การเตรียมและการศึกษาลักษณะเฉพาะทางไฟฟ้า ของฟิล์มบางคอปเปอร์อินเดียมไดซีลีไนด์

นายชาญวิทย์ จิตยุทธการ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
ภาควิชาฟิสิกส์
บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
พ.ศ. 2538

ISBN 974-631-531-5

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

I16456968

Preparation and Electrical Characterization of Copper Indium Diselenide Thin Films

Mr. Chanwit Chityuttakan

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Science
Department of Physics
Graduate School
Chulalongkorg University
1995

ISBN 974-631-531-5

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การเตรียมและการศึกษาลักษณะเฉพาะทางไฟฟ้าของฟิล์มบางคอปเปอร์อินเดียมไดซีลีไนด์
โดย	นายชาญวิทย์ จิตยุทธการ
ภาควิชา	ฟิสิกส์
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ขจรยศ อยู่ดี

บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

.....คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

(รองศาสตราจารย์ ดร. สันติ ถุงสุวรรณ)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ สมพงศ์ ฉัตราภรณ์)

.....กรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ยุทธ อัครมาส)

.....กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ กิรณันต์ รัตนธรรมพันธ์)

.....กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ขจรยศ อยู่ดี)

พิมพ์ต้นฉบับบทคัดย่อวิทยานิพนธ์ภายในกรอบสีเขียวนี้เพียงแผ่นเดียว

พิพิธภัณฑ์สถานแห่งชาติ สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ชาญวิทย์ จิตยุทธการ : การเตรียมและการศึกษาลักษณะเฉพาะทางไฟฟ้าของฟิล์มบางคอปเปอร์อินเดียมไดซีลีไนด์ (PREPARATION AND ELECTRICAL CHARACTERIZATION OF COPPER INDIUM DISELENIDE THIN FILMS) อ.ที่ปรึกษา : ผศ.ดร.ขจรยศ อยู่ดี, 118 หน้า, ISBN 974-631-531-5

ฟิล์มบาง $CuInSe_2$ บนกระจกได้เตรียมขึ้นโดย 2 วิธีการที่คล้ายคลึงกัน วิธีแรกเป็นการระเหย $CuInSe_2$ ภายใต้สุญญากาศแบบไม่ปรับอุณหภูมิของแผ่นรองรับ ตามด้วยการแอนนีลภายใต้บรรยากาศของซีลีเนียม ในภาชนะสแตนเลสทั้งแบบมีกาซอาร์กอนและไม่มี ที่อุณหภูมิต่างๆ วิธีที่สองเป็นการระเหย $CuInSe_2$ และซีลีเนียมภายใต้สุญญากาศแบบมีการปรับอุณหภูมิของแผ่นรองรับที่อุณหภูมิต่างๆ กัน จากผลการตรวจสอบโครงสร้างผลึกของฟิล์มบางด้วยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ พบว่ามีโครงสร้างผลึกแบบชาลโคไพไรท์ โดยฟิล์มบางที่เตรียมได้จากวิธีแรกมีการลอกของเนื้อฟิล์ม ส่วนวิธีที่สองได้ฟิล์มบางที่มีผิวเรียบและมีค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงมากกว่า 10^5 cm^{-1} ขนาดของช่องว่างแถบพลังงานมีค่าประมาณ 1.01 eV. ฟิล์มบาง $CuInSe_2$ สามารถเตรียมให้มีชนิดการนำไฟฟ้าเป็นแบบเอ็นหรือแบบพี ได้จากวิธีที่สองด้วยการปรับอุณหภูมิของแผ่นรองรับที่อุณหภูมิต่างๆ และอัตราการเคลือบของซีลีเนียม

ภาควิชา ฟิสิกส์ ลายมือชื่อนิสิต .....

สาขาวิชา ฟิสิกส์ ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา .....

ปีการศึกษา 2537 ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม .....

พิมพ์ต้นฉบับบทคัดย่อวิทยานิพนธ์ภายในกรอบสีเขียวเพียงแผ่นเดียว

C525355 : MAJOR PHYSICS
KEY WORD: $CuInSe_2$ / THIN FILMS / EVAPORATION / RESISTIVITY

CHANWIT CHITYUTTAKAN : PREPARATION AND ELECTRICAL CHARACTERIZATION OF COPPER INDIUM DISELEDIUM THIN FILMS. THESIS ADVISOR : ASSIS. PROF. KARJORNYOD YOODEE,Ph.D. 118 pp.
ISBN 974-631-531-5

$CuInSe_2$ thin films on glass substrates were prepared by two similar methods. The first method involved evaporation of $CuInSe_2$ under high vacuum without substrate heating, followed by annealing under Se vapor in an evacuated or argon-filled stainless steel chamber at different temperatures. The second method involved co-evaporation of $CuInSe_2$ and Se under high vacuum with substrate heating at different temperatures. The crystal structure of the films was found to be chalcopyrite structure by the results of the X-ray diffraction method. The thin films from the first method peeled off of the glass substrate, but the films from the other method were smooth and have an absorption coefficient of more than $10^5 cm^{-1}$ with an energy gap of about 1.01 eV. $CuInSe_2$ thin films of n-type or p-type can be prepared by the second method with different substrate temperatures and deposition rates of selenium.

ภาควิชา Physics ลายมือชื่อนิสิต .....
สาขาวิชา Physics ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา .....
ปีการศึกษา 1994 ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม .....

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยความกรุณาของผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ขจรยศ อยู่ดี และผู้ช่วยศาสตราจารย์ สมพงศ์ ฉัตราภรณ์ ที่ได้ให้คำแนะนำ ติดตามและควบคุมการวิจัยอย่างใกล้ชิด รวมทั้งตรวจแก้ไขข้อเขียนวิทยานิพนธ์ ขอขอบคุณการสนับสนุน รวมถึงคำแนะนำปรึกษาเกี่ยวกับวิชาการด้านฟิสิกส์สารกึ่งตัวนำและอำนวยความสะดวกในการวิจัยจากผู้ช่วยศาสตราจารย์กิรณันต์ รัตนธรรมพันธ์ อาจารย์พงษ์ ทรงพงษ์ และคณะวิจัยฟิสิกส์สารกึ่งตัวนำ ภาควิชาฟิสิกส์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ขอขอบคุณ คุณธนูสิทธิ์ บุรินทร์ประโคน คุณสมฤทธิ์ วงศ์มณีโรจน์ นิสิตปริญญามหาบัณฑิตที่ให้ความช่วยเหลืออำนวยความสะดวกในการออกแบบสร้างชิ้นส่วนในระบบระเหยภายใต้สุญญากาศและการวัดด้วยระบบฮอลล์

ขอขอบคุณ คุณประเสริฐ เขียวพิมพา เจ้าหน้าที่ประจำเครื่องเอ็กซ์เรย์ ภาควิชาธรณีวิทยา ที่ให้คำปรึกษาและอำนวยความสะดวกในการใช้เครื่องเอ็กซ์เรย์

ส่วนหนึ่งของงานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจากศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติในโครงการการประดิษฐ์เซลล์แสงอาทิตย์แบบฟิล์มบาง ผู้เขียนจึงขอขอบคุณมา ณ ที่ นี้

ผู้เขียนขอขอบพระคุณทุกท่านที่ได้มีส่วนช่วยเหลือและให้กำลังใจจนวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เสร็จสมบูรณ์ ไว้ ณ ที่นี้

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย..... ง

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ..... จ

กิตติกรรมประกาศ..... ฉ

สารบัญตาราง..... ญ

สารบัญรูป..... ฏ

บทที่

1. บทนำ..... 1

2. สมบัติของฟิล์มบางคอปเปอร์อินเดียมไดซีลีไนด์..... 4

โครงสร้างผลึกของฟิล์มบางคอปเปอร์อินเดียมไดซีลีไนด์..... 5

โครงสร้างแถบพลังงานของคอปเปอร์อินเดียมไดซีลีไนด์..... 7

ฟิล์มบางคอปเปอร์อินเดียมไดซีลีไนด์..... 10

3. การหาค่าคงที่ของโครงผลึกโดยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์..... 12

การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์เนื่องจากผลึก..... 12

ความสัมพันธ์ระหว่างระยะห่างของระนาบกับค่าคงที่ของโครงผลึก..... 13

ความเข้มสัมพัทธ์ของเส้นการเลี้ยวเบนของระนาบต่างๆในผลึก..... 16

4. สมบัติการดูดกลืนแสงของสารกึ่งตัวนำ..... 18

ทฤษฎีการดูดกลืนแสงของสารกึ่งตัวนำ..... 18

การวัดสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง..... 23

5. สมบัติเชิงไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำ..... 25

ความหนาแน่นของพาหะอิสระที่สมดุลเชิงความร้อน..... 25

1. สารกึ่งตัวนำชนิดอินทรินสิก..... 27

2. สารกึ่งตัวนำชนิดเอ็กซ์ทรินสิก..... 30

กรณีความหนาแน่นของสิ่งเจือปนมีน้อย

หรืออุณหภูมิสูง..... 32

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

บทที่

5. (ต่อ) กรณีความหนาแน่นของสิ่งเจือปนมีมาก
หรืออุณหภูมิต่ำ 34
สภาพนำไฟฟ้าเนื่องจากอิเล็กตรอนและโฮล 38
การวัดสภาพต้านทานไฟฟ้า 40
1. วิธีวัดโดยตรง 40
2. วิธีวัดโดยขั้วปลายแหลมสองขั้ว 41
3. วิธีวัดด้วยขั้วปลายแหลมสี่ขั้วตามแนวเส้นตรง 41
4. วิธีวัดด้วยขั้วปลายแหลมที่ไม่อยู่ในแนวเส้นตรงเดียวกัน 42
5. การวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าโดยวิธีแวนเดอเพาว์ 44
ปรากฏการณ์ฮอลล์ 46
6. การสร้างระบบเตรียมฟิล์มบาง 49
ระบบเคลือบฟิล์มบางด้วยวิธีระเหย 50
1. เครื่องวัดความหนาของฟิล์มบาง 51
2. เครื่องควบคุมอุณหภูมิของแผ่นรองรับ 51
3. แหล่งกำเนิดไฟฟ้าโวลต์ต่ำกระแสสูง 51
4. ห้องสุญญากาศ 52
5. ระบบปั๊มสุญญากาศ 60
6. ระบบหล่อเย็น 60
ระบบแอนนีลในกระบวนการซีลีไนด์เซชัน 61
1. แคปซูล 61
2. เตาแอนนีล 62
7. วิธีทดลองและผลการทดลอง 63
การเตรียมฟิล์มบาง 65
1. การเตรียมกระจกสำหรับเคลือบฟิล์มบาง 65
2. การเตรียมฟิล์มบางคอปเปอร์อินเดียมไดซีลีไนด์ 65

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

บทที่

7. (ต่อ) การระเหยฟิล์มบางแล้วปรับโครงสร้าง
ด้วยการซีลีไนด์เซชัน 66
การระเหยฟิล์มบางภายใต้บรรยากาศของ
ซีลีเนียมและปรับอุณหภูมิของแผ่นรองรับ 68
การวัดความหนาของฟิล์มบาง 70
1. การวัดความหนาของฟิล์มบางด้วยเทคนิคโทลานสกี 70
2. การวัดความหนาของฟิล์มบางด้วยเครื่องวัดความหนา 71
การตรวจสอบโครงผลึกของฟิล์มบางโดยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ 72
ขนาดช่องว่างพลังงาน 74
1. ระบบการทดลองและวิธีการวัดสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง 75
2. การหาขนาดช่องว่างแถบพลังงาน 76
การตรวจสอบลักษณะเฉพาะทางไฟฟ้า 79
1. การตรวจสอบชนิดการนำไฟฟ้า 79
2. การวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าโดยวิธีแวนเดอเพาว์ 79
3. การวัดสภาพเคลื่อนที่ได้ของฮอลล์จากระบบฮอลล์ 80
8. สรุปและวิจารณ์ผลการทดลอง 99
เอกสารอ้างอิง 101
ประวัติผู้เขียน 104

สารบัญตาราง

ตารางที่ หน้า

3.1 แสดงความสัมพันธ์ของระนาบในโครงสร้างแบบซิงค์เบลนด์กับโครงสร้างแบบซาลโคไพไรท์ 15

5.1 แสดงรายละเอียดในการวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าด้วยวิธีขั้วสัมผัสที่ไม่อยู่ในแนวเส้นตรงเดียวกัน 43

7.1 แสดงค่าคงที่โครงผลึกของฟิล์มบาง $CuInSe_2$ โดยการแอนนีลที่อุณหภูมิ $400^{\circ}C$ ตามช่วงเวลาต่างๆ 73

7.2 แสดงค่าคงที่โครงผลึกของฟิล์มบาง $CuInSe_2$ ที่เตรียมภายใต้บรรยากาศของซีลีเนียมและมีการปรับอุณหภูมิของแผ่นรองรับในกรณีต่างๆ 74

7.3 แสดงขนาดช่องว่างแถบพลังงานและค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนของฟิล์มบาง $CuInSe_2$ ที่เตรียมภายใต้บรรยากาศของซีลีเนียมและมีการปรับอุณหภูมิของแผ่นรองรับในกรณีต่างๆ 78

7.4 แสดงลักษณะเฉพาะทางไฟฟ้าของฟิล์มบาง $CuInSe_2$ ที่เตรียมภายใต้บรรยากาศของซีลีเนียมและมีการปรับอุณหภูมิของแผ่นรองรับในกรณีต่างๆ 81

สารบัญรูป

รูปที่		หน้า
2.1	โครงสร้างผลึกแบบซิงค์เบลนด์ของ ZnS	6
2.2	เปรียบเทียบโครงสร้างผลึกแบบซิงค์เบลนด์ กลุ่ม II-VI กับโครงสร้างผลึกแบบชาลโคไพไรท์ กลุ่ม $I-III-VI_2$	6
2.3	แสดงการเปรียบเทียบ Brillouin zone ของโครงสร้างผลึกแบบชาลโคไพไรท์ ในกรณี c/a = 2 (เส้นทึบ) กับโครงสร้างผลึกแบบซิงค์เบลนด์ (เส้นประ)	8
2.4	แสดงการแยกของแถบวาเลนซ์ในผลึกแบบชาลโคไพไรท์	8
2.5	แสดงโครงสร้างแถบพลังงานของ $CuInSe_2$ ที่มีโครงสร้างผลึกแบบชาลโคไพไรท์	9
2.6	การเปรียบเทียบสัมประสิทธิ์การดูดกลืนของฟิล์มบาง $CuInSe_2$ ที่เตรียมในแต่ละวิธี	10
3.1	การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์จากระนาบในผลึกตามเงื่อนไขของแบรกก์	13
4.1	การย้ายสถานะพลังงานแบบตรง	22
4.2	การย้ายสถานะพลังงานแบบเฉียง	22
4.3	แสดงการทดลองวัดสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง	23
5.1	แสดงไดอะแกรมแถบพลังงาน ความหนาแน่นของสถานะ การกระจายของฟังก์ชันเฟอร์มี-ไดแรก และความหนาแน่นของพาหะอิสระ ตามลำดับ ก) สารกึ่งตัวนำชนิดอินทรินสิก ข) สารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น ค) สารกึ่งตัวนำชนิดพี	26
5.2	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นของอิเล็กตรอนกับส่วนกลับของอุณหภูมิ	37
5.3	แสดงตำแหน่งของขั้วสัมผัสตามวิธีวัดด้วยขั้วปลายแหลมสี่ขั้วในแนวเส้นตรง	41
5.4	ก. แสดงตำแหน่งของจุดสัมผัสบนชิ้นสารตัวอย่าง ข. การเพิ่มความยาวของเส้นรอบรูป	44
5.5	แสดงแฟคเตอร์ค่าแก้ของการวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าด้วยวิธีแวนเดอเพาว์	45

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
5.6	แสดงการวัดความหนาแน่นของพาหะโดยอาศัยปรากฏการณ์ฮอลล์	46
6.1	ระบบเคลือบฟิล์มบางด้วยวิธีระเหย	50
6.2	วงจรของแหล่งกำเนิดกระแสไฟฟ้าโวลต์ต่ำกระแสสูง	52
6.3	ห้องสุญญากาศ	52
6.4	เบ้าโมลิบดินัม	53
6.5	แผ่นปิดกั้นการระเหย	54
6.6	ภาชนะบรรจุแผ่นรองรับ	55
6.7	ผลึกวัดความหนา	56
6.8	เบ้าควอทซ์และลวดทังสเตน	57
6.9	หลอดฮาโลเจนแผ่รังสีความร้อน	58
6.10	ภาชนะกั้นรังสีความร้อน	59
6.11	ระบบปั๊มสุญญากาศ	60
6.12	แคปซูล	61
6.13	เตาแอนนีล	62
7.1	ไดอะแกรมแสดงขั้นตอนการทำงาน	64
7.2	แสดงการปรับศักย์ไฟฟ้าของหม้อแปลงที่ใช้ในการระเหยฟิล์มบางคอปเปอร์อินเดียมไดซีลีไนด์	66
7.3	แสดงกระแสไฟฟ้าขาออกที่เข้าสู่เบ้าโมลิบดินัม	67
7.4	แสดงอัตราการเคลือบของซีลีเนียมบนแผ่นรองรับ	69
7.5	การวัดความหนาของฟิล์มบางด้วยเทคนิคโทลานสกี	70
7.6	แสดงขนาดการเหลื่อมกันของริ้วการแทรกสอดจากภาพที่ขยายด้วยคอมพิวเตอร์	71
7.7	แสดงระบบการวัดสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง	75
7.8	การตรวจสอบชนิดการนำไฟฟ้าของฟิล์มบางโดยวิธีขั้วความร้อน	79
7.9	แสดงระบบการวัดสภาพเคลื่อนที่ได้ของฮอลล์	80

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ หน้า

7.10 แสดงแพทเทิร์นการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์
ฟิล์มบาง CISP12 ก่อนการแอนนีล..... 82

7.11 แสดงแพทเทิร์นการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์
ฟิล์มบาง CISP06 แอนนีลที่ T=400°C นาน 0.5 ชม. 82

7.12 แสดงแพทเทิร์นการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์
ฟิล์มบาง CISP42 แอนนีลที่ T=400°C นาน 1.0 ชม. 83

7.13 แสดงแพทเทิร์นการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์
ฟิล์มบาง CISP13 แอนนีลที่ T=400°C นาน 1.5 ชม. 83

7.14 แสดงแพทเทิร์นการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์
ฟิล์มบาง CISP15 แอนนีลที่ T=400°C นาน 3.0 ชม. 84

7.15 แสดงแพทเทิร์นการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์
ฟิล์มบาง CISP43 แอนนีลที่ T=400°C นาน 3.5 ชม. 84

7.16 แสดงแพทเทิร์นการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์
ฟิล์มบาง CISAA1 Tsub=250°C Ise=32 A Se=1 shot/quartz..... 85

7.17 แสดงแพทเทิร์นการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์
ฟิล์มบาง CISAB1 Tsub=300°C Ise=32 A Se=1 shot/quartz..... 85

7.18 แสดงแพทเทิร์นการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์
ฟิล์มบาง CISAC1 Tsub=350°C Ise=32 A Se=1 shot/quartz..... 86

7.19 แสดงแพทเทิร์นการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์
ฟิล์มบาง CISAD1 Tsub=400°C Ise=32 A Se=1 shot/quartz..... 86

7.20 แสดงแพทเทิร์นการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์
ฟิล์มบาง CISAH1 Tsub=300°C Ise=34 A Se=1 shot/quartz..... 87

7.21 แสดงแพทเทิร์นการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์
ฟิล์มบาง CISAG1 Tsub=300°C Ise=36 A Se=1 shot/quartz..... 87

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ หน้า

7.22 แสดงแพทเทิร์นการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์
ฟิล์มบาง CISAF1 Tsub=300°C Ise=32 A Se=2 shot/quartz..... 88

7.23 แสดงแพทเทิร์นการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์
ฟิล์มบาง CISAJ1 Tsub=300°C Ise=34 A Se=2 shot/quartz..... 88

7.24 แสดงแพทเทิร์นการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์
ฟิล์มบาง CISAI1 Tsub=300°C Ise=36 A Se=2 shot/quartz..... 89

7.25 แสดงสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงและช่องว่างแถบพลังงาน
ของฟิล์มบาง CISAA1 Tsub=250°C Ise=32 A Se=1 shot/quartz..... 90

7.26 แสดงสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงและช่องว่างแถบพลังงาน
ของฟิล์มบาง CISAB1 Tsub=300°C Ise=32 A Se=1 shot/quartz..... 91

7.27 แสดงสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงและช่องว่างแถบพลังงาน
ของฟิล์มบาง CISAC1 Tsub=350°C Ise=32 A Se=1 shot/quartz..... 92

7.28 แสดงสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงและช่องว่างแถบพลังงาน
ของฟิล์มบาง CISAD1 Tsub=400°C Ise=32 A Se=1 shot/quartz..... 93

7.29 แสดงสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงและช่องว่างแถบพลังงาน
ของฟิล์มบาง CISAH1 Tsub=300°C Ise=34 A Se=1 shot/quartz..... 94

7.30 แสดงสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงและช่องว่างแถบพลังงาน
ของฟิล์มบาง CISAG1 Tsub=300°C Ise=36 A Se=1 shot/quartz..... 95

7.31 แสดงสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงและช่องว่างแถบพลังงาน
ของฟิล์มบาง CISAF1 Tsub=300°C Ise=32 A Se=2 shot/quartz..... 96

7.32 แสดงสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงและช่องว่างแถบพลังงาน
ของฟิล์มบาง CISAJ1 Tsub=300°C Ise=34 A Se=2 shot/quartz..... 97

7.33 แสดงสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงและช่องว่างแถบพลังงาน
ของฟิล์มบาง CISAI1 Tsub=300°C Ise=36 A Se=2 shot/quartz..... 98