮิรตซ์ ภายใต้เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้อง พบว่าเมื่อค่าแรงดันไบแอสย้อนกลับมีค่ามากขึ้นจะทำให้ค่าความจุไฟฟ้านั้นลดลงอย่างรวดเร็ว เนื่องจากความกว้างของบริเวณพร่องพาหะเพิ่มขึ้นตามค่าแรงดันไฟฟ้าเมื่อมีการไบแอสย้อนกลับมากขึ้น และสำหรับกรณีเมื่อให้แรงดันไบแอสไปหน้าค่าความกว้างของบริเวณพร่องพาหะจะลดลง ซึ่งจะส่งผลให้ค่าความจุไฟฟ้ามีค่ามากขึ้นจนถึงจุดสูงสุดค่าหนึ่ง จากนั้นค่าความจุไฟฟ้าจะมีค่าลดลงอย่างรวดเร็ว เนื่องจากการฉีดพาหะอิสระจำนวนมากผ่านรอยต่อจนเสมือนว่ารอยต่อพี-เอ็นนั้นหายไปชั่วขณะ



รูปที่ 4.47 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า  $C$  กับ  $V$  เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้องโดยใช้ความถี่เท่ากับ 1 เมกะเฮิรตซ์ ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-SnS/n-Si (100) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ

จากความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุไฟฟ้า กับ ค่าแรงดันไฟฟ้า ของรูปที่ 4.47 นำมาเขียนใหม่ให้อยู่ในรูปของ ส่วนกลับของค่าความจุไฟฟ้ายกกำลังสอง กับ ค่าแรงดันไฟฟ้า จะสามารถหาค่า ศักย์ตกคร่อมรอยต่อ ( $V_{bi}$ ) และความหนาแน่นของอะตอมผู้รับ ( $N_A$ ) ได้จากความสัมพันธ์ตามสมการดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\frac{1}{C^2} = \left( \frac{2}{\epsilon_s q N_A A^2} \right) \left( V_{bi} - \frac{kT}{q} - V \right) \quad (4.13)$$

โดยจากความสัมพันธ์ในสมการที่ (4.13) จะเลือกเอาส่วนที่เป็นเส้นตรงในช่วงไบแอสแรงดันย้อนกลับตั้งแต่  $-0.3$  ถึง  $0.15$  โวลต์ โดยประมาณ แล้วทำการลากเส้นตรงตัดผ่านแกน  $x$  จะทำให้ได้ค่า  $V_i$  แล้วนำมาหาค่าศักย์ไฟฟ้าตกคร่อมบริเวณรอยต่อจากความสัมพันธ์

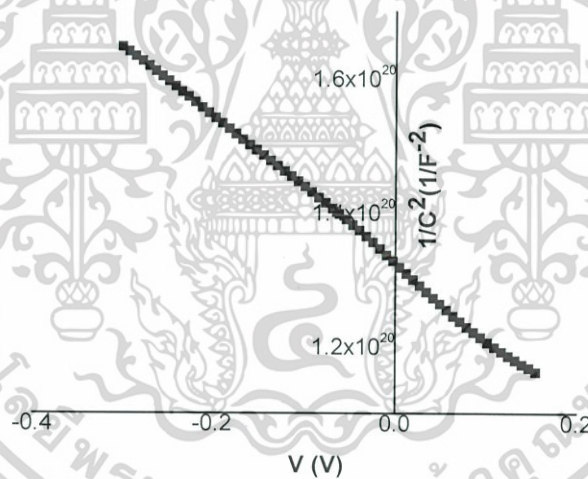
$$V_{bi} = V_i + \frac{kT}{q} \quad (4.14)$$

ส่วนค่าความหนาแน่นของอะตอมผู้รับสามารถคำนวณได้จาก ความชันของสมการที่ (4.15) คือ

$$\text{ความชัน} = \frac{2}{q\epsilon_s N_A A^2} \quad (4.15)$$

เมื่อ  $\epsilon_s$  คือ ค่าเพอร์มิตติวิตี (permittivity) ของสารกึ่งตัวนำ

สำหรับกรณีของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ SnS จะมีค่า  $\epsilon_s = \epsilon_r \epsilon_0$  โดยที่  $\epsilon_r$  คือ ค่าคงที่ไดอิเล็กตริก ซึ่งมีค่าเท่ากับ 10.65

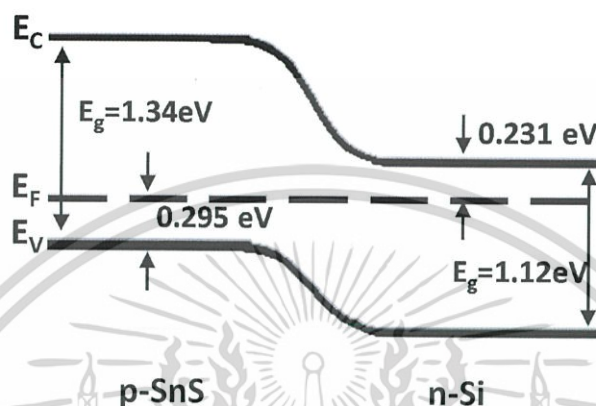


รูปที่ 4.48 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า  $1/C^2$  กับ  $V$  เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้อง โดยใช้ความถี่เท่ากับ 1 เมกะเฮิร์ตซ์ ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-SnS/n-Si (100) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ เมื่อให้อุณหภูมิแก๊สสารตั้งต้น 565 องศาเซลเซียส

จากผลการคำนวณจะได้ว่า ศักย์ไฟฟ้าตกคร่อมรอยต่อมีค่าเท่ากับ 0.2 โวลต์ ที่ความถี่เท่ากับ 1 เมกะเฮิร์ตซ์ ซึ่งมีความสอดคล้องกับ ค่าความสูงของกำแพงศักย์ ที่คำนวณได้จากการศึกษาสมบัติของค่ากระแสไฟฟ้า และ ค่าแรงดันไฟฟ้า ที่อุณหภูมิห้องเช่นกัน และมีค่าความหนาแน่นของอะตอมผู้รับเท่ากับ  $6.72 \times 10^{13}$  ต่อลูกบาศก์เซนติเมตร

ไม่ว่าใครเป็นเจ้าของสิ่งนี้ก็ตาม ขอสงวนสิทธิ์ในสิ่งที่คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าช่องว่างแถบพลังงาน ( $E_g$ ) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ SnS มีค่าเท่ากับ 1.34 อิเล็กตรอนโวลต์ ค่าช่องว่างแถบพลังงาน ( $E_g$ ) ของผลึกเดี่ยวของสารกึ่งตัวนำ n-Si (100) มีค่าเท่ากับ 1.12 ส่วนค่าระดับเฟอร์มิของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำ SnS หาได้จากการวัดค่าพลังงานกระตุ้นจากการวัดค่าความต้านทานไฟฟ้าที่อุณหภูมิสูงพบว่า มีค่าประมาณ 0.295 อิเล็กตรอนโวลต์ จากข้อมูลดังกล่าวนี้สามารถนำไปเขียนแผนภาพแสดงลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ p-SnS/n-Si (100) ได้ดังรูปที่ 4.49

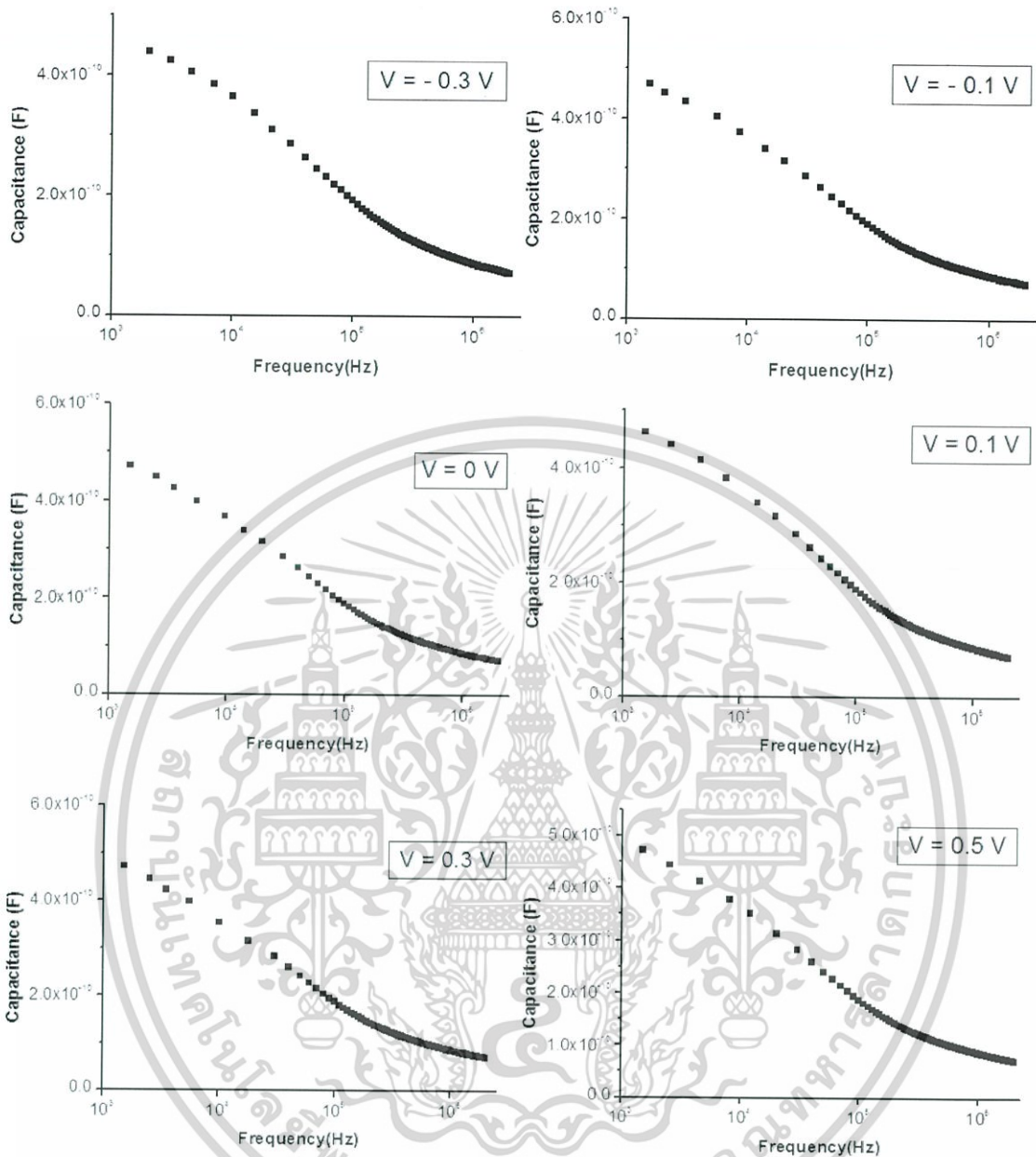


รูปที่ 4.49 แสดงแผนภาพลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ p-SnS/n-Si (100) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระบะประชิดภายในระบบสุญญากาศ

4.11.4 ผลการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความจุไฟฟ้า และ ค่าความนำไฟฟ้า กับ ค่าความถี่ในช่วง 1 กิโลเฮิรตซ์ถึง 2 เมกะเฮิรตซ์ โดยใช้แรงดันไฟฟ้าในช่วง -0.3 ถึง 0.5 โวลต์ ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-SnS/n-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระบะประชิดภายในระบบสุญญากาศ เมื่อให้อุณหภูมิแก๊สเริ่มต้นเท่ากับ 565 องศาเซลเซียส

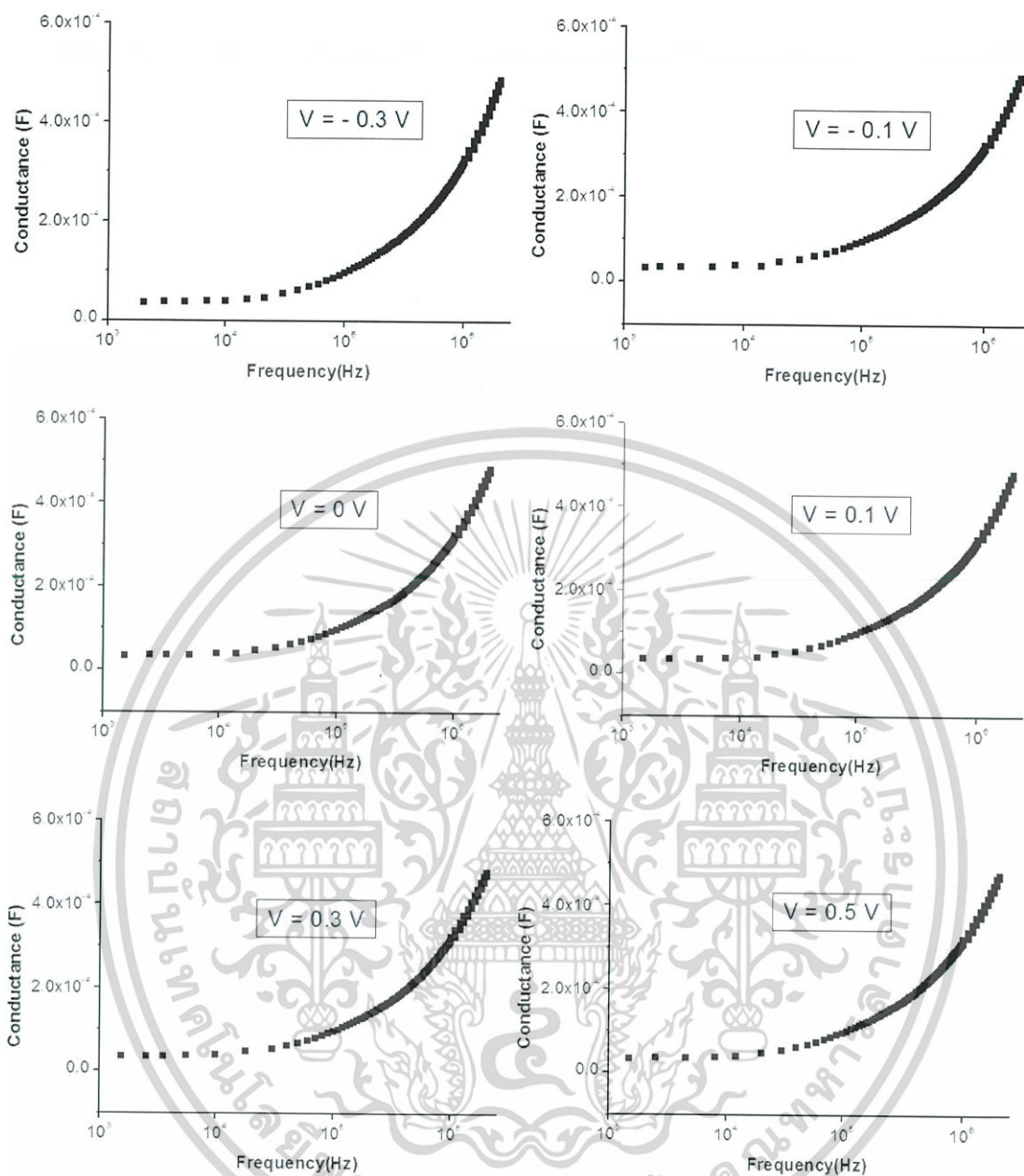
เมื่อทำการวัดความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความจุไฟฟ้า และ ค่าความนำไฟฟ้า กับ ค่าความถี่ในช่วง 1 กิโลเฮิรตซ์ ถึง 2 เมกะเฮิรตซ์ โดยใช้แรงดันไฟฟ้าในช่วง -0.3 ถึง 0.5 โวลต์ ดังรูปที่ 4.50 และรูปที่ 4.51 พบว่าจากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุไฟฟ้า กับ ค่าความถี่ ค่าความจุไฟฟ้าจะลดลงเมื่อความถี่มีค่าสูงขึ้น และค่าความจุมีค่ามากที่สุดที่ แรงดันไฟฟ้ามีค่าเท่ากับ 0.5 โวลต์ ส่วนจากกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความนำไฟฟ้ากับ ค่าความถี่ พบว่าค่าความนำไฟฟ้าจะมีค่าเพิ่มขึ้นตามค่าความถี่ที่เพิ่มขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.50 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุไฟฟ้า ( $C$ ) กับ ค่าความถี่ ( $f$ ) เมื่อทำการวัดในช่วงความถี่ 1 กิโลเฮิร์ตซ์ ถึง 2 เมกะเฮิร์ตซ์ โดยใช้แรงดันไฟฟ้าในช่วง - 0.3 ถึง 0.5 โวลต์ และทำการวัดที่อุณหภูมิห้องของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-SnS/n-Si (100) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะเวลาประชิดภายในระบบสุญญากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

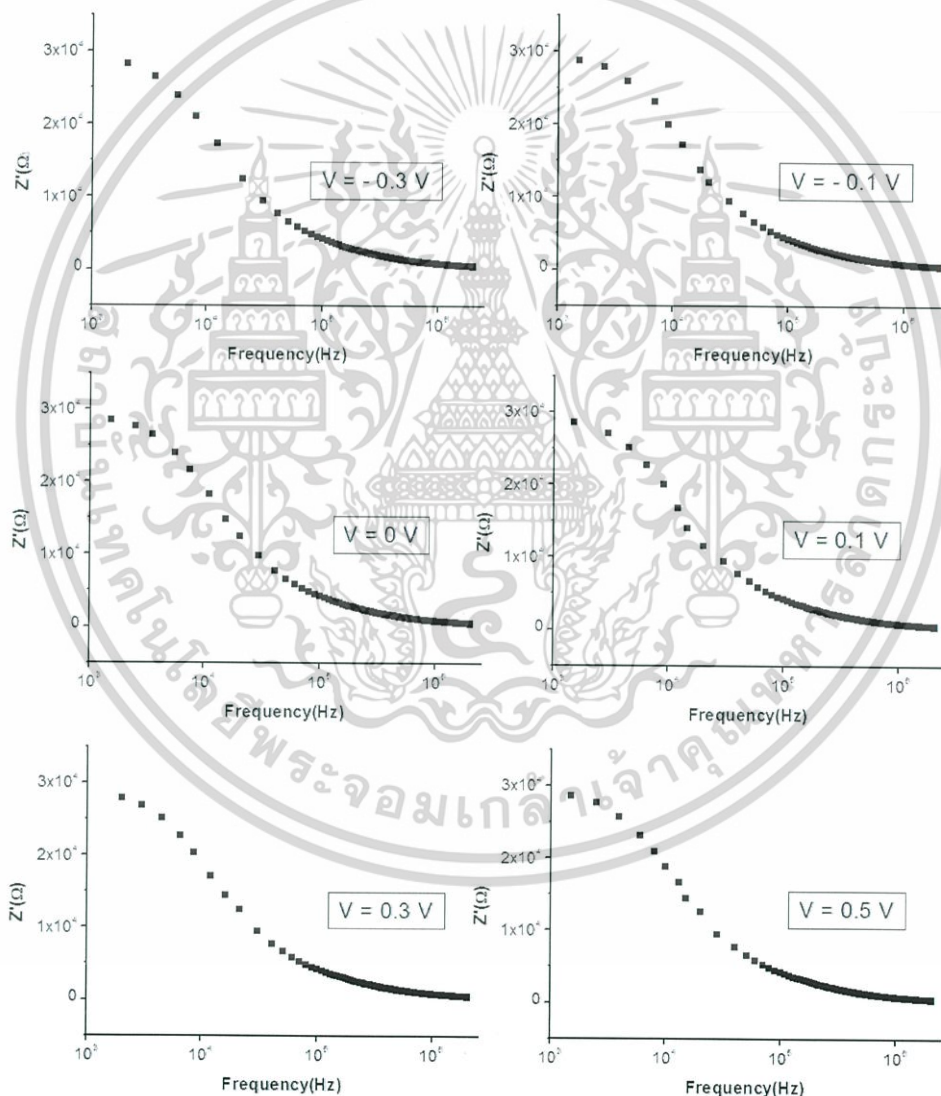


รูปที่ 4.51 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความนำไฟฟ้า ( $G$ ) กับ ค่าความถี่ ( $f$ ) เมื่อทำการวัดในช่วงความถี่ 1 กิโลเฮิรตซ์ ถึง 2 เมกะเฮิรตซ์ โดยใช้แรงดันไฟฟ้าในช่วง - 0.3 ถึง 0.5 โวลต์ และทำการวัดที่อุณหภูมิห้องของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-SnS/n-Si (100) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ

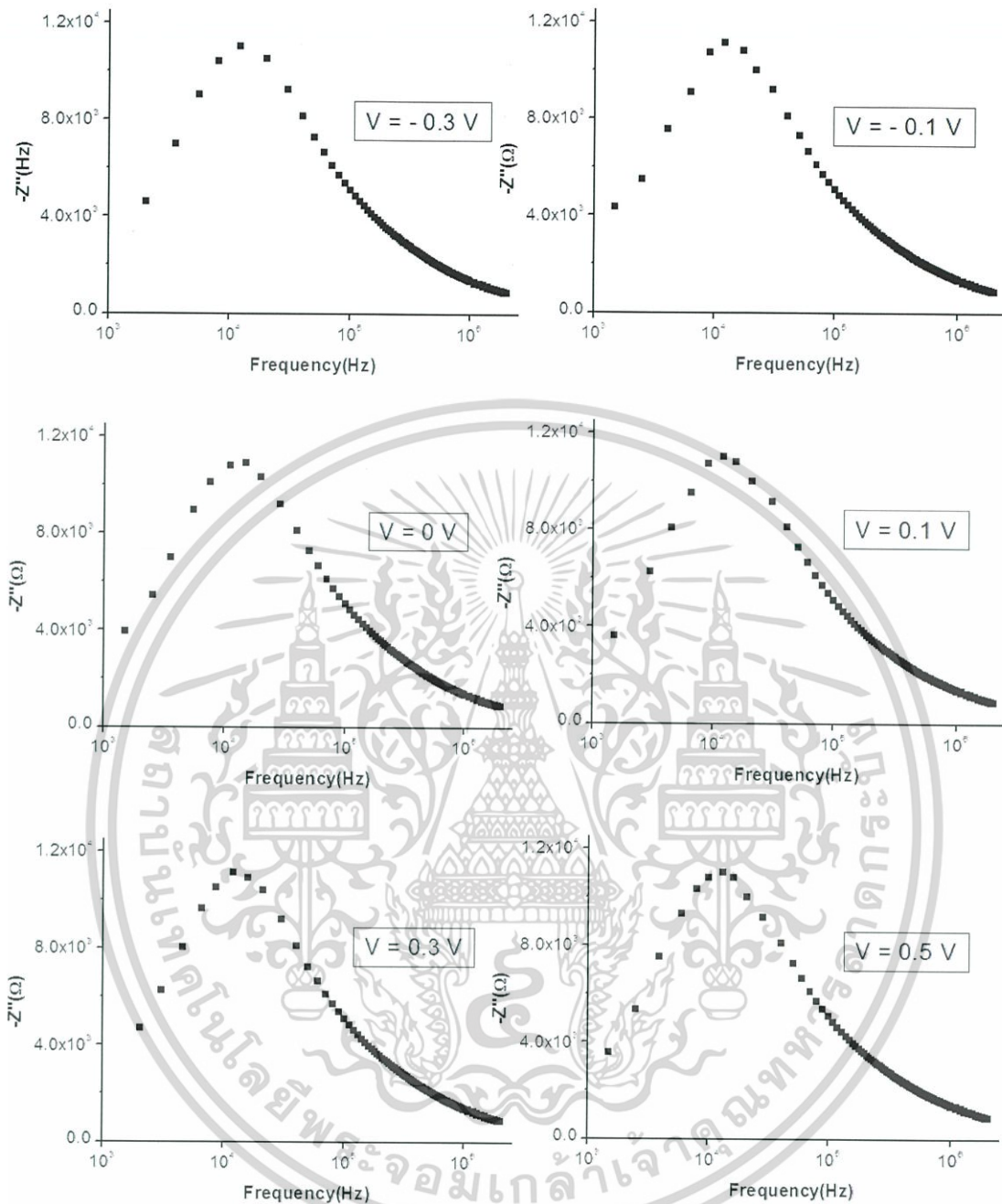
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.11.5 ผลการศึกษาค่าอิมพีแดนซ์สเปกโทรสโกปีเมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้อง ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-SnS/n-Si (100) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด ภายในระบบสุญญากาศ เมื่อให้อุณหภูมิแก่สารตั้งต้นเท่ากับ 565 องศาเซลเซียส

ผลของการศึกษาค่าอิมพีแดนซ์สเปกโทรสโกปี เมื่อทำการวัดในช่วงแรงดัน - 0.3 ถึง 0.5 โวลต์ โดยในรูปที่ 4.52 ได้แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าจำนวนจริงของค่าอิมพีแดนซ์ กับค่าความถี่ ในช่วงความถี่ต่ำๆ จะเป็นช่วงที่ค่าจำนวนจริงของอิมพีแดนซ์มีค่าสูง และจะลดลงอย่างรวดเร็วเมื่อความถี่มีค่าเพิ่มขึ้น จากรูปที่ 4.53 เป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าจินตภาพของอิมพีแดนซ์ กับ ค่าความถี่ และเมื่อทำการเขียนกราฟของ ค่าอิมพีแดนซ์เชิงซ้อน ที่ค่าแรงดันไฟฟ้าต่างๆ จะเขียนกราฟได้เป็นครึ่งวงกลม ดังแสดงในรูปที่ 4.55 ซึ่งจะได้ค่าพารามิเตอร์สำคัญต่างๆ ตามตารางที่ 4.7

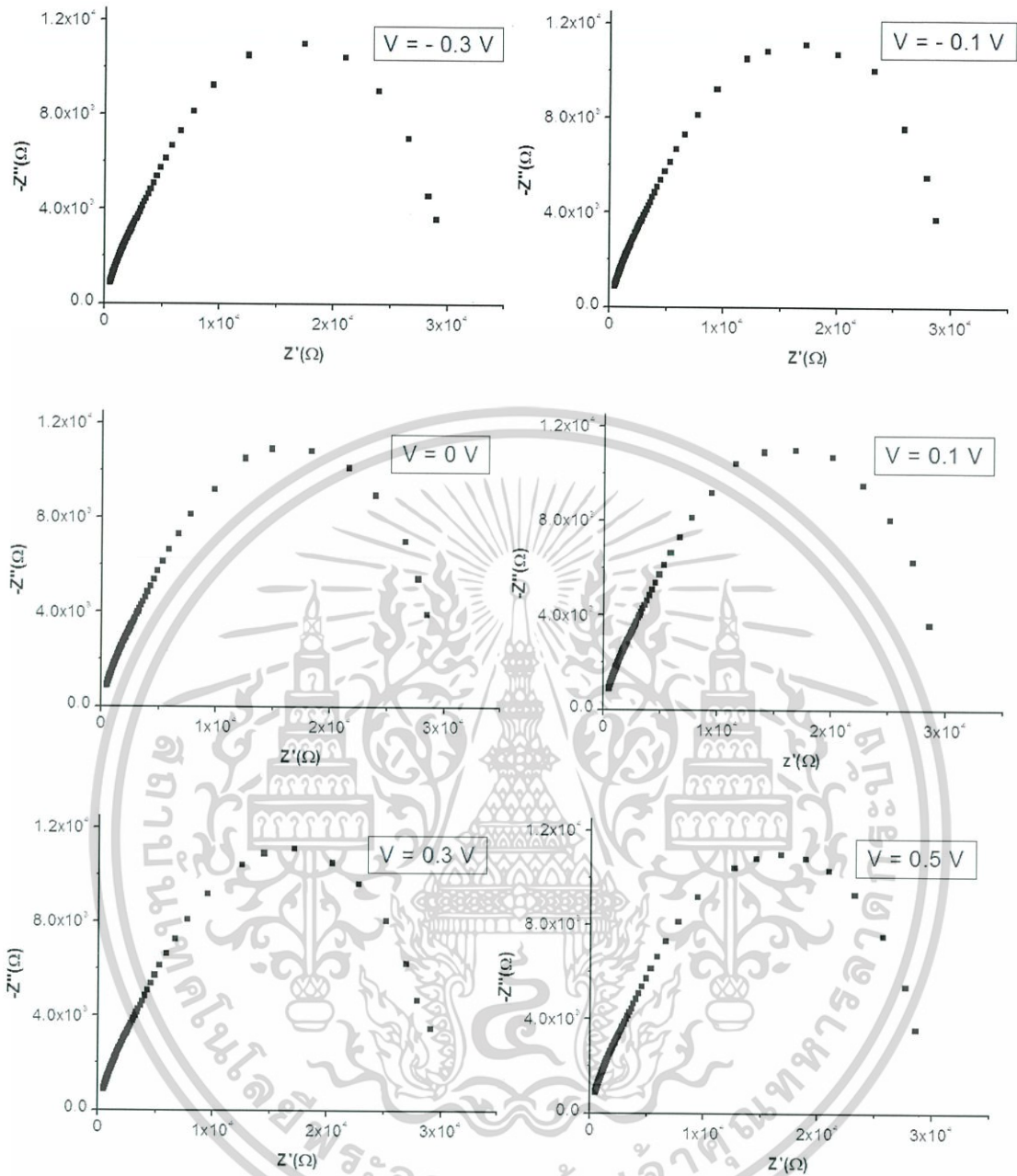


รูปที่ 4.52 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าจำนวนจริงของอิมพีแดนซ์เชิงซ้อน กับ ค่าความถี่ เมื่อทำการวัดในการค้า ในช่วงความถี่ 1 กิโลเฮิรตซ์ ถึง 2 เมกะเฮิรตซ์ โดยใช้แรงดันไฟฟ้าในช่วง -0.3 ถึง 0.5 โวลต์ และทำการวัดที่อุณหภูมิห้องของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-SnS/n-Si (100) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด ภายในระบบสุญญากาศ



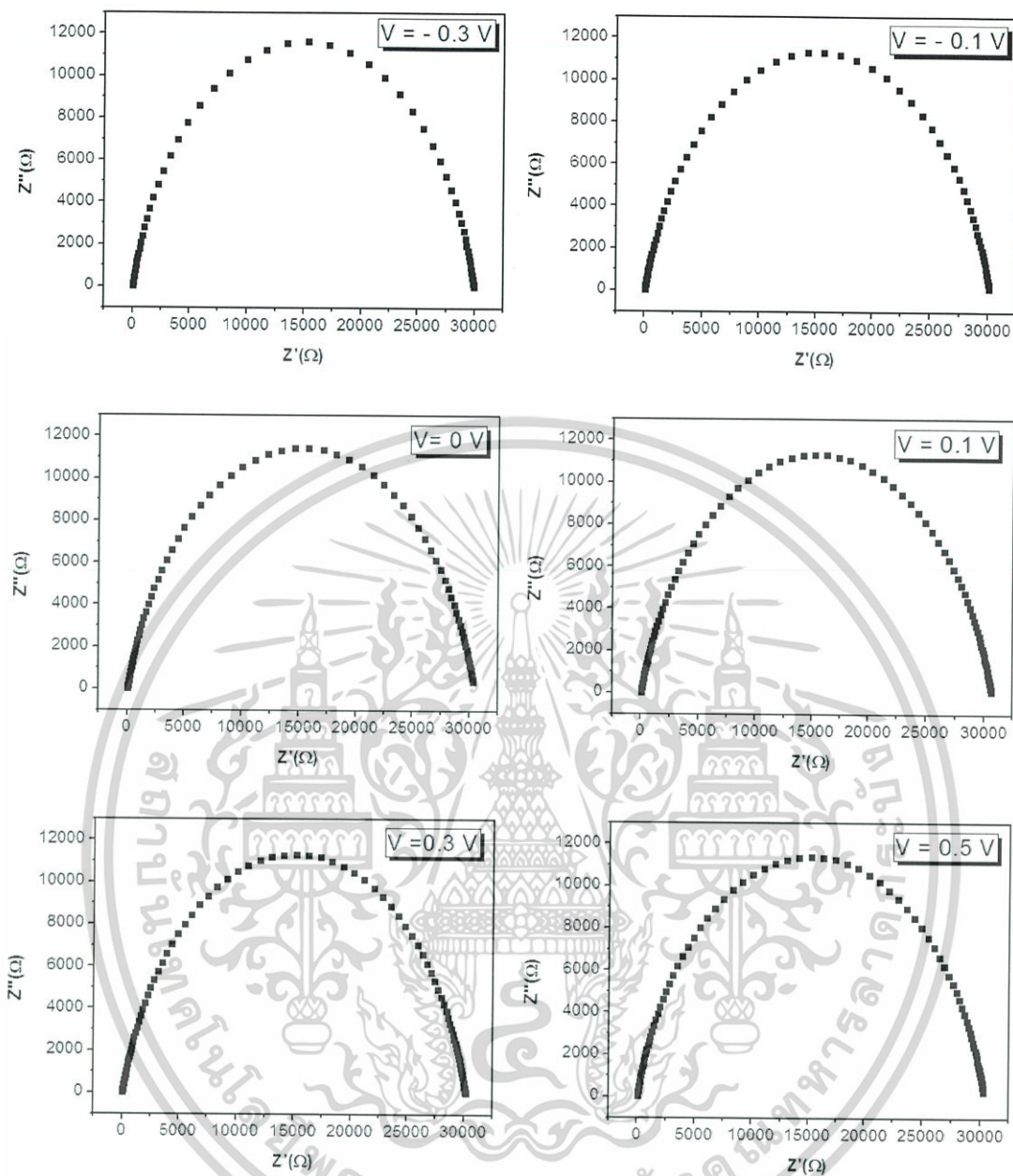
รูปที่ 4.53 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของค่าจินตภาพของอิมพีแดนซ์ กับ ค่าความถี่ เมื่อทำการวัด ในช่วงความถี่ 1 กิโลเฮิร์ตซ์ ถึง 2 เมกะเฮิร์ตซ์ โดยใช้แรงดันไฟฟ้าในช่วง -0.3 ถึง 0.5 โวลต์ และทำการวัดที่อุณหภูมิห้องของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-SnS/n-Si (100) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด ภายในระบบสุญญากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.54 แสดงกราฟความสัมพันธ์ของ ค่าอิมพีแดนซ์เชิงซ้อน เมื่อทำการวัดในช่วงความถี่ 1 กิโลเฮิรตซ์ ถึง 2 เมกะเฮิรตซ์ โดยใช้แรงดันไฟฟ้าในช่วง -0.3 ถึง 0.5 โวลต์ และทำการวัดที่อุณหภูมิห้องของไดโอด ที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-SnS/n-Si (100) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิด สารเคมีด้วยความร้อนในระยยะประชิด ภายในระบบสุญญากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.55 แสดงกราฟความสัมพันธ์ของ ค่าอิมพีแดนซ์เชิงซ้อน เมื่อทำการวัดในช่วงความถี่ 1 กิโลเฮิร์ตซ์ ถึง 2 เมกะเฮิร์ตซ์ โดยใช้แรงดันไฟฟ้าในช่วง -0.3 ถึง 0.5 โวลต์ และทำการวัดที่อุณหภูมิห้องของไดโอด ที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-SnS/n-Si (100) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระเหยระชิต ภายในระบบสุญญากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

| Parameters       |                    |                                |                          |      |                             |                    |                       |                             |                     |
|------------------|--------------------|--------------------------------|--------------------------|------|-----------------------------|--------------------|-----------------------|-----------------------------|---------------------|
| Bias Voltage (V) | $R_S$ ( $\Omega$ ) | $R_P$ ( $\times 10^4 \Omega$ ) | $P$ ( $S \cdot s^{-n}$ ) | $n$  | $C_P = \frac{1}{R_P^n}$ (F) | $f_{max}$ (Hz)     | $\tau$ (s)            | $\omega_{max}$ ( $s^{-1}$ ) | $\omega_{max} \tau$ |
| -0.3             | 100                | 2.99                           | $1.50 \times 10^{-9}$    | 0.84 | $2.23 \times 10^{-10}$      | $2.32 \times 10^4$ | $6.66 \times 10^{-6}$ | $1.46 \times 10^5$          | 0.97                |
| -0.1             | 100                | 3.01                           | $1.00 \times 10^{-9}$    | 0.83 | $1.19 \times 10^{-10}$      | $4.29 \times 10^4$ | $3.57 \times 10^{-6}$ | $2.70 \times 10^5$          | 0.96                |
| 0                | 100                | 3.03                           | $1.20 \times 10^{-9}$    | 0.82 | $1.27 \times 10^{-10}$      | $4.79 \times 10^4$ | $3.86 \times 10^{-6}$ | $3.01 \times 10^5$          | 0.94                |
| 0.1              | 100                | 3.06                           | $1.15 \times 10^{-9}$    | 0.81 | $1.04 \times 10^{-10}$      | $4.85 \times 10^4$ | $3.18 \times 10^{-6}$ | $3.05 \times 10^5$          | 0.96                |
| 0.3              | 100                | 3.01                           | $2.50 \times 10^{-10}$   | 0.82 | $1.88 \times 10^{-11}$      | $2.81 \times 10^5$ | $5.65 \times 10^{-7}$ | $1.77 \times 10^6$          | 0.99                |
| 0.5              | 100                | 3.03                           | $2.30 \times 10^{-10}$   | 0.81 | $1.42 \times 10^{-11}$      | $3.13 \times 10^5$ | $4.30 \times 10^{-7}$ | $1.97 \times 10^6$          | 0.84                |

ตารางที่ 4.7 แสดงค่าพารามิเตอร์สำคัญต่างๆ ที่ได้จากการศึกษาการจำลองแบบหาค่าอิมพีแดนซ์สเปกโทรสโกปี เมื่อใช้ความถี่ในช่วง 1 กิโลเฮิรตซ์ ถึง 2 เมกะเฮิรตซ์ โดยใช้แรงดันไฟฟ้าเท่ากับ - 0.3 ถึง 0.5 โวลต์ และทำการวัดที่อุณหภูมิห้อง ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-SnS/n-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ เมื่อให้อุณหภูมิแก่สารตั้งต้นเท่ากับ 565 องศาเซลเซียส

## สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

ในบทที่ 5 นี้เป็นการสรุปผลการดำเนินงานวิจัยในการเตรียมฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ SnS ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-SnS/n-Si (100) โดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระบะประชิดภายในระบบสุญญากาศ จากนั้นทำการศึกษาสมบัติทางฟิสิกส์ต่างๆ ทำการวิเคราะห์ผลและสรุปผลพร้อมทั้งรายงานปัญหาที่พบ และข้อเสนอแนะ เพื่อเป็นแนวทางในการทำการวิจัยต่อไป

ผิวหน้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ SnS ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ และไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-SnS/n-Si (100) ที่เตรียมได้จากวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระบะประชิดภายในระบบสุญญากาศ มีลักษณะเป็นสีเทาเงินเป็นมันวาว ยึดติดกับแผ่นฐานรองรับได้ดี

การศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ SnS ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ด้วยสเปกตรัมการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ พบว่าเมื่อให้อุณหภูมิแก่สารตั้งต้นเป็น 550, 560 และ 580 องศาเซลเซียส จะมีระนาบของผลึกของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ SnS ที่โดดเด่นอยู่ที่ระนาบ (400) ที่มีเฟสเป็นแบบออร์โธโรมบิก และในส่วนของสเปกตรัมการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-SnS/n-Si (100) จะมีระนาบของผลึกของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ SnS ที่โดดเด่นอยู่ที่ระนาบ (701) ที่มีเฟสของออร์โธโรมบิก และจะมีระนาบของแผ่นผลึกเดี่ยวของสารกึ่งตัวนำ n-Si (100) ที่โดดเด่นอยู่ที่ระนาบ (400) ที่มีเป็นเฟสเป็นแบบเฟสเซนเตอร์คิวบิก (face-centered cubic: fcc)

การศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงมหภาคของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ SnS ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด โดยให้อุณหภูมิแก่สารตั้งต้นต่างกัน คือ 550, 565 และ 588 องศาเซลเซียส ระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงแผ่นฐานรองรับเท่ากับ 7 มิลลิเมตร ใช้เวลาในการเคลือบ 5, 15 และ 10 นาที ตามลำดับ พบว่าผลึกของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ SnS ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ มีรูปร่างเป็นแบบแท่งยาวโดยมีพื้นที่หน้าตัดเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า และที่อุณหภูมิสูงขึ้น เกรนจะมีขนาดโตขึ้น และที่บริเวณภาคตัดขวางของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ SnS ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ จะพบว่าที่อุณหภูมิแก่สารตั้งต้น 550 องศาเซลเซียส ใช้เวลาในการเคลือบ 5 นาที มีขนาดความหนาของฟิล์มบางสุด และที่อุณหภูมิแก่สารตั้งต้น 588 องศาเซลเซียส ใช้เวลาในการเคลือบ 10 นาที จะมีขนาดความหนาของฟิล์มมากที่สุด และเมื่อทำการเคลือบฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ SnS ลงบนแผ่นผลึกเดี่ยวของสารกึ่งตัวนำ n-Si (100) เพื่อสร้างเป็นไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-SnS/n-Si (100) โดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระบะประชิดภายในระบบสุญญากาศ ให้อุณหภูมิแก่สารตั้งต้นต่างกัน คือ 560, 573 และ 580 องศาเซลเซียส ระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงแผ่นฐานรองรับเท่ากับ 7 มิลลิเมตร ใช้เวลาในการเคลือบ 15 นาที จะสังเกตได้ว่า ที่อุณหภูมิ 580 องศาเซลเซียสมีเกรนที่ชัดเจนและดีกว่าที่อุณหภูมิ 560 และ 573 องศาเซลเซียส และเมื่อสังเกตที่บริเวณภาคตัดขวางของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-SnS/n-Si (100) พบว่า ที่อุณหภูมิ 580 องศาเซลเซียส มีขนาดความหนาของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ SnS มากกว่าที่อุณหภูมิ 560 และ 573 องศาเซลเซียส

การวิเคราะห์ธาตุเชิงปริมาณ และเชิงคุณภาพด้วยด้วยเครื่องวิเคราะห์ เทคนิคเอินเนอร์ยีดีสเพอร์ซีฟสเปกโทรสโกปี (EDS หรือ EDX) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ SnS ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่น

กระจกใสได้ โดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ แสดงให้เห็นว่าฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำที่เตรียมได้ประกอบด้วยอะตอมของธาตุ Sn และอะตอมของธาตุ S ที่ไม่มีสารชนิดอื่นเจือปน ส่วนการวิเคราะห์ธาตุเชิงปริมาณ จะแสดงให้เห็นถึงสัดส่วนอะตอมของธาตุ โดยน้ำหนักของอะตอมของธาตุ S เป็น 20.47 เปอร์เซ็นต์ (atomic 48.79 เปอร์เซ็นต์) และปริมาณอะตอมของธาตุ Sn เป็น 79.53 เปอร์เซ็นต์ (atomic 51.21 เปอร์เซ็นต์)

การวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสงโดยการวัดสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ SnS ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกใสได้ โดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ โดยให้อุณหภูมิแก๊สตั้งต้นเป็น 550, 565 และ 588 องศาเซลเซียส จะได้ช่องว่างแถบพลังงานเท่ากับ 1.28, 1.23 และ 1.34 อิเล็กตรอนโวลต์ ตามลำดับ

จากการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของสารโดยอาศัยสมบัติทางความร้อนของสารประกอบตั้งต้น SnS พบว่าเมื่อให้ความร้อนแก๊สตั้งต้น ปริมาณของสารตั้งต้นจะลดลงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ที่ช่วงอุณหภูมิประมาณ 550 – 630 องศาเซลเซียส มีการสูญเสีย 1.68 เปอร์เซ็นต์ ของน้ำหนัก เนื่องจากการระเหิดของสารประกอบ SnS จากที่มีเฟสเป็นของแข็งไปเป็นก๊าซ

ผลการศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-SnS/n-Si (100) พบว่าเมื่อทำการศึกษาสภาพนำไฟฟ้าเชิงแสงของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-SnS/n-Si (100) ภายใต้การไบอัสแรงดันต่างๆ พบว่าสารมีการตอบสนองต่อแสงสีขาวจากหลอดฮาโลเจนด้วยช่วงเวลาตอบสนองที่สั้นมากทั้งช่วงกระแสขาโพสิทีฟ และช่วงกระแสไฟโตนาลง ซึ่งสามารถนำไปหาค่ากับดักพาหะของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ SnS ได้

การตรวจสอบพลังงานของการสั้นของพันธะของโมเลกุลในโครงผลึกด้วยรามานสเปกโทรสโกปีในช่วงเลขคลื่น 100 – 400 ต่อเซนติเมตร ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ SnS ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกใสได้ และไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-SnS/n-Si (100) ที่เตรียมด้วยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ จากสเปกตรัมรามาน พบว่ามีพีกที่โดดเด่นสองพีก คือที่ความยาวคลื่นประมาณ 125 และ 230 ต่อเซนติเมตร และเมื่อมีเลขคลื่นมากกว่า 230 ต่อเซนติเมตร พีกความเข้มของสเปกตรัม จะลดลงอย่างเห็นได้ชัดเจน

การศึกษาศักยภาพต้านทานทางไฟฟ้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ SnS ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกใสได้ โดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ เมื่อให้อุณหภูมิแก๊สตั้งต้น 565 องศาเซลเซียส พบว่ามีค่าสภาพต้านทานทางไฟฟ้า 0.54 โอห์ม – เซนติเมตร และจากปรากฏการณ์ฮอลล์ พบว่าค่าสัมประสิทธิ์ของฮอลล์เท่ากับ 40.76 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อคูลอมบ์ ปริมาณค่าความหนาแน่นของโฮลเท่ากับ  $1.53 \times 10^{17}$  ต่อลูกบาศก์เซนติเมตร และค่าสภาพคล่องของโฮลมีค่าเท่ากับ 75.48 ตารางเซนติเมตรต่อ (โวลต์-วินาที)

จากการศึกษาความต้านทานทางไฟฟ้าที่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิห้อง ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ SnS ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกใสได้ โดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ เมื่อให้อุณหภูมิแก๊สตั้งต้น 565 องศาเซลเซียส พบว่าค่าความหนาแน่นของสถานะถูกจำกัดเฉพาะที่ระดับพลังงานเฟอร์มีมีค่าเท่ากับ  $1.60 \times 10^{21}$  ต่ออิเล็กตรอนโวลต์ จากนั้นได้ทำการหาค่าระยะทางเฉลี่ยของการกระโดด ซึ่งมีค่าเท่ากับ  $6.04 \times 10^8$  เซนติเมตร และค่าพลังงานเฉลี่ยของการก้าวกระโดด เป็น 0.067 อิเล็กตรอนโวลต์

เอกสารนี้ได้รับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใด การศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-SnS/n-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ

แล้วทำการวัดค่าความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสไฟฟ้าที่อุณหภูมิห้อง และที่อุณหภูมิต่างๆ โดยใช้แรงดันไฟฟ้าในช่วง - 0.50 ถึง 1.00 โวลต์พบว่ามีการเรียงกระแสไฟฟ้าแบบไดโอดทั่วไป โดยมีค่าแรงดันไฟฟ้าขีดเริ่ม (threshold voltage) อยู่ที่ 0.6 โวลต์ ซึ่งกลไกการนำกระแสไฟฟ้าที่ไหลข้ามกำแพงศักย์ตรงบริเวณไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-SnS/n-Si (100) ที่ช่วงแรงดันไฟฟ้า -0.50 ถึง 1.00 โวลต์ พิจารณาจากกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า  $\ln I$  กับ  $\ln V$  ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-SnS/n-Si (100) ที่อุณหภูมิห้อง พบว่าแรงดันไฟฟ้าน้อยกว่า 0.14 โวลต์ กลไกการนำไฟฟ้าเป็นไปตามกฎของโอห์ม ส่วนช่วงแรงดันไฟฟ้า 0.14 ถึง 0.60 โวลต์ กลไกการนำไฟฟ้าเป็นไปตามกลไกเทอร์มิออนิกอิมิสชัน และช่วงแรงดันไฟฟ้ามากกว่า 0.60 โวลต์ เป็นไปตามกลไกการนำไฟฟ้าชนิดกระแสถูกจำกัดโดยประจุค้างที่เกิดจากกักประจุในเนื้อสารที่มีการแจกแจงแบบเอ็กซ์โพเนนเชียลดังรูปที่ 4.23 เมื่อเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า  $\ln I$  กับ  $V$  จะได้ค่าแพกเตอร์อุดมคติและค่ากระแสไฟฟ้าอิมิตัวย้อนกลับ และนำไปใช้เป็นค่าเริ่มต้นในการจำลองข้อมูล การหาค่าความต้านทานไฟฟ้าอนุกรมด้วยวิธีของชวงนั้นได้จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า  $dV / d(\ln I)$  กับ  $I$  ซึ่งจากกราฟนี้จะได้ค่าแพกเตอร์อุดมคติและค่าความต้านทานไฟฟ้าอนุกรม และจากกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า  $H(I)$  กับ  $I$  จะได้ค่าความสูงของกำแพงศักย์ที่แรงดันไบแอสเป็นศูนย์

ผลการศึกษสมบัติทางไฟฟ้าของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-SnS/n-Si (100) โดยวัดความสัมพันธ์ระหว่าง ค่ากระแสไฟฟ้า กับ แรงดันไบแอสช่วง - 0.5 ถึง 1.0 โวลต์ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่ำในช่วงอุณหภูมิ 20 – 300 เคลวิน พบว่าที่ค่าแรงดันไฟฟ้าเท่ากัน กระแสไฟฟ้าที่ไหลข้ามกำแพงศักย์มีค่าเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น ทั้งนี้เนื่องมาจากอุณหภูมิที่สูงขึ้นส่งผลให้อิเล็กตรอนมีพลังงานสูงมากขึ้น และแรงดันไฟฟ้าขีดเริ่มของไดโอดมีค่ามากขึ้น เมื่ออุณหภูมิลดลง การศึกษากลไกของกระแสไฟฟ้าที่ไหลข้ามกำแพงศักย์ตรงบริเวณไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-SnS/n-Si (100) ที่ช่วงอุณหภูมิ 20 – 300 เคลวิน พบว่าที่อุณหภูมิ 20 เคลวิน ที่แรงดันไฟฟ้าน้อยกว่า 0.15 โวลต์ (region I) เป็นกลไกการนำไฟฟ้า เป็นไปตามกฎของโอห์ม ส่วนช่วงแรงดันไฟฟ้า 0.15 - 0.45 โวลต์ (region II) กลไกการนำกระแสไฟฟ้าที่เป็นไปตามกลไกเทอร์มิออนิกอิมิสชัน และที่แรงดันไฟฟ้ามากกว่า 0.45 โวลต์ (region III) จะเป็นกลไกการนำไฟฟ้าชนิดกระแสถูกจำกัดโดยประจุค้างที่เกิดจากกักประจุในเนื้อสารที่มีการแจกแจงแบบเอ็กซ์โพเนนเชียล จากผลการทดลองพบว่า กระแสไฟฟ้าอิมิตัวย้อนกลับมีค่าน้อยลงตามอุณหภูมิต่ำลงและมีลักษณะไม่เป็นเชิงเส้น

จากการศึกษาอิมพีแดนซ์สเปกโทรสโกปีที่แรงดันไบแอส - 0.3 ถึง 0.5 โวลต์ ในช่วงความถี่ 1 กิโลเฮิร์ตซ์ ถึง 2 เมกะเฮิร์ตซ์ พบว่าค่าจำนวนจริงของอิมพีแดนซ์เชิงซ้อนมีแนวโน้มลดลงเมื่อความถี่เพิ่มขึ้นจาก 1 กิโลเฮิร์ตซ์ เป็น 2 เมกะเฮิร์ตซ์ ส่วนที่แรงดันไบแอสในช่วง - 0.3 ถึง 0.5 โวลต์ ไม่ส่งผลให้จำนวนจริงของอิมพีแดนซ์เปลี่ยนแปลงไป

สำหรับกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าจำนวนจริงของอิมพีแดนซ์เชิงซ้อนกับความถี่มีลักษณะคล้ายกราฟพาราโบลาแบบไม่สมมาตร โดยมีจุดสูงสุดของกราฟอยู่ที่ความถี่ประมาณ  $2.3 \times 10^4$  เฮิร์ตซ์ และกราฟไม่ได้เปลี่ยนแปลงตามแรงดันไบแอสในช่วง - 0.3 ถึง 0.5 โวลต์ ทั้งกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $C - f$ ,  $Z' - f$  และ  $Z'' - f$  ไม่เปลี่ยนแปลงตามแรงดันไบแอส แสดงว่าระดับพลังงานเฟอร์มิที่บริเวณรอยต่อของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-SnS/n-Si (100) ถูกตรึง (pinned) โดยอิทธิพลของกักพาหะที่บริเวณรอยต่อดังกล่าว ส่งผลให้แรงดันไบแอสไม่สามารถทำให้ระดับพลังงานเฟอร์มิเลื่อนขึ้นหรือเลื่อนลงได้ ดังนั้นจึงไม่สามารถคำนวณหาชนิด และค่าความหนาแน่นของกักพาหะที่บริเวณรอยต่อของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-SnS/n-Si (100) ได้

## เอกสารอ้างอิง

งามนิตย์ วงษ์เจริญ. 2530. “การศึกษารอยต่อแบบโลหะ-ฉนวน-สารกึ่งตัวนำของคอปเปอร์อินเดียมไดซัลไฟด์.” วิทยานิพนธ์. วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

งามนิตย์ วงษ์เจริญ, ฐิตินัย แก้วแดง, ชัยสิงห์ ภูริรักษ์เกียรติ และทิพรัตน์ วงษ์เจริญ. 2543. “การเตรียมฟิล์มบาง  $Cd_{1-x}Zn_xS$  เพื่อประดิษฐ์เป็นเซลล์แสงอาทิตย์.” รายงานวิจัยเสนอต่อคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.

งามนิตย์ วงษ์เจริญ, ฐิตินัย แก้วแดง, ชัยสิงห์ ภูริรักษ์เกียรติ และทิพรัตน์ วงษ์เจริญ. 2545. “การเตรียมการศึกษาสมบัติของฟิล์มบาง  $Cd_{1-x}Zn_xS$  เพื่อประดิษฐ์เป็นเซลล์แสงอาทิตย์.” รายงานวิจัยเสนอต่อคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.

งามนิตย์ วงษ์เจริญ, ฐิตินัย แก้วแดง และทิพรัตน์ วงษ์เจริญ. 2550. “การประดิษฐ์ฟิล์มหนา  $CuAlO_2$  เพื่อเป็นชั้นดูดกลืนแสงของเซลล์แสงอาทิตย์.” รายงานวิจัยเสนอต่อคณะวิทยาศาสตร์สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.

งามนิตย์ วงษ์เจริญ, ฐิตินัย แก้วแดง และณัฐพร พรหมรส. 2551. “การเตรียมฟิล์มบาง  $CdTe$  โดยการระเหิดในระยะประชิดเพื่อประดิษฐ์เป็นเซลล์แสงอาทิตย์.” รายงานวิจัยเสนอต่อคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.

งามนิตย์ วงษ์เจริญ, ฐิตินัย แก้วแดง, ชัยสิงห์ ภูริรักษ์เกียรติ และทิพรัตน์ วงษ์เจริญ. 2555. “การประดิษฐ์ฟิล์มบาง  $CuInSe_2$  โดยวิธีซีลีโนเซชันเพื่อประยุกต์เป็นเซลล์แสงอาทิตย์.” รายงานวิจัยเสนอต่อคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.

งามนิตย์ วงษ์เจริญ, ฐิตินัย แก้วแดง และทิพรัตน์ วงษ์เจริญ. 2556. “ความไม่เป็นเชิงเส้นทางไฟฟ้าของเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ  $In_xWO_3 (0 \leq x \leq 0.05)$  และการประยุกต์.” รายงานวิจัยเสนอต่อคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.

ฐิตินัย แก้วแดง. 2531. “การเตรียมและศึกษาสมบัติของสารกึ่งตัวนำของคอปเปอร์อินเดียมไดซัลไฟด์.” วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต ภาควิชาฟิสิกส์ บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

ฐิตินัย แก้วแดง, งามนิตย์ วงษ์เจริญ, ทิพรัตน์ วงษ์เจริญ และชัยสิงห์ ภูริรักษ์เกียรติ. 2546. “การประดิษฐ์ฟิล์มบาง  $Cd_{1-x}Zn_xS$  ที่มี Zn ในปริมาณสูงสำหรับเซลล์แสงอาทิตย์.” รายงานวิจัยเสนอต่อคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.

ฐิตินัย แก้วแดง, งามนิตย์ วงษ์เจริญ และทิพรัตน์ วงษ์เจริญ. 2549. “การประดิษฐ์ฟิล์มบางดีบุกออกไซด์ที่เจือด้วยอะตอมฟลูออรีนสำหรับเป็นขั้วไฟฟ้าโปร่งแสงของเซลล์แสงอาทิตย์.” รายงานวิจัยเสนอต่อคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.

ฐิตินัย แก้วแดง, งามนิตย์ วงษ์เจริญ, ทิพรัตน์ วงษ์เจริญ และชัยสิงห์ ภูริรักษ์เกียรติ. 2558. “การเตรียมฟิล์มบาง  $CuO$  โดยวิธีรีแอคทีฟสปัตเตอร์ริง เพื่อประดิษฐ์เป็นเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดรอยต่อวิวิธพันธุ์  $CdS/CuO$ .” รายงานวิจัยเสนอต่อคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.

ฐิตินัย แก้วแดง, งามนิตย์ วงษ์เจริญ และณัฐพร พรหมรส. 2551. “การเตรียมฟิล์มบาง  $CdS$  โดยวิธีอบสารละลายเคมีภายใต้คลื่นไมโครเวฟเพื่อประดิษฐ์เป็นหน้าต่างรับแสงของเซลล์แสงอาทิตย์.” รายงานวิจัยเสนอต่อคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.

ฐิตินัย แก้วแดง, งามนิตย์ วงษ์เจริญ, ณัฐพร พรหมรส และทิพรัตน์ วงษ์เจริญ. 2552. “การพัฒนาชั้นไฟฟ้าด้านหลังของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบาง CdS/CdTe.” รายงานวิจัยเสนอต่อคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.

ฐิตินัย แก้วแดง, งามนิตย์ วงษ์เจริญ และทิพรัตน์ วงษ์เจริญ. 2557. “การประดิษฐ์และการศึกษาสมบัติของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบางของรอยต่ออวิวิธพันธุ์ CdS/CuO.” รายงานวิจัยเสนอต่อคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.

ดุสิต เครื่องาม. 2535. โพลีดีสเททฟิสิกส์, กรุงเทพมหานคร: ซีเอ็ดดูเคชั่น.

ดุสิต เครื่องาม. 2542. สิ่งประดิษฐ์ออปโตอิเล็กทรอนิกส์ ฟิสิกส์ เทคโนโลยีและการใช้งานเล่ม 1, กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

วีรชัย ลิภา. 2547. “การศึกษาสมบัติของฟิล์มบาง CdS-ZnS ซึ่งเตรียมโดยวิธีอบสารละลายเคมี.” วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารบัณฑิต ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ บัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.

สุกฤษฎี เกิดแสง. 2547. “การเตรียมและศึกษาสมบัติของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำสำหรับเซลล์แสงอาทิตย์ CdTe.” วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารบัณฑิต ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ บัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.

สมเกียรติ ศุภเดช. 2542. เซมิคอนดักเตอร์ฟิสิกส์. แผนกตำรา คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.

อุบลัมภ์ นาครักษ์. 2548. “การศึกษาสมบัติของฟิล์มบางดีบุกออกไซด์ที่เจือด้วยฟลูออรีนและพลวงซึ่งเตรียมวิธีพ่นละอองสารเคมี.” วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารบัณฑิต ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ บัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.

Cullity, B.D., 1956. Elements of X-ray Diffraction. Addison-Wesley Publishing Company Inc.

Dieter, K.S., 1998. Semiconductor Material and Device Characterization, 2<sup>nd</sup> ed., New York : John Wiley & Sons Inc.

Elangovan, E. and Ramamurthi, K., 2003. “Optoelectronic Properties of Spray Deposition SnO<sub>2</sub> : F Thin Film for Windows Material in Solar Cells.” J. Optoelect. Adv. Mat., 5:45-54.

Fahrenbruch, A.L. and Bube, R.H., 1983. Fundamentals of cell Photovoltaic Solar Energy Conversion, New York Academic Press Inc, p.44.

Gangopadhyay, U. Kim K., Mangalaraj, D., Yi J., 2004. “Low Cost CBD ZnS Antireflection Coating on Large Area Commercial Mono-crystalline Silicon Solar Cells.” Applied Surface Science, 230:364-370.

Ghaffarzadeh, K. Nathan, A. and Robertson, J. 2010. “Persistent Photoconductivity in Hf-In-Zn-O Thin Film Transistor.” Appl. Phys. Lett. 97, 143510-1-143510-3.

Ghosh, R. and Basak, D. 2007. “Electrical and Ultraviolet Photoresponse Properties of Quasialigned ZnO Nanowires/p-Si Heterojunction.” Appl. Phys. Lett. 90, 243106-1-243106-3.

Gu, G. Kane, M.G. Dofy, J.E. and Firester, A.H. 2005. “Electron Traps and Hysteresis in Pentacene-Based Organic Thin film Transistors.” Appl. Phys. Lett. 87, 243512-1-243512-3.

- Guo, L. Wang, X. Feng, L. Zheng, X. and Chen, G. 2013. "Temperature Sensitive Photoconductivity Observed in InN Layers." *Appl. Phys. Lett.* 102, 072103-1-072103-3.
- Huang, B.C. and Lin, Y.L. 2011. "Effect of the Induced Electron Traps by Oxygen Plasma Treatment on Transfer Characteristics of Organic Thin Film Transistor." *Appl. Phys. Lett.* 99,113301-1-113301-3
- Huang, C.C. Lin, Y.J. Liu, C.J. and Yang, Y.W. 2013. "Photovoltaic Properties of n-Type SnS Contact on the Unpolished p-Type Si Surface With and Without Sulfide Treatment." *Microelectronic Engineering*-110:21-24.
- Johnson, C. Lin, J.Y. and Jiang, H.X. 1996. "Metastability and Persistent Photoconductivity in Mg-Doped p-Type GaN." *Appl. Phys. Lett.* 68(13), 1808-1810
- Kittel, C. 1971. *Introduction to Solid State Physics*. 4<sup>th</sup> ed. New York : John Wiley & Sons Inc.
- Kittel, C. 2005. *Introduction to Solid State Physics*. 8<sup>th</sup> ed. United States of American : John Wiley & Sons Inc.
- Luo, J. Adler, A.U. Mason, T.O. and Buchholz, D. 2013. "Transient Photoresponses in Amorphous In-Ga-Zn-O Thin Films Under Stretched Exponential Analysis." *J. Appl. Phys.* 113,153709-1-135709-8.
- Mraquardt, M.A. Ashmore, N.A. and Cann, D.P., 2006. "Crystal Chemistry and Electrical Properties of the Delafossite Structure." *Thin solid films*, 496: 146-156.
- Ruan, C.H. Lin, Y.J. Chen, Y.H. and Chang, H.C. 2015. "Rectifying Performance of p-type Tin(II) Sulfide Contacts on n-type Silicon: Effect of Silicon Nanowire Sulfidation on Electronic Transport of Heterojunction Diodes." *Materials Science in Semiconductor Processing*. 32:62-67.
- Runyan, W.R., 1975. *Semiconductor Measurement and Instrument*, 3<sup>rd</sup> ed, New York: Mc.Graw-Hill.
- Shi, C. Yang, P. Yao. M. Dai, X. and Chen, Z. 2013. "Preparation of SnS<sub>2</sub> Thin Films by Close-Spaced Sublimation at Different Source Temperature." *Thin Solid Films*. 534:28-31.
- Studenikin, S.A., Geleco, N. and Cocivera, M. 1998. "Optical and Electrical Properties of Undoped ZnO Films Grown by Spray Pyrolysis of Zinc Nitrate Solution." *J. Appl. Phys.* 83(4), 21042111.
- Sze S.M. 2007. *Semiconductor Devices Physics and Technology*. 3<sup>rd</sup> ed. United States of America : John Wiley & Sons Inc.
- Tilley, J.D., 2004. *Understanding Solids: The Science of Materials*, Chichester, John Wiley & Son.
- van der Pauw L.J., 1958. "A Method of Measuring Specific Resistivity and Hall Effect of Discs of Arbitrary Shape." *Philips Res. Reports*, 13: 1-9.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

| Pattern : 75-589   |  | Radiation = 1.540600              |          | Quality : Calculated |          |          |
|--|--|-----------------------------------|----------|----------------------|----------|----------|
| Si   |  | <b>2<math>\theta</math></b>       | <b>I</b> | <b>h</b>             | <b>k</b> | <b>l</b> |
| Silicon  |  | 28.444                            | 100      | 1                    | 1        | 1        |
|  |  | 47.305                            | 55       | 2                    | 2        | 0        |
|  |  | 56.125                            | 30       | 3                    | 1        | 1        |
|  |  | 58.859                            | <1       | 2                    | 2        | 2        |
|  |  | 69.133                            | 7        | 4                    | 0        | 0        |
|  |  | 76.380                            | 10       | 3                    | 3        | 1        |
|  |  | 88.035                            | 12       | 4                    | 2        | 2        |
| <b>Lattice</b> : Face-centered cubic   |  | <b>Mol. weight</b> = 28.09        |          |                      |          |          |
| <b>S.G.</b> : Fd3m (227)   |  | <b>Volume [CD]</b> = 160.17       |          |                      |          |          |
| <b>a</b> = 5.43071   |  | <b>Dx</b> = 2.329                 |          |                      |          |          |
| <b>Z</b> = 8   |  | <b>I/cor</b> = 4.55               |          |                      |          |          |
| ICSD COLLECTION CODE : 029287<br>TEST FROM ICSD : No R value given.<br>TEST FROM ICSD : At least one TF missing.   |  |                                   |          |                      |          |          |
| *Calculated from ICSD using POWD-12+ <sup>+</sup> , (1997) primary reference :<br>*J. Phys. Chem. Solids, volume 16, page 44, (1960) :<br>Bond, W.L., Kaiser, W. |  |                                   |          |                      |          |          |
| <b>Radiation</b> : CuK $\alpha$ 1  |  | <b>Filter</b> : Not specified     |          |                      |          |          |
| <b>Lambda</b> : 1.54060  |  | <b>d-sp</b> : Calculated spacings |          |                      |          |          |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

| Pattern : 73-1859   |  | Radiation = 1.540600       |     |              |   |   | Quality : Calculated |    |   |   |   |
|---|--|----------------------------|-----|--------------|---|---|----------------------|----|---|---|---|
| Sn S  |  | 2th                        | l   | h            | k | i | 2th                  | l  | h | k | i |
| Tin Sulfide   |  | 15.841                     | <1  | 2            | 0 | 0 | *84.664              | 8  | 2 | 2 | 3 |
|   |  | 22.001                     | 32  | 1            | 0 | 1 | 84.935               | 5  | 6 | 0 | 3 |
|   |  | 26.013                     | 66  | 2            | 0 | 1 | 86.352               | 3  | 8 | 1 | 2 |
|   |  | 27.479                     | 71  | 2            | 1 | 0 | *86.352              | 3  | 1 | 3 | 2 |
|   |  | 30.477                     | 53  | 0            | 1 | 1 | 87.406               | 2  | 3 | 2 | 3 |
|   |  | 31.533                     | 100 | 1            | 1 | 1 | 87.986               | <1 | 2 | 3 | 2 |
|   |  | 31.655                     | 63  | 3            | 0 | 1 | 88.300               | 1  | 8 | 2 | 1 |
|   |  | 31.995                     | 68  | 4            | 0 | 0 | 88.526               | 3  | 5 | 3 | 1 |
|   |  | 34.527                     | <1  | 2            | 1 | 1 | 89.230               | <1 | 6 | 1 | 3 |
|   |  | 38.301                     | 1   | 4            | 0 | 1 |                      |    |   |   |   |
|   |  | 39.069                     | 42  | 3            | 1 | 1 |                      |    |   |   |   |
|   |  | 39.354                     | 6   | 4            | 1 | 0 |                      |    |   |   |   |
|   |  | 41.695                     | 2   | 0            | 0 | 2 |                      |    |   |   |   |
|   |  | 42.506                     | 19  | 1            | 0 | 2 |                      |    |   |   |   |
|   |  | 44.771                     | 30  | 4            | 1 | 1 |                      |    |   |   |   |
|   |  | 44.869                     | 17  | 2            | 0 | 2 |                      |    |   |   |   |
|   |  | 45.522                     | 25  | 0            | 2 | 0 |                      |    |   |   |   |
|   |  | 45.628                     | 23  | 5            | 0 | 1 |                      |    |   |   |   |
|   |  | 48.520                     | 24  | 2            | 2 | 0 |                      |    |   |   |   |
|   |  | *48.520                    | 24  | 1            | 1 | 2 |                      |    |   |   |   |
|   |  | 48.605                     | 22  | 3            | 0 | 2 |                      |    |   |   |   |
|   |  | 50.663                     | 1   | 2            | 1 | 2 |                      |    |   |   |   |
|   |  | 51.111                     | 6   | 1            | 2 | 1 |                      |    |   |   |   |
|   |  | 51.357                     | 18  | 5            | 1 | 1 |                      |    |   |   |   |
|   |  | 53.178                     | 15  | 2            | 2 | 1 |                      |    |   |   |   |
|   |  | 53.496                     | 9   | 6            | 0 | 1 |                      |    |   |   |   |
|   |  | *53.496                    | 9   | 4            | 0 | 2 |                      |    |   |   |   |
|   |  | 54.097                     | 10  | 3            | 1 | 2 |                      |    |   |   |   |
|   |  | 54.313                     | 12  | 6            | 1 | 0 |                      |    |   |   |   |
|   |  | 56.505                     | 2   | 3            | 2 | 1 |                      |    |   |   |   |
|   |  | 56.721                     | 20  | 4            | 2 | 0 |                      |    |   |   |   |
|   |  | 58.671                     | 1   | 6            | 1 | 1 |                      |    |   |   |   |
|   |  | *58.671                    | 1   | 4            | 1 | 2 |                      |    |   |   |   |
|   |  | 59.380                     | 4   | 5            | 0 | 2 |                      |    |   |   |   |
|   |  | 60.962                     | <1  | 4            | 2 | 1 |                      |    |   |   |   |
|   |  | 61.671                     | <1  | 7            | 0 | 1 |                      |    |   |   |   |
|   |  | 63.428                     | 1   | 0            | 2 | 2 |                      |    |   |   |   |
|   |  | 64.034                     | 9   | 1            | 2 | 2 |                      |    |   |   |   |
|   |  | 64.247                     | 14  | 5            | 1 | 2 |                      |    |   |   |   |
|   |  | 65.129                     | 3   | 1            | 0 | 3 |                      |    |   |   |   |
|   |  | 65.836                     | <1  | 2            | 2 | 2 |                      |    |   |   |   |
|   |  | 66.115                     | 1   | 6            | 0 | 2 |                      |    |   |   |   |
|   |  | 66.426                     | 5   | 5            | 2 | 1 |                      |    |   |   |   |
|   |  | 66.634                     | 7   | 7            | 1 | 1 |                      |    |   |   |   |
|   |  | 66.899                     | 7   | 8            | 0 | 0 |                      |    |   |   |   |
|   |  | *66.899                    | 7   | 2            | 0 | 3 |                      |    |   |   |   |
|   |  | 68.784                     | 8   | 3            | 2 | 2 |                      |    |   |   |   |
|   |  | 68.972                     | 5   | 6            | 2 | 0 |                      |    |   |   |   |
|   |  | 69.192                     | 5   | 0            | 1 | 3 |                      |    |   |   |   |
|   |  | 69.841                     | 2   | 1            | 1 | 3 |                      |    |   |   |   |
|   |  | *69.841                    | 2   | 3            | 0 | 3 |                      |    |   |   |   |
|   |  | 70.790                     | <1  | 6            | 1 | 2 |                      |    |   |   |   |
|   |  | *70.790                    | <1  | 8            | 0 | 1 |                      |    |   |   |   |
|   |  | 71.487                     | 2   | 8            | 1 | 0 |                      |    |   |   |   |
|   |  | *71.487                    | 2   | 2            | 1 | 3 |                      |    |   |   |   |
|   |  | 72.812                     | 5   | 6            | 2 | 1 |                      |    |   |   |   |
|   |  | *72.812                    | 5   | 4            | 2 | 2 |                      |    |   |   |   |
|   |  | 73.235                     | 3   | 2            | 3 | 0 |                      |    |   |   |   |
|   |  | 73.652                     | 4   | 7            | 0 | 2 |                      |    |   |   |   |
|   |  | 73.849                     | 2   | 4            | 0 | 3 |                      |    |   |   |   |
|   |  | 74.349                     | 2   | 3            | 1 | 3 |                      |    |   |   |   |
|   |  | 74.746                     | 3   | 0            | 3 | 1 |                      |    |   |   |   |
|   |  | 75.310                     | 8   | 8            | 1 | 1 |                      |    |   |   |   |
|   |  | *75.310                    | 8   | 1            | 3 | 1 |                      |    |   |   |   |
|   |  | 76.990                     | <1  | 2            | 3 | 1 |                      |    |   |   |   |
|   |  | 77.880                     | 3   | 5            | 2 | 2 |                      |    |   |   |   |
|   |  | 78.075                     | 3   | 7            | 1 | 2 |                      |    |   |   |   |
|   |  | 78.269                     | 6   | 4            | 1 | 3 |                      |    |   |   |   |
|   |  | 78.889                     | 1   | 5            | 0 | 3 |                      |    |   |   |   |
|   |  | 79.768                     | 3   | 3            | 3 | 1 |                      |    |   |   |   |
|   |  | 79.950                     | 2   | 4            | 3 | 0 |                      |    |   |   |   |
|   |  | 80.350                     | 2   | 9            | 0 | 1 |                      |    |   |   |   |
|   |  | 82.006                     | <1  | 8            | 0 | 2 |                      |    |   |   |   |
|   |  | 83.038                     | 2   | 1            | 2 | 3 |                      |    |   |   |   |
|   |  | 83.231                     | 1   | 5            | 1 | 3 |                      |    |   |   |   |
|   |  | 83.616                     | 3   | 4            | 3 | 1 |                      |    |   |   |   |
|   |  | 83.942                     | 2   | 6            | 2 | 2 |                      |    |   |   |   |
|   |  | 84.664                     | 8   | 8            | 2 | 0 |                      |    |   |   |   |
| Lattice : Orthorhombic  |  | Mol. weight = 150.75       |     |              |   |   |                      |    |   |   |   |
| S.G. : Pnma (62)  |  | Volume [CD] = 192.72       |     |              |   |   |                      |    |   |   |   |
| a = 11.18000  |  | Dx = 5.196                 |     |              |   |   |                      |    |   |   |   |
| b = 3.98200   |  |                            |     |              |   |   |                      |    |   |   |   |
| c = 4.32900   |  |                            |     |              |   |   |                      |    |   |   |   |
| a/b = 2.80763   |  | Z = 4                      |     | I/cor = 4.54 |   |   |                      |    |   |   |   |
| c/b = 1.08714   |  |                            |     |              |   |   |                      |    |   |   |   |
| ICSD COLLECTION CODE : 024376   |  |                            |     |              |   |   |                      |    |   |   |   |
| TEMPERATURE FACTOR : ATF  |  |                            |     |              |   |   |                      |    |   |   |   |
| REMARKS FROM ICSD : PICT.   |  |                            |     |              |   |   |                      |    |   |   |   |
| *Calculated from ICSD using POWD-12+, (1997) primary reference :                                    |  |                            |     |              |   |   |                      |    |   |   |   |
| *Acta Crystallogr., Sec. B, volume 37, page 1903, (1981) ; del Bucchia, S., Jumas, J.C., Maurin, M. |  |                            |     |              |   |   |                      |    |   |   |   |
| Radiation : CuKα1   |  | Filter : Not specified     |     |              |   |   |                      |    |   |   |   |
| Lambda : 1.54060  |  | d-sp : Calculated spacings |     |              |   |   |                      |    |   |   |   |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ประวัติผู้เขียน

ชื่อผู้เขียน นางสาว จีร์ปภัส ด้วงสะดี  
เกิดเมื่อ วันที่ 13 พฤษภาคม พ.ศ. 2536  
ภูมิลำเนา จังหวัดอุดรธานี  
ประวัติการศึกษา ระดับประถมศึกษา โรงเรียนอนุบาลอุดรธานี จังหวัดอุดรธานี  
ระดับมัธยมศึกษา โรงเรียนสตรีราชินูทิศ จังหวัดอุดรธานี  
ระดับอุดมศึกษา สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
คณะวิทยาศาสตร์ สาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์

ชื่อผู้เขียน นางสาว วรรัตน์ สวัสดิ์  
เกิดเมื่อ วันที่ 22 มิถุนายน พ.ศ. 2535  
ภูมิลำเนา จังหวัดลพบุรี  
ประวัติการศึกษา ระดับประถมศึกษา โรงเรียนอนุบาลลพบุรี จังหวัดลพบุรี  
ระดับมัธยมศึกษาตอนต้น โรงเรียนวินิตศึกษาในพระราชูปถัมภ์  
สมเด็จพระเทพรัตนราชสุดาฯสยามบรมราชกุมารี จังหวัดลพบุรี  
ระดับมัธยมศึกษาตอนปลาย โรงเรียนพิบูลวิทยาลัย จังหวัดลพบุรี  
ระดับอุดมศึกษา สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
คณะวิทยาศาสตร์ สาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้