4

การศึกษารอยต่อแบบโลหะ-ฉนวน-สารกึ่งตัวนำของคอปเปอร์อินเดียมไดซีลีไนด์

นางสาว งามนิตย์ วงษ์เจริญ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
ภาควิชาฟิสิกส์
บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
พ.ศ. 2531

ISBN 974-569-481-1

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

014459
I17503018

A Study of Metal - Insulator - Semiconductor Junction of Copper Indium Diselenide

Miss Ngamnit Wongjaroen

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Science
Department of Physics
Graduate Sohool
Chulalongkorn University
1988

ISBN 974-569-481-1

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การศึกษารอยต่อแบบโลหะ-ฉนวน-สารกึ่งตัวนำของคอปเปอร์อินเดียมไดซีลีไนด์
โดย	นางสาวงามนิตย์ วงษ์เจริญ
ภาควิชา	ฟิสิกส์
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ สมพงศ์ ฉัตราภรณ์ อาจารย์ ดร. ขจรยศ อยู่ดี

หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

.....คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย
(ศาสตราจารย์ ดร. ถาวร วัชราภัย)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร. วิจิตร เส็งทะพันธุ์)

.....กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร. ภิยโย ปันยารชุน)

.....กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ กิรณันต์ รัตนธรรมพันธ์)

.....กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ สมพงศ์ ฉัตราภรณ์)

.....กรรมการ
(อาจารย์ ดร. ขจรยศ อยู่ดี)

พิมพ์ต้นฉบับบทคัดย่อวิทยานิพนธ์ภายในกรอบสีเขียวนี้เพียงแผ่นเดียว

หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

งามนิตย์ วงษ์เจริญ : การศึกษารอยต่อแบบโลหะ-ฉนวน-สารกึ่งตัวนำของคอปเปอร์อินเดียมไดซีลีไนด์ (A STUDY OF METAL-INSULATOR-SEMICONDUCTOR JUNCTION OF COPPER INDIUM DISELENIDE) อ. ที่ปรึกษา : ผศ.สมพงศ์ ฉัตราภรณ์ และ อ.ดร. ขจรยศ อยู่ดี, 207 หน้า.

งานวิจัยนี้เป็นการวัดความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุ-ความต่างศักย์ที่ความถี่สูงเท่ากับ 1 MHz ณ อุณหภูมิห้องของรอยต่อแบบ MIS ที่ใช้ฐานรองเป็นสารกึ่งตัวนำ $CuInSe_2$ ตัวเก็บประจุ MIS มีลักษณะโครงสร้างไม่ซับซ้อน ประกอบด้วยฉนวนชั้นบาง ๆ เคลือบอยู่บนผิวหน้าสารกึ่งตัวนำ ซึ่งเคลือบโดยการจุ่มสารกึ่งตัวนำลงไปในสารละลายที่เป็นส่วนผสมของน้ำยาไวแสงกับทินเนอร์ในอัตราส่วน 1:20 ส่วนขั้วโลหะเหลวนั้นจะทำโดยการนำโลหะเหลวที่เป็นของผสมคือ In-Ga หรือ In-Hg ป้ายลงบนผิวหน้าของชั้นฉนวน จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุ-ความต่างศักย์ที่วัดได้สามารถนำมาคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่สำคัญตรงบริเวณใกล้ ๆ ผิวรอยต่อของสารกึ่งตัวนำที่ใช้เป็นฐานรองได้ เช่นชนิดการนำไฟฟ้าและความหนาแน่นของพาหะสุทธิ เป็นต้น

ผลึกกึ่งตัวนำ $CuInSe_2$ ซึ่งประกอบด้วยธาตุ Cu, In, Se ที่มีสัดส่วนตามสตอยคิโอเมตริและที่เพิ่มปริมาณธาตุ Cu หรือ In หรือ Se อย่างใดอย่างหนึ่งให้มากกว่าสัดส่วนตามสตอยคิโอเมตริเท่ากับ 0.3% ที่นำมาใช้ในการทดลองนี้เตรียมได้จากสภาวะหลอมเหลวแบบไบรดจ์แมนฟรีซซิ่งด้วยวิธีลดอุณหภูมิเตาในแนวเฉียง 5 องศากับแนวราบ ผลึกเอกพันธ์ที่เตรียมได้สามารถตัดมาใช้งานได้ในระดับขนาด 5 x 8 x 1 $mm.^3$ มีชนิดการนำไฟฟ้าเป็นได้ทั้งชนิดพีหรือชนิดเอ็นอย่างใดอย่างหนึ่ง สภาพต้านทานไฟฟ้าค่อนข้างต่ำคือมีค่าอยู่ในช่วง 2.0 - 6.0 Ω-cm. เมื่อทำรอยต่อแบบโอห์มมิกระหว่างการนำไฟฟ้า (silver paint) กับสารกึ่งตัวนำ $CuInSe_2$ ทั้งชนิดพีและชนิดเอ็น พบว่าเป็นรอยต่อแบบโอห์มมิกที่ดีใช้ได้กับความหนาแน่นของกระแสสูงถึง 0.2 $A/cm.^2$ ที่อุณหภูมิห้อง จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุ-ความต่างศักย์ที่วัดได้สามารถหาค่าความหนาแน่นพาหะสุทธิที่บริเวณใกล้ ๆ ผิวรอยต่อของสารกึ่งตัวนำ $CuInSe_2$ ทั้งชนิดพีและชนิดเอ็นได้เท่ากับ 1.1×10^{16} - 2.2×10^{16} $cm.^{-3}$ ในการทดสอบการทำงานของระบบการวัดกราฟความสัมพันธ์นี้กระทำโดยการตรวจวัดตัวอย่างมาตรฐาน (ตัวเก็บประจุ MIS ที่มีฐานรองเป็นสารกึ่งตัวนำ GaAs ชนิดเอ็นที่เตรียมขึ้นด้วยวิธีการเช่นเดียวกัน) พบว่าค่าที่วัดได้มีค่าใกล้เคียงกับข้อมูลของตัวอย่างมาตรฐาน

ภาควิชา ฟิสิกส์ ลายมือชื่อนิสิต .....

สาขาวิชา ฟิสิกส์

ปีการศึกษา 2531 ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา .....

พิมพ์ต้นฉบับบทคัดย่อวิทยานิพนธ์ภายในกรอบสีเขียวนี้เพียงแผ่นเดียว

หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

NGAMNIT WONGJAROEN : A STUDY OF METAL-INSULATOR-SEMICONDUCTOR JUNCTION OF COPPER INDIUM DISELENIDE. THESIS ADVISOR : ASST. PROF. SOMPHONG CHATRAPHORN AND KAJORNYOD YOODEE, Ph.D. 207 pp.

In this research, we measured room temperature capacitance-voltage relation at 1 MHz of MIS junction fabricated from $CuInSe_2$ substrates. The MIS capacitors' structure is relatively simple. A thin layer of insulator film is deposited on to the semiconductor surface by dipping the sample into a dilute photoresist mixture (1:20). A liquid metal electrode is then pasted on top of the insulating film. The liquid metals used in this experiment are In-Ga and In-Hg. From the C-V curves, some important parameters of the substrate material near the interface can be derived. These include conductivity type and net carrier concentration.

$CuInSe_2$ single crystals investigated in this experiment were grown by directional freezing method via temperature gradient freezing in a 5 degree tilted-furnace. $CuInSe_2$ sample with stoichiometric proportion, 0.3%at excess Cu, 0.3 % at excess In and 0.3 % at excess Se were prepared. Single grain crystal of up to 5 x 8 x 1 mm^3 can be cut from the obtained ingots. The conductivity types are either p-type or n-type with low resistivity values in the range 2.0 - 6.0 Ω-cm. The contact of silver paint on both types of as-grown $CuInSe_2$ gave good ohmic contact. I-V characteristic using curve tracer meter showed no sign of blocking at current density of approximately 0.2 A/cm^2 at room temperature. From capacitance-voltage curve; the net carrier concentration in both types of $CuInSe_2$ semiconductor region near the surface were in the range 1.1×10^{16} - 2.2×10^{16} cm^{-3}. The capacitance-voltage system was tested by standard samples (MIS capacitors, n-type GaAs substrates prepared by the same method.). Results of the measurement and the known parameters are in good agreement.

ภาควิชา Physics

สาขาวิชา Physics

ปีการศึกษา 2531

ลายมือชื่อนิสิต .....

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา .....

หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยความกรุณาของผู้ช่วยศาสตราจารย์สมพงศ์ ฉัตราภรณ์ อาจารย์ ดร. ชจรยศ อยู่ดี ที่ให้คำแนะนำควบคุมการวิจัยตลอดมา ทั้งยังได้รับการเอื้ออำนวยความสะดวกเกี่ยวกับหนังสือและเอกสารทางด้านฟิสิกส์สารกึ่งตัวนำจากศาสตราจารย์ ดร. วิรุฬห์ สายคณิต รองศาสตราจารย์จงอร พีรานนท์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์กิรณัน์ รัตนธรรมพันธ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วิชิต ศรีตระกูล คณะผู้วิจัยฟิสิกส์สารกึ่งตัวนำภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ขอขอบคุณดร. วิโรจน์ ตันตราภรณ์ อาจารย์ชนะ ผิวล่อง ที่ได้มอบอุปกรณ์การทดลองจำนวนหนึ่ง รวมทั้งเอกสารสำหรับใช้ในการวิจัย

ขอขอบคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วุทธิพันธุ์ ปรัชญพฤทธ์ อาจารย์รังสรรค์ เฉลิมศรี อาจารย์ฐิตินัย แก้วแดง ที่กรุณาให้คำแนะนำเกี่ยวกับหนังสือและเอกสารรวมทั้งให้กำลังใจสนับสนุนเป็นอย่างดียิ่งในระหว่างการศึกษาและการทำวิทยานิพนธ์

ขอขอบคุณ อาจารย์นพปฏล สุทธิศิริ คุณโอฬาร บัวผ่อง และคุณดุษฎี แสงผัด ที่ช่วยแนะนำ วิธีการใช้เครื่องมือ ช่วยสร้างเตาหลอมสารที่ใช้อุณหภูมิสูงออกแบบปรับปรุงเครื่องตัดสตริงซอ และเครื่องขัดผิวหน้าชิ้นผลึกเพื่อการวิจัยครั้งนี้รวมทั้ง คุณวิชิต ศิริโชติ ที่ช่วยให้คำแนะนำ วิธีการใช้เครื่องมือและออกแบบสร้างส่วนอินเตอร์เฟส สำหรับใช้ในการวิจัยตลอดจน คุณธนากร โอสถจันทร์ คุณพงษ์ ทรงพงษ์ คุณธนา สุทธิโอภาส ที่ช่วยแนะนำเกี่ยวกับวิธีการใช้เครื่องมือตลอดมา

ขอขอบคุณ รองศาสตราจารย์ ดร. วิจิตร เส็งทะพันธุ์ และ ทบวงมหาวิทยาลัย ซึ่งได้สนับสนุนให้คำรับรอง และ พิจารณาให้ทุนในโครงการผลิตและพัฒนาอาจารย์แก่ผู้เขียนในการศึกษาระดับปริญญามหาบัณฑิต

ท้ายที่สุดของกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา นายแพทย์สถาพร วงษ์เจริญ นายแพทย์เนิ่มพูน วงษ์เจริญ อาจารย์ทิพรัตน์ วงษ์เจริญ ที่ให้ความอนุเคราะห์เกี่ยวกับค่าใช้จ่าย และสนับสนุนเป็นกำลังใจอย่างใกล้ชิด แก่ผู้เขียนมาตลอดจนกระทั่งสำเร็จการศึกษา

หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย..... ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ..... จ
กิตติกรรมประกาศ..... ฉ
สารบัญตาราง..... ญ
สารบัญรูป..... ฎ
บทที่ 1 บทนำ..... 1
บทที่ 2 สารกึ่งตัวนำ..... 5
2.1 ชนิดของสารกึ่งตัวนำ..... 8
2.1.1 สารกึ่งตัวนำที่เป็นธาตุเดี่ยว..... 9
2.1.2 สารกึ่งตัวนำที่เป็นสารประกอบเชิงคู่..... 10
2.1.3 สารกึ่งตัวนำที่เป็นสารประกอบเชิงสาม..... 11
2.1.4 โลหะผสมกึ่งตัวนำ..... 11
2.2 โครงสร้างของสารกึ่งตัวนำ..... 12
2.2.1 โครงสร้างแบบเพชร..... 12
2.2.2 โครงสร้างแบบสฟาเลอร์ไรท์หรือซิงค์เบลนด์..... 13
2.3.3 โครงสร้างแบบซาลโคไพไรท์..... 15
บทที่ 3 การเตรียมผลึกกึ่งตัวนำจากสภาวะหลอมเหลว..... 19
3.1 เฟสไดอะแกรม..... 19
3.2 การเตรียมผลึกในระบบปิดแบบไดเรกชันนัล ฟรีซชิง..... 21
3.3 ข้อควรระมัดระวังในการเตรียมผลึกกึ่งตัวนำ..... 24
3.4 การเปลี่ยนแปลงและควบคุมชนิดการนำไฟฟ้า..... 27
บทที่ 4 รอยต่อแบบโอห์มมิก..... 32
4.1 สาเหตุการเกิดกำแพงศักย์..... 32
4.1.1 กำแพงศักย์เกิดจากความไม่สอดคล้องของเวิร์กฟังค์ชันของโลหะกับสารกึ่งตัวนำ..... 32
4.1.2 กำแพงศักย์เกิดจากสถานะผิวของสารกึ่งตัวนำ..... 37
4.1.3 กำแพงศักย์เกิดจากชั้นบางๆของสารอื่นที่ผิวของสารกึ่งตัวนำ... 38
4.2 รอยต่อแบบโอห์มมิก..... 38
4.3 วิธีควรทำเมื่อต้องการรอยต่อแบบโอห์มมิก..... 39

สารบัญ(ต่อ)

หน้า

บทที่ 5 สมบัติเชิงไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำ..... 43
5.1 ความไม่สมบูรณ์ของผลึก..... 44
5.1.1 ความไม่สมบูรณ์ของผลึกในศูนย์มิติ..... 44
5.1.2 ความไม่สมบูรณ์ของผลึกในหนึ่งมิติ..... 46
5.1.3 ความไม่สมบูรณ์ของผลึกในสองมิติ..... 47
5.2 พาหะข้างมากและพาหะข้างน้อย..... 50
5.3 สภาพนำไฟฟ้าและสภาพเคลื่อนได้..... 54
5.4 การวัดสภาพต้านทานไฟฟ้า..... 56
บทที่ 6 รอยต่อแบบโลหะ-ฉนวน-สารกึ่งตัวนำ..... 62
6.1 ตัวเก็บประจุแบบ MIS เชิงอุดมคติ..... 63
6.1.1 การกระจายประจุในสารกึ่งตัวนำที่บริเวณรอยต่อกับฉนวน..... 69
6.1.2 การประมาณค่าตัวแปรเฉพาะในช่วงดีพลีชัน..... 75
6.1.3 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุ-ความต่างศักย์ของรอยต่อแบบ MIS เชิงอุดมคติ..... 82
6.2 ลักษณะล่อของโครงสร้างแบบ MIS ที่เบี่ยงเบนไปจากกรณีอุดมคติ..... 96
6.2.1 ค่าเวิร์กฟังค์ชันของโลหะกับสารกึ่งตัวนำไม่เท่ากัน..... 96
6.2.2 ประจุในชั้นฉนวน.....101
6.2.2.1 กับดักประจุที่รอยต่อ.....101
6.2.2.2 กับดักประจุในฉนวน.....106
6.2.2.3 ประจุในฉนวนที่อยู่กับที่.....106
6.2.2.4 ประจุในฉนวนที่เคลื่อนที่ได้.....107
6.2.3 กับดักประจุภายในเนื้อสารกึ่งตัวนำ.....114
6.2.4 อิทธิพลภายนอก.....114
6.2.4.1 การฉายแสงแก่ตัวเก็บประจุแบบ MIS ขณะไบอัสความต่างศักย์คงที่ค่าหนึ่ง.....115
6.2.4.2 การฉายแสงแก่ตัวเก็บประจุแบบ MIS ขณะเพิ่มความต่างศักย์ที่ใช้ไบอัสตัวเก็บประจุ.....115
6.2.4.3 การฉายรังสีแก่ตัวเก็บประจุแบบMIS.....116
6.2.4.4 การไบอัสความต่างศักย์จนถึงสภาวะพังทลายแก่ตัวเก็บประจุแบบ MIS.....117

สารบัญ(ต่อ)

หน้า

6.2.4.5 ผลของอุณหภูมิต่อกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุ-ความต่างศักย์ของตัวเก็บประจุแบบ MIS.....117
บทที่ 7 วิธีทดลองและผลการทดลอง.....119
7.1 การเตรียมผลึก.....120
7.1.1 ส่วนประกอบของระบบเตาในแนวเฉียง 5 องศากับแนวราบ...120
7.1.2 การเตรียมหลอดแก้วควอทซ์เพื่อบรรจุสาร.....123
7.1.2.1 ขั้นตอนการทำความสะอาดหลอดแก้วควอทซ์ก่อนนำไปบรรจุธาตุ.....124
7.1.3 การชั่งและบรรจุธาตุลงในหลอดแก้วควอทซ์.....125
7.1.3.1 การหลอมปิดหลอดแก้วควอทซ์.....126
7.1.4 ขั้นตอนและรายละเอียดในการเตรียมผลึกกึ่งตัวนำ $CuInSe_2$ ด้วยวิธีลดอุณหภูมิเตาในแนวเฉียง 5 องศากับแนวราบ.....128
7.1.5 ลักษณะของผลึกกึ่งตัวนำ $CuInSe_2$ ที่เตรียมได้ด้วยวิธีลดอุณหภูมิเตาในแนวเฉียง 5 องศากับแนวราบ.....129
7.1.6 การตัดผลึกด้วยเครื่องตัดสตริงซอ.....132
7.1.7 ขั้นตอนการขัดแผ่นชิ้นสารกึ่งตัวนำ $CuInSe_2$.....133
7.1.8 การกัดผิวหน้าชิ้นผลึกด้วยสารละลายเคมี.....134
7.2 การตรวจสอบชนิดของสารกึ่งตัวนำโดยวิธีชั่วความร้อน.....138
7.3 การตรวจสอบรอยต่อแบบโอห์มมิก.....139
7.4 การวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าโดยวิธีแวนเดอร์เพาว์และคำนวณหาค่าสภาพนำไฟฟ้าเนื่องจากอิเล็กตรอนและโฮล.....145
7.5 วิธีการเตรียมและการศึกษารอยต่อแบบ MIS ของสารกึ่งตัวนำ $CuInSe_2$ และ GaAs โดยการวัดความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุ-ความต่างศักย์ของรอยต่อนี้ที่อุณหภูมิห้อง.....150
บทที่ 8 สรุปและวิจารณ์ผลการทดลอง.....174
เอกสารอ้างอิง.....183
ภาคผนวก.....190
ประวัติผู้เขียน.....207

หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญตาราง

ตารางที่ หน้า

3.1 แสดงชนิดการนำไฟฟ้าของ $CuInSe_2$ ที่เกิดจากชนิดของข้อบกพร่องของผลึก ซึ่งเป็นกรณีที่ AX น้อยกว่าศูนย์..... 30

3.2 แสดงขนาดของพลังงานที่ทำให้เกิดข้อบกพร่องชนิดต่าง ๆ ของผลึก $CuInSe_2$..... 31

3.3 แสดงค่าของระดับพลังงานผู้ให้และผู้รับของ $CuInSe_2$ ซึ่งเกิดจากข้อบกพร่องของผลึกแบบต่าง ๆ 31

5.1 แสดงค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าที่วัดโดยวิธีแวนเดอเพาว์ (ρ) , ค่าสภาพนำไฟฟ้า (σ) และค่าสภาพเคลื่อนได้ (μ) ที่คำนวณจากค่าสภาพต้านทานไฟฟ้า ที่วัดโดยวิธีแวนเดอเพาว์..... 61

7.1 แสดงน้ำหนักของธาตุต่าง ๆ ที่คำนวณได้และพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับการหลอมสารกึ่งตัวนำ $CuInSe_2$ จำนวน 15 กรัม ที่มีสัดส่วนตามสตอยดิโอเมตตริ.....125

7.2 แสดงน้ำหนักของธาตุต่าง ๆ ที่คำนวณได้ของสารกึ่งตัวนำ $CuInSe_2$ จำนวน 15 กรัมที่มีสัดส่วนของธาตุ Cu, In, Se, อย่างใดอย่างหนึ่งตามสตอยดิโอเมตตริ และมากกว่าสัดส่วนตามสตอยดิโอเมตตริ 0.3% ตามลำดับ.....126

7.3 แสดงผลการศึกษารอยต่อแบบโอห์มมิกระหว่างโลหะ In และกาวนำไฟฟ้ากับสารกึ่งตัวนำ $CuInSe_2$ กรณีต่าง ๆ และ GaAs ที่อุณหภูมิห้อง (300K) 144

7.4 แสดงค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าที่วัดโดยวิธีแวนเดอเพาว์ที่อุณหภูมิห้อง (300K) และค่าสภาพนำไฟฟ้าเนื่องจากอิเล็กตรอนและโฮลของชิ้นสารกึ่งตัวนำ $CuInSe_2$ และ GaAs.....149

7.5 แสดงผลการคำนวณค่าพารามิเตอร์ต่างๆของตัวเก็บประจุแบบ MIS ของสารกึ่งตัวนำ $CuInSe_2$ ที่เตรียมได้และของสารกึ่งตัวนำ GaAs ที่ทำการทดลอง ณ อุณหภูมิห้อง (300K).....160

หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญรูป

รูปที่ หน้า

2.1 แสดงค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าที่แตกต่างกันของสารกึ่งตัวนำและฉนวน..... 5

2.2 แสดงแถบพลังงานที่อนุญาตให้อิเล็กตรอนมีค่าได้ของแลททิส ที่มีลักษณะเป็นคาบ..... 7

2.3 แสดงพันธะสี่หน้า..... 9

2.4 แสดง ก. การจัดเรียงตัวของอะตอมในโครงสร้างผลึกแบบเพชร
ข. ส่วนหนึ่งของรูป 2.4 ก. ซึ่งมีการยึดกันระหว่างอะตอมแบบพันธะสี่หน้า..... 13

2.5 แสดงโครงสร้างผลึกแบบซิงค์เบลนด์..... 14

2.6 แสดงโครงสร้างผลึกแบบชาลโคไพไรท์ (กลุ่ม $I-III-VI_2$)..... 18

3.1 แสดงเฟสไดอะแกรมของสารประกอบ Cu-In-Se..... 20

3.2 แสดงลักษณะของภาชนะที่ใช้เตรียมผลึกจากสภาวะหลอมเหลว..... 21

3.3 แสดงโปรไฟล์ของอุณหภูมิภายในเตาโซนเดี่ยว..... 23

3.4 แสดงความไม่สมบูรณ์ของผลึกที่มีรอยแยก (cracks) มีช่องว่าง (voids) และ ทวิน (twins) ของผลึก $CuInSe_2$ ที่เตรียมโดยวิธีลดอุณหภูมิ..... 24

4.1 แสดงการเกิดกำแพงศักย์เนื่องจากโลหะกับสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นเมื่อ $\phi_m > \phi_s$ และกำแพงศักย์ที่ปรากฏ ณ รอยต่อระหว่างโลหะกับสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น มีค่าเท่ากับ $(\phi_m - \chi_s)$..... 34

4.2 แสดงรอยต่อแบบโอห์มมิกในสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น เมื่อ $\phi_m < \phi_s$..... 36

4.3 แสดงการเกิดกำแพงศักย์ในสารกึ่งตัวนำชนิดพี เมื่อ $\phi_m < \phi_s$..... 36

4.4 แสดงรอยต่อแบบโอห์มมิกในสารกึ่งตัวนำชนิดพี เมื่อ $\phi_m > \phi_s$..... 37

4.5 แสดงการโค้งของแถบพลังงานในสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น เนื่องจากสถานะผิว E_A ที่เสมือนผู้รับ..... 37

4.6 แสดงการโค้งของแถบพลังงานในสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น เนื่องจากสถานะผิว E_D ที่เสมือนผู้ให้..... 38

4.7 แสดงกลไก (mechanism) การเกิดรอยต่อแบบโอห์มมิก
ก. รอยต่อที่กำแพงศักย์มีค่าต่ำ
ข. รอยต่อที่เกิดจากการโด๊ปมาก ๆ ด้วยโลหะที่ใช้ทำขั้วไฟฟ้า
ค. รอยต่อที่มีศูนย์กลางการรวมตัวระหว่างอิเล็กตรอนกับโฮล..... 41

5.1 แสดงลักษณะผลึกใน 2 มิติ ที่มีความไม่สมบูรณ์ในลักษณะเป็นจุด..... 45

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่ หน้า

5.2 แสดงลักษณะผลึกแบบไอออนิกใน 2 มิติที่มีความไม่สมบูรณ์ในลักษณะจุดโดยที่ ● แทนไอออนบวก ⊕ แทนไอออนลบ..... 46

5.3 ก. แสดงความไม่สมบูรณ์ของผลึกในลักษณะเป็นเส้นในแบบการเคลื่อนที่ของขอบ

ข. แสดงความไม่สมบูรณ์ของผลึกในลักษณะเป็นเส้นในแบบการเคลื่อนที่แบบสกรู..... 47

5.4 ภาพแสดงความไม่สมบูรณ์ของผิวหน้าผลึก ซึ่งแสดงให้เห็นเกรนบาวน์ดารีและทิศทางการเลื่อนไปของเกรนบาวน์ดารี 48

5.5 ก. แสดงระนาบทวินและทิศทางของทวินในเฟสเซ็นเตอร์คิวบิก แลททิส

ข. แสดงขบวนการการเกิดทวินในระนาบ (100) ในเฟสเซ็นเตอร์คิวบิก แลททิส..... 49

5.6 แสดงภาพถ่ายของโลหะผสม 70% Cu, 30% Zn แสดงให้เห็นแถบของการเกิดทวินในเกรนของผลึก..... 50

5.7 ก. แสดงระดับพลังงานของสารอสุทธิแบบเอ็น ซึ่งระดับพลังงานจะอยู่ต่ำกว่าแถบนำ

ข. แสดงระดับพลังงานของสารอสุทธิแบบพีซึ่งมีระดับพลังงานเหนือแถบวาเลนซ์..... 52

5.8 แสดงการปรากฏแถบสารอสุทธินทรกอยู่ระหว่างแถบนำและแถบวาเลนซ์.. 53

5.9 ก. แสดงแถบอสุทธิเคลื่อนทับแถบนำ ข.แสดงการเกิดหางขั้นที่แถบนำ.. 53

5.10 ก. แสดงตำแหน่งของจุดสัมผัสบนชิ้นสารตัวอย่าง

ข. การเพิ่มความยาวของเส้นรอบรูปเพื่อลดความคลาดเคลื่อนในการวัด..... 58

5.11 แสดงแฟคเตอร์ค่าแก้ของการวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าด้วยวิธีแวนเดอร์เพาว์..... 60

6.1 แสดงลักษณะโครงสร้างของตัวเก็บประจุแบบ MIS เมื่อ d คือความหนาของฉนวนและ V คือความต่างศักย์ที่ใช้ไบอัสให้กับรอยต่อ... 64

6.2 แสดงลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานของรอยต่อแบบ MIS เชิงอุดมคติ... 64

6.3 แสดงแผนภาพลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานของตัวเก็บประจุแบบ MIS เชิงอุดมคติเมื่อมีการไบอัสเพื่อให้เกิด ก. ช่วงชุมนุมพาหะ

ข. ช่วงดีพลีชัน ค. ช่วงกลับกลาย..... 67

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่ หน้า

6.4 แสดงแผนภาพความหนาแน่นของประจุที่ตำแหน่งต่างๆของ MIS ชนิดพี เชิงอุดมคติเมื่อไบอัสให้เกิดกรณี ก. ช่วงสุมนุมพาหะ ข. ช่วงดีพลีชัน ค. ช่วงกลับกลาย..... 68

6.5 แสดงแผนภาพของแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำชนิดพีซึ่งแสดงให้เห็นชั้นดีพลีชัน และชั้นกลับกลายที่เกิดขึ้นเมื่อ $\psi_B > \psi_s > 0$ และเมื่อ $\psi_B > \psi_s$ ตามลำดับ..... 69

6.6 แสดงความหนาแน่นของประจุ Q_s ที่ขึ้นกับค่าศักย์ไฟฟ้าที่ผิวหน้า (ψ_s) ของสารกึ่งตัวนำชนิดพีซึ่งมีค่า $N_A = 4 \times 10^{15} cm.^{-3}$ ที่อุณหภูมิห้อง เมื่อ ψ_B เป็นค่าความต่างศักย์ระหว่างระดับพลังงานเฟอร์มิ (E_F) และระดับพลังงานเฟอร์มิชนิดอินทรินสิก (E_i) ในเนื้อสารกึ่งตัวนำ..... 74

6.7 แสดงการกระจายของประจุไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำตามการประมาณค่าตัวแปรเฉพาะในช่วงดีพลีชัน..... 75

6.8 แสดงการโค้งของแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำชนิดพีซึ่งเมื่อศักย์ไฟฟ้า ψ_s มีค่าเท่ากับ $2\psi_B$ จะเริ่มเกิดกรณีชั้นกลับกลายอย่างมากขึ้น..... 79

6.9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าช่วงดีพลีชันที่กว้างมากที่สุดกับความหนาแน่นของสารอสุทธิในสารกึ่งตัวนำ Ge, Si และ GaAs เมื่อ $\psi_s = 2\psi_B$... 81

6.10 แสดง ก. แผนภาพของโครงสร้างแถบพลังงานของรอยต่อแบบ MIS เชิงอุดมคติของสารกึ่งตัวนำชนิดพี ในกรณีเกิดชั้นกลับกลาย ข. ความหนาแน่นของประจุที่ตำแหน่งต่าง ๆ ค. และ ง. แสดงสนามไฟฟ้า และศักย์ไฟฟ้าที่ตำแหน่งต่าง ๆ..... 84

6.11 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุ-ความต่างศักย์ ก. ที่ความถี่สูง ข. ที่ความถี่ต่ำ ค. ในกรณีที่ช่วงดีพลีชันกว้างมากกว่าปรกติของตัวเก็บประจุแบบ MIS ของสารกึ่งตัวนำชนิดพีในเชิงอุดมคติ..... 85

6.12 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุ-ความต่างศักย์เมื่อวัดที่ความถี่สูงของตัวเก็บประจุแบบ MIS ของสารกึ่งตัวนำชนิดพี.... 86

6.13 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุ-ความต่างศักย์ของตัวเก็บประจุแบบ MIS ของสารกึ่งตัวนำชนิดพี เมื่อวัดที่ความถี่สูงส่วนของเส้นประคือเส้นที่ลากขึ้นเพื่อประมาณค่า V_T เส้น +++ แสดงค่า C_{FB} เมื่อคิดว่าความยาวเดอบาย (L_D) มีค่าน้อยมาก ๆ 89

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่ หน้า

6.14 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุ-ความต่างศักย์ที่วัดโดยใช้ความถี่สูง และความถี่ต่ำ เมื่อความหนาของชั้นฉนวนมีขนาดต่าง ๆ ของตัวเก็บประจุแบบ MIS ของสารกึ่งตัวนำชนิดพี 91

6.15 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต่างศักย์ที่ตกคร่อมช่วงดีพลีชัน (ψ_s) ในสารกึ่งตัวนำชนิดพี ความต่างศักย์ที่ใช้ไบอัสที่วัดโดยใช้ความถี่สูงหรือความถี่ต่ำ เมื่อความหนาของชั้นฉนวนมีขนาดต่าง ๆ 91

6.16 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุ-ความต่างศักย์ กรณีที่ช่วงดีพลีชันกว้างมากกว่ากรณีปรกติ เมื่อวัดโดยใช้ความถี่ต่าง ๆ และความถี่สูง 94

6.17 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุ-ความต่างศักย์ของตัวเก็บประจุแบบ MIS ของสารกึ่งตัวนำชนิดพี ก. ที่ความถี่ต่ำ ข. ที่ความถี่สูง ค. ในกรณีที่ช่วงดีพลีชันกว้างมากกว่าปรกติแสดงค่าความจุจะคงที่เมื่อไบอัสความต่างศักย์มาถึงค่าที่เริ่มเกิดสภาวะพังทลาย..... 95

6.18 แสดงความเข้มสนามไฟฟ้าตรงขอบโลหะสำหรับสารกึ่งตัวนำที่มีความหนาแน่นพาหะสุทธิน้อยและมาก 95

6.19 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราส่วนความจุทั้งหมดต่อความจุฉนวน-ความต่างศักย์ ที่ความถี่เท่ากับ 1 MHz ที่อุณหภูมิ 300 K ของตัวเก็บประจุแบบ MIS ของสารกึ่งตัวนำทั้งชนิดเอ็น และชนิดพี เมื่อมีการฉายแสงลงบนตัวเก็บประจุ 96

6.20 แสดงบริเวณรอยต่อของโลหะกับฉนวนและรอยต่อของฉนวนกับสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น..... 97

6.21 แสดงประจุที่สุมนุมอยู่ที่บริเวณผิวหน้าของสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น ที่ต่อกับฉนวน เนื่องมาจากค่า ϕ_{ms} ไม่เป็นศูนย์..... 98

6.22 แสดงค่า V_{FB} ที่ทำให้แถบพลังงานไม่โค้งในกรณีสารกึ่งตัวนำเป็นชนิดเอ็น..... 98

6.23 แสดงค่า ϕ_{ms} ที่เปลี่ยนแปลงไปตามค่าความหนาแน่นของสารอสุทธิที่ใช้โด๊ป และชนิดของโลหะ.....100

6.24 แสดงประจุชนิดต่าง ๆ ในฉนวน.....101

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่ หน้า

6.25 แสดงการเปลี่ยนแปลงของกับดักประจุที่รอยต่อ ซึ่งก่อให้เกิดการโค้งของแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำขณะยังไม่มีการไบอัสในลักษณะเสมือนเป็น ก. ชุมนุมพาหะ ข. ชั้นกลับกลาย ค. ชั้นกลับกลายอย่างมาก 103

6.26 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุ-ความต่างศักย์ที่เลื่อนไปจากกรณีอุดมคติ เนื่องจากกับดักประจุที่รอยต่อ 104

6.27 แสดงความหนาแน่นของกับดักประจุที่รอยต่อ ซึ่งเป็นฟังค์ชันกับระดับพลังงานภายในช่องว่างแถบพลังงาน 105

6.28 แสดงการเคลื่อนที่ของไอออนของผู้ให้ที่ถูกไอออไนซ์แล้วจากสารกึ่งตัวนำเข้าไปในชั้นฉนวน 106

6.29 แสดงการเลื่อนของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุ-ความต่างศักย์ไปจากกรณีอุดมคติ ในลักษณะต่าง ๆ ขึ้นกับชนิดของประจุในฉนวนที่อยู่กับที่..... 107

6.30 แสดงการกระจายของประจุภายในชั้นฉนวน..... 108

6.31 แสดง ก. V_{FB} มีค่าเท่ากับศูนย์ เมื่อไอออนบวกถูกสนามไฟฟ้าผลักมาอยู่ที่รอยต่อระหว่างโลหะกับฉนวน ข. V_{FB} มีค่าสูงสุดเมื่อไอออนบวกถูกสนามไฟฟ้าผลักมาอยู่ที่รอยต่อระหว่างฉนวนกับสารกึ่งตัวนำ..... 108

6.32 แสดงการเลื่อนของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุ-ความต่างศักย์ไปจากกรณีอุดมคติ เนื่องจาก ประจุในฉนวนที่เคลื่อนที่ได้ของตัวเก็บประจุแบบ MIS ของสารกึ่งตัวนำ Si ชนิดพี..... 110

6.33 ก. แสดงประจุสุทธิในฉนวนเสมือนว่าอยู่รวมกันและห่างจากโลหะเป็นระยะทาง X_o ในกรณีที่ยังไม่มีการไบอัส ข. แสดงประจุสุทธิในฉนวนเมื่อมีการไบอัสกลับทางเพื่อให้ได้เงื่อนไขกรณีแถบพลังงานไม่โค้ง..... 111

6.34 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุ-ความต่างศักย์ในกรณี ก. อุดมคติ ข. ผลเนื่องจากประจุในฉนวนที่อยู่กับที่ ค. ผลเนื่องจากกับดักประจุที่รอยต่อ 113

6.35 แสดงลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานของตัวเก็บประจุแบบ MIS กรณีต่าง ๆ คือ ก. อิทธิพลของการฉายแสง ข. อิทธิพลของการฉายรังสี ค. อิทธิพลของการไบอัสความต่างศักย์จนถึงสภาวะพังทลาย... 114

6.36 แสดงอิทธิพลของแสงต่อกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุ-ความต่างศักย์ของตัวเก็บประจุแบบ MIS ของสารกึ่งตัวนำ Si ชนิดพี 116

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่ หน้า

6.37 แสดงอิทธิพลของอุณหภูมิต่อกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความจุ-ความต่างศักย์ของตัวเก็บประจุแบบ MIS ของสารกึ่งตัวนำ Si ชนิดพี 117
7.1 ส่วนประกอบของระบบเตาหลอมโซนเดี่ยวพร้อมทั้งตัวควบคุมอุณหภูมิ เมื่อยังไม่ได้ยกตั้งในแนวเฉียง 5 องศากับแนวราบ..... 121
7.2 แสดงโปรไฟล์ของอุณหภูมิภายในเตาโดยตั้งอุณหภูมิกลางเตาให้เป็น 1200 ° C, 1100 °C, 1050 °C และ 980 °C ตามลำดับ..... 121
7.3 แสดงวงจรไฟฟ้ากึ่งกลศาสตร์เพื่อควบคุมอัตราการลด หรือเพิ่มอุณหภูมิของเตา 122
7.4 แสดงขั้นตอนการปิดหลอดแก้วก่อนนำไปบรรจุธาตุ 123
7.5 แสดงหลอดแก้วควอทซ์สองชั้นที่บรรจุธาตุ Cu, In และ Se..... 127
7.6 แสดงขนาดของผลึกกึ่งตัวนำ $CuInSe_2$ ที่เตรียมได้ โดยวิธีลดอุณหภูมิเตาในแนวเฉียง 5 องศากับแนวราบ..... 130
7.7 แสดงชิ้นผลึกกึ่งตัวนำ $CuInSe_2$ ที่เตรียมได้โดยวิธีลดอุณหภูมิ ในแนวเฉียง 5 องศากับแนวราบที่ตัดเป็นชิ้นบาง ๆ แล้วขัดด้วย กระดาษทรายละเอียด 131
7.8 แสดงชิ้นผลึกกึ่งตัวนำ $CuInSe_2$ ที่เตรียมได้โดยวิธีลดอุณหภูมิเตา ในแนวเฉียง 5 องศากับแนวราบที่ตัดเป็นชิ้นบางๆ และขัดผิวหน้าด้วย กระดาษทรายละเอียด ซึ่งสามารถเห็นของของเกรน (grain boundary) ได้อย่างชัดเจน..... 131
7.9 แสดงผิวหน้าเปิด (Free surface) ของผลึกกึ่งตัวนำ $CuInSe_2$ ที่เตรียมได้โดยวิธีลดอุณหภูมิเตาในแนวเฉียง 5 องศากับแนวราบ..... 132
7.10 แสดงการตรวจสอบชนิดของสารกึ่งตัวนำโดยวิธีชิ้วความร้อน 139
7.11 แสดงลักษณะของโลหะอินเดียม (In) ที่ถูกกดลงบนผิวหน้าชิ้นแผ่นผลึก $CuInSe_2$ ที่เตรียมได้..... 140
7.12 แสดงค่ากระแสริชาร์ดสันของรอยต่อพื้นที่เล็กที่อุณหภูมิห้องจากกราฟ ระหว่างค่ากระแส-ความต่างศักย์ของรอยต่อระหว่าง In และ กาวนำไฟฟ้ากับ p-$CuInSe_2$ 145

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่ หน้า

7.13 กราฟแสดงค่า $R_{HN.OP}$ และ $R_{NO.PM}$ ของสารกึ่งตัวนำ p-$CuInSe_2$ ตัวอย่างที่ #T4 (ความหนาเท่ากับ 0.1 cm.) ที่อุณหภูมิห้อง (300 K)..... 147

7.14 แสดงตัวเก็บประจุแบบ MIS ของสารกึ่งตัวนำ GaAs บนแผ่นทองแดง... 151

7.15 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุ-ความต่างศักย์ของตัวเก็บประจุแบบ MIS ของ p-$CuInSe_2$ ที่อุณหภูมิห้อง (300 K) เมื่อใช้โลหะเหลว In-Ga และผ่านการอบที่อุณหภูมิ 70°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมงก่อนเคลือบด้วยน้ำยาไวแสงผสมทินเนอร์ (รูปบน) และไม่ผ่านการอบ (รูปล่าง) 154

7.16 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุ-ความต่างศักย์ของตัวเก็บประจุ MIS ของ p-$CuInSe_2$ ที่อุณหภูมิห้อง (300 K) เมื่อใช้โลหะเหลว In-Hg และผ่านการอบที่อุณหภูมิ 70°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมงก่อนที่จะเคลือบน้ำยาไวแสงผสมทินเนอร์ (รูปบน) และไม่ผ่านการอบ (รูปล่าง) 155

7.17 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุ-ความต่างศักย์ของตัวเก็บประจุแบบ MIS ของ n-$CuInSe_2$ (In 0.3%) (รูปบน) และของ n-$CuInSe_2$ (Se 0.3%) (รูปล่าง) ที่อุณหภูมิห้อง โดยใช้โลหะเหลว In-Hg และผ่านการอบที่อุณหภูมิ 70°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมงก่อนเคลือบด้วยน้ำยาไวแสงผสมทินเนอร์..... 156

7.18 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุ-ความต่างศักย์ของตัวเก็บประจุแบบ MIS ของ p-$CuInSe_2$ (Se 0.3%) (รูปบน) และ p-$CuInSe_2$ (Cu 0.3%) (รูปล่าง) ที่อุณหภูมิห้องโดยใช้โลหะเหลว In-Hg และผ่านการอบที่อุณหภูมิ 70°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมงก่อนเคลือบด้วยน้ำยาไวแสงผสมทินเนอร์ 157

7.19 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุ-ความต่างศักย์ของตัวเก็บประจุแบบ MIS ของ n-GaAs ที่อุณหภูมิห้องโดยใช้โลหะเหลว In-Hg และผ่านการอบที่อุณหภูมิ 70°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมงก่อนเคลือบด้วยน้ำยาไวแสงผสมทินเนอร์ (รูปบน) และไม่ผ่านการอบ (รูปล่าง)... 158

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่ หน้า

7.20 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุ-ความต่างศักย์ของ
ตัวเก็บประจุแบบ MIS ของ n-GaAs ที่อุณหภูมิห้องเมื่อใช้โลหะเหลว
In-Ga และผ่านการอบที่อุณหภูมิ 70°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมงก่อนเคลือบ
น้ำยาไวแสงผสมทินเนอร์.....159
7.21 แสดงลักษณะโครงสร้างตัวเก็บประจุ แบบ MIS ในกรณีที่ขนาดพื้นที่
ของชั้นโลหะที่อยู่บนชั้นฉนวนซึ่งมีความหนาไม่สม่ำเสมอที่มีขนาดใหญ่เกินไป163
7.22 แสดงการเชื่อมขั้วสัมผัสของตัวเก็บประจุแบบ MIS เข้ากับขั้วของ
แผ่นทองแดงด้วย
ก. สายไฟขนาดเล็ก และสั้นมาก
ข. ปลายเข็มโลหะ.....168