

การศึกษารอยต่อแบบพี-เอ็น ไซโมจัน  
ของคอปเปอร์อินเดียมไดซัลไฟด์



นางสาวกัญญา เอี่ยมประเสริฐศักดิ์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต  
ภาควิชาฟิสิกส์

บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

พ.ศ. 2531

ISBN 974 - 569 - 457 - 6

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

014444

117508809

A Study of p - n Homojunction of  
Copper Indium Diselenide

Miss. Kalya Eaiprasertsak

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements  
for the Degree of Master of Science

Department of Physics

Graduate School

Chulalongkorn University

1988

ISBN 974 - 569 - 457 - 6

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การศึกษาการย่อยต่อแบบพี-เอ็นไอโมจิสังเคราะห์ของ  
คอปเปอร์อินเดียม ไดซัลไฟด์

โดย

นางสาวกัลยา เอื้อประเสริฐศักดิ์

ภาควิชา

ฟิสิกส์

อาจารย์ที่ปรึกษา

ผู้ช่วยศาสตราจารย์สมพงษ์ ฉัตรการณ

อาจารย์ ดร. ขจรยศ อยุธยา



บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัย  
ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

*[Signature]* .....คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย  
( ศาสตราจารย์ ดร.ถาวร วัชรารักษ์ )

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

*[Signature]* .....ประธานกรรมการ  
( รองศาสตราจารย์ ดร.ภิญโญ บัณฑิตยารชุน )

*[Signature]* .....กรรมการ  
( รองศาสตราจารย์ ดร.วิจิตร เส็งพะพันธ์ )

*[Signature]* .....กรรมการ  
( ผู้ช่วยศาสตราจารย์ กิรฉัตร รัตนธรรมพันธ์ )

*[Signature]* .....กรรมการ  
( ผู้ช่วยศาสตราจารย์ สมพงษ์ ฉัตรการณ )

*[Signature]* .....กรรมการ  
( อาจารย์ ดร.ขจรยศ อยุธยา )



พิมพ์ต้นฉบับบทความวิทยานิพนธ์ภายในกรอบสี่เหลี่ยมนี้เพียงแผ่นเดียว



กัลยา เอี่ยมประเสริฐศักดิ์ การศึกษารอยต่อแบบพี-เอ็น โฮโมจังค์ชันของคอปเปอร์อินเดียมไดเซเลไนด์ (A STUDY OF p-n HOMOJUNCTION OF COPPER INDIUM DISELENIDE)  
อ.ที่ปรึกษา : พศ.สมพงษ์ ฉัตรภรณ์ และ อ.ดร.ขจรยศ อยู่ดี 119 หน้า.

ในการวิจัยนี้ได้เตรียมผลึกกึ่งตัวนำ  $CuInSe_2$  จากสภาวะหลอมเหลวในแบบโคเรกชันนัล-ฟริชชิง โดยวิธีของบริดจ์แมน-สโตคบาร์เกอร์ในแนวอนนให้มีชนิดการนำไฟฟ้าเป็นชนิดเอ็นและชนิดพีตามที่ต้องการ ด้วยการเติมหรือลดปริมาณธาตุที่เป็นส่วนประกอบคือ  $Cu$ ,  $In$  และ  $Se$  รวมทั้งได้ปด้วยธาตุ  $Ge$  กับสารประกอบ  $GaAs$  ในปริมาณ  $0.3 \text{ at}\%$  ของ  $CuInSe_2$  สารกึ่งตัวนำที่เตรียมได้จากการเติม  $Cu, Se$  และ  $GaAs$  กับการลดปริมาณของ  $Cu$  และ  $In$  เป็นชนิดพี ส่วนที่เติม  $In$  และ  $Ge$  กับการลดปริมาณของ  $Se$  ได้ผลึกสารเป็นชนิดเอ็น สภาพต้านทานไฟฟ้าของสารตัวอย่างทั้งชนิดพีและชนิดเอ็นค่อนข้างต่ำคือมีค่าอยู่ในช่วง  $0.01-15 \Omega\text{-cm}$  ผลึกเอกพันธ์ซึ่งสามารถตัดเอาไปใช้งานได้อยู่ในระดับขนาด  $10 \times 8 \times 5 \text{ cm}^3$  ระบายที่แสดงบริเวณผิวหน้าเปิดเป็นระนาบ(112)

การศึกษการเปลี่ยนแปลงสภาพต้านทานไฟฟ้าด้วยขบวนการความร้อน โดยการแอนเนลที่อุณหภูมิ  $150^\circ-700^\circ\text{C}$  เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ในบรรยากาศของแก๊สไฮโดรเจนพบว่าสภาพต้านทานไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงไปเล็กน้อยที่อุณหภูมิแอนเนลต่ำ ส่วนที่อุณหภูมิแอนเนลสูงกว่า  $500^\circ\text{C}$  สภาพต้านทานไฟฟ้าจะลดลงประมาณ 10-100 เท่า และสารกึ่งตัวนำชนิดพีเปลี่ยนเป็นชนิดเอ็น ยกเว้นสารกึ่งตัวนำที่เตรียมได้จากการได้ปด้วย  $GaAs$  สภาพต้านทานไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงไปเล็กน้อยและไม่เปลี่ยนชนิดการนำไฟฟ้า

จากการวัดค่าการนำไฟฟ้าของสารตัวอย่างที่เปลี่ยนไปกับอุณหภูมิจากอุณหภูมิห้องลงไปจนถึงอุณหภูมิของไนโตรเจนเหลว(77K) เมื่อเขียนกราฟแบบ Arrhenius ทำให้ทราบว่าพลังงานไอออไนซ์ของระดับสิ่งเจือปนชนิดพีมีค่า 14 meV, 39 meV, 54 meV, 63 meV, 84 meV, 130 meV และ 208 meV สำหรับสารตัวอย่างชนิดเอ็นมีค่าเท่ากับ 17 meV, 20 meV, 43 meV และ 159 meV ซึ่งระดับพลังงานเหล่านี้เป็นระดับพลังงานของข้อบกพร่องที่เกิดขึ้นเองภายในผลึก ซึ่งมีสาเหตุมาจากการแปรเปลี่ยนสัดส่วนอะตอม และ/หรือ โดยขบวนการความร้อน

การทำรอยต่อพี-เอ็น โฮโมจังค์ชันด้วยการแพร่กระจายโลหะอินเดียมเข้าไปในสารกึ่งตัวนำ  $CuInSe_2$  ชนิดพี โดยการแอนเนลที่อุณหภูมิ  $300^\circ\text{C}$  ในบรรยากาศของแก๊สไฮโดรเจนบริสุทธิ์เป็นเวลา 10 นาที และ 15 นาที พบว่าลักษณะสอกระแสดักยไฟฟ้า แบบไบอัสตรงมีค่าแฟลคเตอร์อุดมคติ(n) อยู่ระหว่าง 2.00-3.30 จากการวัดค่าความจุ-ศักย์ไฟฟ้า ความหนาแน่นของสารเจือ  $[N(x)]$  มีค่าอยู่ระหว่าง  $10^{14} - 10^{16} \text{ cm}^{-3}$  และหาความลึกของรอยต่อได้ 1-5  $\mu\text{m}$

ภาควิชา ..... ฟิสิกส์  
สาขาวิชา ..... ฟิสิกส์  
ปีการศึกษา ..... 2531

ลายมือชื่อนิสิต ..... *[Signature]*  
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา ..... *[Signature]*  
11/05/2531





พิมพ์ต้นฉบับบทคัดย่อวิทยานิพนธ์ภายในกรอบสี่เหลี่ยมนี้เพียงแผ่นเดียว

KALYA EAIPRASERTSAK : A STUDY OF p-n HOMOJUNCTION OF COPPER INDIUM  
DISELENIDE. THESIS ADVISOR : ASSO.PROF.SOMPONG CHATRAPHORN AND  
KAJORN YOD YOODEE, Ph.D. 119 PP.

The crystalline bulk of the semiconducting compound  $\text{CuInSe}_2$  were prepared from the melt by directional freezing, using horizontal Bridgman-Stockbarger technique. The overall conductivity type of as-grown crystals can be controlled by introducing a slight excess/deficiency 0.3 at.% of Cu, In or Se in the melt. Excess Cu or Se and deficient Cu or In samples were p-type while excess In or deficient Se were n-type. Crystals grown from the melt doping with Ge or GaAs lead to n-type and p-type respectively. All samples grown by this technique have low resistivity values in the range  $0.01 - 15 \Omega\text{-cm}$ . Single crystal as large as  $10 \times 8 \times 5 \text{ cm}^3$  were grown. The top free surfaces normally the (112) plane.

We studied the change of resistivity for samples annealed between  $150^\circ - 700^\circ\text{C}$  for 1 hour in  $\text{H}_2$  atmosphere. It was found that at temperature lower than  $500^\circ\text{C}$ , resistivity of all samples decreased slowly with annealing temperatures and beyond  $500^\circ\text{C}$  decreasing in resistivity of 10-100 times were found. At this temperature, all p-type samples, except for GaAs doping, changed type.

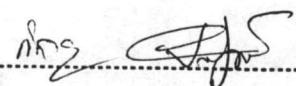
From electrical conductivity measurements down to liquid nitrogen temperature (77K), activation energies from Arrhenius plots were obtained. Energy levels of 14 meV, 39 meV, 54 meV, 63 meV, 84 meV, 130 meV and 208 meV were found for p-type samples and 17 meV, 20 meV, 43 meV, 159 meV, for n-type. These energy levels were interpreted as intrinsic self defect states caused by nonstoichiometry and/or by thermal treatment.

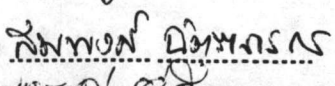
Homojunctions were prepared by alloying In onto the p-type single at  $300^\circ\text{C}$  for 10 min and 15 min in  $\text{H}_2$  atmosphere. From I-V characteristic measurement, the ideality factor n was determined to be 2.00-3.30. The hole concentration profile  $N(x)$  of  $10^{14} - 10^{16} \text{ cm}^{-3}$  and junction depth of  $1-5 \mu\text{m}$  were determined from C-V measurement.

ภาควิชา ..... ฟิสิกส์ .....

สาขาวิชา ..... ฟิสิกส์ .....

ปีการศึกษา ..... 2531 .....

ลายมือชื่อนิสิต  .....

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา  .....



หัวข้อวิทยานิพนธ์

การศึกษาการยดอแบบพี-เอ็น ไฮโมจังค์ชันของ

ชื่อนิสิต

คอปเปอร์อินเดียม ไดซีลีไนด์

อาจารย์ที่ปรึกษา

นางสาวกัลยา เอี่ยมประเสริฐศักดิ์

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ สมพงษ์ จิตราภรณ์

อาจารย์ ดร. ขจรยศ อยู่ดี

ภาควิชา

ฟิสิกส์

ปีการศึกษา

2531

### บทคัดย่อ

ในการวิจัยนี้ได้เตรียมผลึกกึ่งตัวนำ  $\text{CuInSe}_2$  จากสภาวะหลอมเหลวในแบบไดเรกชันนัลฟรีซซิง โดยวิธีของบริดจ์แมน-สโตบาร์เกอร์ในแนวนอนใหม่ชนิดการนำไฟฟ้าเป็นชนิดเอ็นและชนิดพีตามที่ต้องการ ด้วยการเติมหรือลดปริมาณธาตุที่เป็นส่วนประกอบคือ Cu, In และ Se รวมทั้งได้ปดด้วยธาตุ Ge กับสารประกอบ GaAs ในปริมาณ 0.3 at% ของ  $\text{CuInSe}_2$  สารกึ่งตัวนำที่เตรียมได้จากการเติม Cu, Se และ GaAs ก็กับการลดปริมาณของ Cu และ In เป็นชนิดพี ส่วนที่เติม In และ Ge ก็กับการลดปริมาณของ Se ได้ผลึกสารเป็นชนิดเอ็นสภาพต้านทานไฟฟ้าของสารตัวอย่างทั้งชนิดพีและชนิดเอ็นค่อนข้างต่ำ คือมีค่าอยู่ในช่วง  $0.01 - 15 \ \Omega\text{-cm}$  ผลึกเอกพันธ์ซึ่งสามารถตัดเอาไปใช้งานได้อยู่ในระดับขนาด  $10 \times 8 \times 5 \text{ mm}$  ระบายที่แสดงบริเวณผิวหน้าเปิดเป็นระนาบ (112)

การศึกษาการเปลี่ยนแปลงสภาพต้านทานไฟฟ้าด้วยขบวนการความร้อน โดยการแอนนัลที่อุณหภูมิ  $150^\circ - 700^\circ \text{C}$  เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ในบรรยากาศของแก๊สไฮโดรเจนพบว่าสภาพต้านทานไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงไปเล็กน้อยที่อุณหภูมิแอนนัลต่ำ ส่วนที่อุณหภูมิแอนนัลสูงกว่า  $500^\circ \text{C}$  สภาพต้านทานไฟฟ้าจะลดลงประมาณ 10-100 เท่า และสารกึ่งตัวนำชนิดพีเปลี่ยนเป็นชนิดเอ็น ยกเว้นสารกึ่งตัวนำที่เตรียมได้จากการเติมด้วย GaAs สภาพต้านทานไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงไปเล็กน้อยและไม่เปลี่ยนชนิดการนำไฟฟ้า

จากการวัดค่าการนำไฟฟ้าของสารตัวอย่างที่เปลี่ยนไปกับอุณหภูมิจากอุณหภูมิห้องลงไปจนถึงอุณหภูมิของไนโตรเจนเหลว (77K) เมื่อเขียนกราฟแบบ Arrhenius ทำให้ทราบว่าพลังงานไอออไนซของระดับสิ่งเจือปนชนิดพีมีค่า  $14 \text{ meV}$ ,  $39 \text{ meV}$ ,  $54 \text{ meV}$ ,  $63 \text{ meV}$ ,

84 meV , 130 meV และ 208 meV สำหรับสารตัวอย่างชนิดอื่นมีค่าเท่ากับ 17 meV, 20 meV , 43 meV และ 159 meV ซึ่งระดับพลังงานเหล่านี้เป็นระดับพลังงานของข้อบกพร่องที่เกิดขึ้นเองภายในผลึก ซึ่งมีสาเหตุมาจากการแปรเปลี่ยนสัดส่วนอะตอม และ/หรือ โดยขบวนการความร้อน

การทำรอยต่อพี-เอ็น โสโมจึงได้ขึ้นด้วยการแพร่กระจายโลหะอินเดียมเข้าไปในสารกึ่งตัวนำ  $\text{CuInSe}_2$  ชนิดพี โดยการแอนนัลที่อุณหภูมิ  $300^\circ\text{C}$  ในบรรยากาศของแก๊สไฮโดรเจนบริสุทธิ์เป็นเวลา 10 นาที และ 15 นาที พบว่าลักษณะสอกระแส-ศักย์ไฟฟ้า แบบไบอัสตรงมีค่าแฟลเตอร์อุณหคณิต ( $n$ ) อยู่ระหว่าง 2.00-3.30 จากการวัดค่าความจุ-ศักย์ไฟฟ้า ความหนาแน่นของสารเจือ  $\langle N(x) \rangle$  มีค่าอยู่ระหว่าง  $10^{14} - 10^{16} \text{ cm}^{-3}$  หาความลึกของรอยต่อได้ 1 - 5  $\mu\text{m}$





Thesis Title                    A Study of p-n Homojunction of Copper  
    Indium Diselenide

Name                                Miss Kalya Eaiprasertsak

Thesis Advisor                 Assistant Professor Somphong Chatraphorn  
    Dr. Kajornyod Yoodee

Department                     Physics

Academic Year                 1988

#### ABSTRACT

The crystalline bulk of the semiconducting compound  $\text{CuInSe}_2$  were prepared from the melt by directional freezing, using horizontal Bridgman-Stockbarger technique. The overall conductivity type of as-grown crystals can be controlled by introducing a slight excess/deficiency 0.3 at.% of Cu, In or Se in the melt. Excess Cu or Se and deficient Cu or In samples were p-type while excess In or deficient Se were n-type. Crystals grown from the melt doping with Ge or GaAs lead to n-type and p-type respectively. All samples grown by this technique have low resistivity values in the range 0.01 - 15  $\Omega$ -cm. Single crystal as large as 10 x 8 x 5  $\text{cm}^3$  were grown. The top free surfaces were normally the (112) plane.

We studied the change of resistivity for samples annealed between 150 $^\circ$  - 700 $^\circ$  C for 1 hour in  $\text{H}_2$  atmosphere. It was found that at temperature lower than 500 $^\circ$  C, resistivity of all samples decreased slowly with annealing temperatures and beyond 500 $^\circ$  C decreasing in resistivity of 10 - 100 times were found. At this temperature, all p-type samples, except for GaAs doping, changed type.

From electrical conductivity measurements down to liquid nitrogen temperature (77K), activation energies from Arrhenius plots were obtained. Energy levels of 14 meV, 39 meV, 54 meV, 63 meV, 84 meV, 130 meV and 208 meV were found for p-type samples and 17 meV, 20 meV, 43 meV, 159 meV for n-type samples. These energy levels were interpreted as intrinsic self defect states caused by nonstoichiometry and/or by thermal treatment.

Homojunctions were prepared by alloying In onto the p-type single crystal at 300°C for 10 min and 15 min in H<sub>2</sub> atmosphere. From I-V characteristic measurement, the ideality factor  $n$  was determined to be 2.00 - 3.30. The hole concentration profile  $N(x)$  of  $10^{14}$  -  $10^{16}$  cm<sup>-3</sup> and junction depth of 1 - 5  $\mu$ m were determined from C-V measurement.



## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลงได้ด้วยความช่วยเหลือของท่านผู้ช่วยศาสตราจารย์ สมพงษ์ ฉัตรารักษ์ และอาจารย์ ดร.ชจรยศ อยู่ดี ที่ได้ให้คำแนะนำ ช่วยเหลือและความคุ้มครองวิจัยอย่างใกล้ชิดตลอดเวลา รวมทั้งตรวจแก้ไขข้อเขียนในวิทยานิพนธ์ อีกทั้งได้รับการสนับสนุนอย่างดีจากศาสตราจารย์ วิรุทธิ์ สายคณิต รองศาสตราจารย์ จงอร พิรานนท์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ กิรวัฒน์ รัตนธรรมพันธ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ วิชิต ศรีตระกูล และคณะผู้วิจัยหลักสูตรศึกษาศาสตรบัณฑิต สาขาศึกษาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ได้ให้คำแนะนำปรึกษาเกี่ยวกับวิชาการทางด้านหลักสูตรศึกษาศาสตรบัณฑิตและความสะดวกในการวิจัย

ขอขอบคุณ คุณธนา สุทธิโอกาส คุณพงษ์ ทรงพงษ์ และ คุณวิชิต ศิริโชติ นิสิต โปรแกรมปริญญาโท สาขาศึกษาศาสตร์ ที่ให้ความช่วยเหลืออำนวยความสะดวกในการใช้เครื่องมือ เครื่องคอมพิวเตอร์ ทั้งในการคำนวณและการพิมพ์วิทยานิพนธ์

งานวิจัยนี้เป็นส่วนหนึ่งของ โครงการวิจัยที่ได้รับการสนับสนุนจาก จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ภายใต้โครงการพัฒนาหน่วยวิจัย (Unit Cell) จึงขอขอบคุณไว้ ณ ที่นี้

ผู้เขียนขอกราบขอบพระคุณทุกท่านที่ ได้มีส่วนช่วยเหลือและให้กำลังใจจนวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เสร็จสมบูรณ์ ไว้ ณ ที่นี้





## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ฉ
กิตติกรรมประกาศ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฉ
สารบัญรูป.....	ท
บทที่ 1 บทนำ.....	1
บทที่ 2 สารกึ่งตัวนำ.....	5
2.1 ชนิดของสารกึ่งตัวนำ.....	6
2.1.1 ผลึกกึ่งตัวนำที่ประกอบด้วยธาตุเดี่ยว.....	7
2.1.2 ผลึกกึ่งตัวนำที่ประกอบด้วยธาตุเดี่ยวสองชนิด.....	7
2.1.3 ผลึกกึ่งตัวนำที่ประกอบด้วยธาตุเดี่ยวสามชนิด.....	7
2.1.4 โลหะผสมกึ่งตัวนำ.....	7
2.2 โครงสร้างผลึกของสารกึ่งตัวนำ.....	9
2.2.1 โครงสร้างผลึกแบบเพชร.....	9
2.2.2 โครงสร้างผลึกแบบซิงค์เบลนด์.....	9
2.2.3 โครงสร้างผลึกแบบซาลโคไดโรท์.....	10
2.3 โยลและอิเล็กทรอนิกส์.....	10
2.4 การนำไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำ.....	12
บทที่ 3 สมบัติของสารกึ่งตัวนำคอปเปอร์อินเดียมไดซีลีไนต์.....	15
3.1 เฟสไดอะแกรม.....	15
3.2 การเตรียมผลึกกึ่งตัวนำ.....	17
3.3 การเปลี่ยนแปลงสมบัติการนำไฟฟ้า.....	18
3.4 การทำรอยต่อแบบโอห์มมิก.....	23
3.5 การทำรอยต่อพี-เอ็นไอโมจังค์ชัน.....	24

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 4 สมบัติเชิงไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำ.....	26
4.1 ความหนาแน่นของพาหะอิสระที่สภาวะสมดุลเชิงความร้อน.....	26
4.1.1 สารกึ่งตัวนำชนิดอินทรีนสิก.....	28
4.1.2 สารกึ่งตัวนำชนิดเอ็กทรีนสิก.....	30
4.1.2.1 กรณีที่ความหนาแน่นของสิ่งเจือปนมีน้อยหรือ น้อยปานกลาง.....	32
4.1.2.2 กรณีที่ความหนาแน่นของสิ่งเจือปนมีค่ามากหรือ น้อยปานกลาง.....	33
4.2 สภาพนำไฟฟ้าเนื่องจากอิเล็กตรอนและโฮล.....	37
4.3 การวัดสภาพต้านทานไฟฟ้า.....	38
4.3.1 วิธีวัดโดยตรง.....	39
4.3.2 วิธีวัดด้วยขั้วปลายแหลมสองขั้ว.....	39
4.3.3 วิธีวัดด้วยขั้วปลายแหลมสี่ขั้วตามแนวเส้นตรง.....	39
4.3.4 วิธีวัดด้วยขั้วสัมผัสไม่ได้อยู่ในแนวเส้นตรงเดียวกัน.....	40
4.3.4.1 รูปสี่เหลี่ยมจัตุรัส.....	40
4.3.4.2 รูปสี่เหลี่ยมคางหมู.....	40
4.3.4.3 ขั้วสัมผัสอยู่ด้านบน-ด้านล่าง.....	41
4.3.4.4 วิธีแวนเดอเพอร์.....	41
4.3.5 วิธีวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าด้วยเทคนิคของแวนเดอเพอร์.....	42
บทที่ 5 รอยต่อพี-เอ็น โฮโมจังค์ชัน.....	44
5.1 ชนิดของรอยต่อพี-เอ็น.....	44
5.1.1 รอยต่อพี-เอ็น โฮโมจังค์ชัน.....	44
5.1.2 รอยต่อพี-เอ็น เฮเทอโรจังค์ชัน.....	44
5.2 วิธีทำรอยต่อพี-เอ็น.....	44
5.2.1 วิธีทำอัลลอยด์.....	45

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
5.2.2 การสร้างชั้นอิพิแทกเซียล.....	45
5.2.3 ยิงด้วยอะตอมหรือไอออน.....	45
5.3 การแพร่กระจายของพาหะอิสระ.....	45
5.4 สมการความต่อเนื่อง.....	47
5.4.1 ขบวนการรวมตัว.....	47
5.5 รอยต่อพี-เอ็น.....	50
5.6 ความกว้างของบริเวณดีพลีชัน.....	51
5.7 ค่าความจุของบริเวณดีพลีชัน.....	56
5.8 ลักษณะสอกระแส-ศักย์ไฟฟ้า.....	58
บทที่ 6 วิธีการทดลองและผลการทดลอง.....	65
6.1 การเตรียมผลึก.....	65
6.1.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมผลึก.....	66
6.1.1.1 เตาหลอมสาร.....	66
6.1.1.2 ระบบควบคุมและตั้งอุณหภูมิของเตา.....	66
6.1.2 การเตรียมหลอดแก้วควอทซ์เพื่อบรรจุสาร.....	68
6.1.3 การซังและบรรจุธาตุลงในแก้วควอทซ์.....	69
6.1.3.1 การหลอมปิดแก้วควอทซ์.....	70
6.1.4 การเตรียมผลึกกึ่งตัวนำ $CuInSe_2$ ด้วยวิธีของ บริดจ์แมน-สโตคบาร์เกอร์.....	71
6.1.5 การตัดผลึกด้วยเครื่องสตรึงซอ.....	71
6.2 การตรวจสอบชนิดการนำไฟฟ้าและวัดค่าสภาพต้านทานไฟฟ้า.....	73
6.2.1 การตรวจสอบชนิดการนำไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำโดยวิธี ขั้วความร้อน.....	73
6.2.2 การวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าโดยวิธีแวนเดอเพอร์.....	73



## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
6.3 การตรวจสอบกระบวนที่เกิดบริเวณผิวหน้าเปิด.....	76
6.3.1 หลักการของการถ่ายภาพสะท้อนกลับ.....	77
6.3.2 การวิเคราะห์ผล.....	79
6.4 การศึกษาการเปลี่ยนแปลงสภาพต้านทานไฟฟ้าด้วยขบวนการ ความร้อน.....	79
6.5 ระดับพลังงานไอออไนซ์ของสิ่งเจือปน.....	82
6.5.1 การเตรียมแผ่นรองชั้นสาร.....	83
6.6 การศึกษาสมบัติของรอยต่อแบบพี-เอ็น โยโมจังก์ชัน.....	89
6.6.1 การเตรียมแผ่นรองชั้นสาร.....	89
6.6.2 รายละเอียดในการทดลองและผลการทดลอง.....	90
6.6.2.1 การวัดลักษณะสอกระแส-ศักย์ไฟฟ้า.....	90
6.6.2.1 การวัดลักษณะสอความจุ-ศักย์ไฟฟ้า.....	98
บทที่ 7 สรุปและวิจารณ์ผลการทดลอง.....	102
เอกสารอ้างอิง.....	107
ภาคผนวก.....	112
ประวัติผู้เขียน.....	119



## สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
3.1	แสดงค่าของข้อบกพร่องที่เกิดจากการบ่มจากโมเลกุลสาริตหรือจาก วาเลนซ์สโตยคิโอเมตตรี.....	21
3.2	แสดงขนาดของพลังงานที่ทำให้เกิดข้อบกพร่องชนิดต่าง ๆ และชนิด การนำไฟฟ้าของ $CuInSe_2$ .....	22
3.3	แสดงค่าของระดับพลังงานผู้ให้และผู้รับของ $CuInSe_2$ ซึ่งเกิดจากข้อบกพร่อง ของผลึกแบบต่าง ๆ.....	22
3.4	แสดงวัสดุและวิธีปฏิบัติในการทำรอยต่อแบบโฮมมิกของ $CuInSe_2$ .....	23
3.5	แสดงชนิดสารที่ใช้และวิธีการทำรอยต่อพี-เอ็น โฮโมจังค์ชันของ $CuInSe_2$	25
4.1	แสดงรายละเอียดในการวัดสภาพต้านทาน ไฟฟ้าด้วยวิธีขั้วสัมผัส ไม่ได้อยู่ใน แนวเส้นตรงเดียวกัน.....	41
6.1	แสดงน้ำหนักของธาตุต่างๆที่คำนวณไว้และพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับการ หลอมสาร $CuInSe_2$ .....	69
6.2	แสดงน้ำหนักของธาตุต่างๆที่ใช้ได้ป.....	70
6.3	แสดงชนิดและสภาพต้านทาน ไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำ $CuInSe_2$ .....	74
	A1, A2, A3: เตรียมจากสโตยคิโอเมตตรี	
	B1: ได้ด้วย Ge ; B2: ได้ด้วย GaAs ; B3, B4: เติม Cu	
	B5: เติม In ; B6, B7 เติม Se ; C1: ลด Se ; C2: ลด Cu ; C3: ลด In	
6.4	แสดงสภาพต้านทาน ไฟฟ้าของสารตัวอย่างที่วัดได้ที่อุณหภูมิแอนนีลต่าง ๆ.....	80
6.5	แสดงค่าพลังงาน ไอออไนซ์ของระดับสิ่งเจือปนที่เกิดขึ้นเอง เนื่องจากความ บกพร่องของผลึกสารกึ่งตัวนำ $CuInSe_2$ และ เนื่องจากการได้ป.....	86



สารบัญรูป

รูปที่		หน้า
2.1	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างสารประกอบกึ่งตัวนำที่ได้จากการแทนที่อะตอม ลงในผลึกกึ่งตัวนำในตระกูล IV แล้วยังคงรักษาคุณสมบัติเล็กน้อยต่ออะตอม...	8
2.2	แสดง โครงสร้างผลึกแบบเพชร.....	11
2.3	แสดง โครงสร้างผลึกแบบซิงค์เบลนด์.....	11
2.4	แสดง โครงสร้างผลึกแบบซาลโคไฟไรท์.....	11
2.5	แสดงการเกิดคู่ของอิเล็กตรอนกับโฮล.....	12
	(ก) โดยใช้โครงสร้างพันธะ	
	(ข) โดยใช้แถบพลังงาน	
2.6	(ก) โครงสร้างผลึก Ge มีอะตอมของสิ่งเจือปนกลุ่ม V แทรก.....	13
	(ข) ระดับพลังงานของสิ่งเจือปนผู้ให้	
2.7	(ก) โครงสร้างผลึก Ge มีอะตอมของสิ่งเจือปนกลุ่ม III แทรก.....	14
	(ข) ระดับพลังงานของสิ่งเจือปนผู้รับ	
3.1	แสดง เฟสไดอะแกรม ซึ่งคู่เปรียบเทียบของสารประกอบ $CuInSe_2$ .....	16
4.1	แสดง ไดอะแกรมแถบพลังงาน ความหนาแน่นสถานะ การกระจาย- ของฟังก์ชันเฟอร์มี-ไดแรก และความหนาแน่นพาหะอิสระ ตามลำดับ....	27
	(ก) สารกึ่งตัวนำชนิดอินทรีนสิก	
	(ข) สารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น	
	(ค) สารกึ่งตัวนำชนิดพี	
4.2	แสดงทิศทางการย้ายสถานะพลังงานของอิเล็กตรอนในสารกึ่งตัวนำที่มี สิ่งเจือปนทั้งชนิดผู้ให้และผู้รับ.....	36
4.3	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นของอิเล็กตรอนกับส่วนกลับ ของอุณหภูมิ.....	36
4.4	แสดงตำแหน่งของข้อสัมผัสตามวิธีวัดด้วยขั้วปลายแหลมสี่ขั้วในแนวเส้นตรง..	40
4.5	(ก) แสดงตำแหน่งของจุดสัมผัสบนชิ้นสารตัวอย่าง.....	42
	(ข) การเพิ่มความยาวของเส้นรอบรูป	



## สารบัญรูป (ต่อ)

รูป	หน้า
4.6 แสดงแพดเตอร์ค่าแก้มของการวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าด้วยวิธีของ แวนเดอเพาว์.....	43
5.1 แสดงขบวนการรวมตัว 4 ขบวนการ ของระดับพลังงานเซมิคอนดักเตอร์เดี่ยว.....	49
(ก) ก่อนมีการรวมตัว	
(ข) หลังการรวมตัว	
5.2 แสดงรอยต่อพี-เอ็น.....	50
5.3 (ก) abrupt junction มีการกระจายของผู้รับที่ไอออนในช่องทางด้านพี และผู้ให้ที่ไอออนในช่องทางด้านเอ็น สม่่าเสมอที่รอยต่อ.....	51
(ข) graded junction มีการกระจายของผู้รับที่ไอออนในช่องทางด้านพี และผู้ให้ที่ไอออนในช่องทางด้านเอ็นแบบเชิงเส้นกับระยะทางที่บริเวณรอยต่อ	
5.4 (ก) แสดงการกระจายของ space-charge ในสมมติความร้อนเส้นประ แสดงหางของการกระจายของพาหะข้างมาก.....	52
(ข) แสดงการกระจายของสนามไฟฟ้า	
(ค) แสดงการแปรผันของศักย์ไฟฟ้ากับระยะทาง	
(ง) แสดง ไดอะแกรมของแถบพลังงาน	
5.5 แสดงการกระจายของศักย์ไฟฟ้าบริเวณรอยต่อ.....	55
(ก) เมื่อมีการ ไบอัสตรง	
(ข) เมื่อมีการ ไบอัสกลับทาง	
5.6 (ก) แสดงบริเวณดีพลีชันของรอยต่อพี-เอ็น.....	56
(ข) บริเวณดีพลีชันโดยคิดเสมือนเป็นแผ่นขนานเก็บประจุ	
5.7 กราฟแสดงลักษณะสอกระแส-ศักย์ไฟฟ้า อุดมคติ.....	61
(ก) Linear plot	
(ข) Semilog plot	

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.8 กราฟแสดงลักษณะสอกระแส-ศักย์ไฟฟ้าของ ไดโอดที่ทำจาก Si.....	62
(a) Generation-recombination current region	
(b) Diffusion current region	
(c) High-injection region	
(d) Series resistance effect	
(e) Reverse leakage current due to generation-recombination and surface effect	
6.1 เตาหลอมโซลิดเต็ยพร้อมทั้ง เครื่องควบคุมอุณหภูมิและวงจรไฟฟ้า กึ่งกลศาสตร์ เพื่อควบคุมอัตราการเพิ่มและลดอุณหภูมิ.....	67
6.2 แสดงโบรไฟล์ของอุณหภูมิภายในเตา โดยตั้งอุณหภูมิกึ่งกลางเตาให้เป็น 1200 °C, 1100 °C, 1000 °C, 900 °C ตามลำดับ.....	67
6.3 แสดงผิวหน้าของผลึกกึ่งตัวนำ CuInSe <sub>2</sub> ที่เกิดจากการซ้อนกันของ ระนาบเล็ก ๆ.....	72
6.4 แสดงชั้นผลึกกึ่งตัวนำ CuInSe <sub>2</sub> ที่ตัดเป็นชิ้นบาง ๆ.....	72
6.5 แสดงการตรวจสอบชนิดการนำไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำ โดยวิธีชั่วคราวร้อน...	73
6.6 กราฟแสดงค่า R <sub>MN,PO</sub> กับ R <sub>NO,MP</sub> ของสารตัวอย่าง A1 (ความหนา 0.06 mm).....	75
6.7 แสดงหลักการของการถ่ายภาพสะท้อนกลับโดยวิธีของ เลอาอี.....	77
6.8 ภาพถ่ายแสดงการถ่ายภาพสะท้อนกลับ.....	78
6.9 แสดงแพทเทิร์นของระนาบที่สะท้อนรังสีเอ็กซ์ของ CuInSe <sub>2</sub> .....	78
6.10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิที่แอนนีลกับสภาพต้านทานไฟฟ้า.....	81
6.11 แสดงชั้นสารที่วางอยู่บนแผ่นรองและมีการเชื่อมต่อรอยต่อจุดใหญ่และจุดเล็ก..	84
6.12 แสดงวงจรเพื่อวัดค่ากระแสกับความต่างศักย์.....	85
6.13 แสดงค่ากระแสกับความต่างศักย์ของรอยต่อ.....	87
6.14 แสดงการหาค่าพลังงาน ไอออไนซ์ของระดับพลังงานสิ่งเจือปนของ CuInSe <sub>2</sub> จากกราฟระหว่างส่วนกลับของความต้านทานของชั้นสารกับส่วนกลับของอุณหภูมิ. 88	88

(Cat. by ..... Date ..... Input by .....)

CU : THES DATA BASE - INSIS INPUT WORKSHEET

ISIS no. ....

016	Accession no. 014444
020	ISBN. a 074-569-457-6
100	Author. a กัญญา เขียวประเสริฐศักดิ์ d 2502 -
245	Title. a การศึกษาของต่อแบบมี - อินเทอร์เน็ตของคอมพิวเตอร์อินเดียนาโอซิลินด์ c กัญญา เขียวประเสริฐศักดิ์
280	Publication area. c 2531
300	Physical description area. a [19], 119 แผ่น b ภาพประกอบ, แผนภูมิ
500	General note. a พิมพ์ดีด (ถ่ายสำเนา)
502	Dessertation note. a วิทยานิพนธ์ (ว.ศ.) -- จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2531
600	Pers name descriptor
610	Corp name descriptor
630	Unif tif descriptor



645 2Tit descriptor.....  
.....  
.....

650 Theasaurus descriptor.....  
.....  
.....  
.....  
.....  
.....  
.....  
.....

851 Geographic descriptor.....  
.....  
.....  
.....

710 Coporate name added entry.....<sup>๖๓๓๓๓๓๓๓</sup>  
.....  
.....  
.....  
.....  
.....  
.....  
.....  
.....

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
6.15 แสดงขึ้นสารที่วางอยู่บนแผ่นรองและทำรอยต่อ โอมหุ้มแล้ว.....	90
6.16 กราฟแสดงการ ไบัสตรงและ ไบัสกลับทางของขึ้นสารที่แอนนีส 10 นาที.. ( For: $I = .5\text{mA/Div.}; V = .5\text{V/Div.}; \text{Re: } I = .5\text{mA/Div.}; V = 5\text{V/Div.}$ )	91
6.17 กราฟแสดงการ ไบัสตรงและ ไบัสกลับทางของขึ้นสารที่แอนนีส 15 นาที..	91
( For: $I = .5\text{mA/Div.}; V = .2\text{V/Div.}; \text{Re: } I = .5\text{mA/Div.}; V = 5\text{V/Div.}$ )	
6.18 กราฟแสดงการ ไบัสตรงหลายระดับขนาดของกระแสไฟฟ้าของขึ้นสาร ที่แอนนีส 10 นาที.....	92
6.19 กราฟแสดงการ ไบัสตรงหลายระดับขนาดของกระแสไฟฟ้าของขึ้นสาร ที่แอนนีส 15 นาที.....	94
6.20 แสดงการหาค่าแพดเดอร์อุดมคติจากกราฟระหว่างกระแส-ความต่างศักย์ ของรอยต่อของขึ้นสารที่แอนนีส 10 นาที.....	96
6.21 แสดงการหาค่าแพดเดอร์อุดมคติจากกราฟระหว่างกระแส-ความต่างศักย์ ของรอยต่อของขึ้นสารที่แอนนีส 15 นาที.....	97
6.22 แสดงวงจรเพื่อวัดค่าความจุ-ความต่างศักย์ (C-V).....	99
6.23 กราฟแสดงค่าความจุ(C) กับศักย์ไฟฟ้าที่ไบัสกลับทาง ( $V_R$ ) แก่รอยต่อของขึ้นสารที่แอนนีส 10 นาที.....	100
6.24 กราฟแสดงค่าความจุ(C) กับศักย์ไฟฟ้าที่ไบัสกลับทาง ( $V_R$ ) แก่รอยต่อของขึ้นสารที่แอนนีส 15 นาที.....	100
6.25 กราฟแสดงความเข้มข้นของสารเจือ ( $N_A$ ) กับระยะห่างจากรอยต่อ ของขึ้นสารที่แอนนีส 10 นาที.....	101
6.26 กราฟแสดงความเข้มข้นของสารเจือ ( $N_A$ ) กับระยะห่างจากรอยต่อ ของขึ้นสารที่แอนนีส 15 นาที.....	101