

การปลูกผลึกและการศึกษาคุณสมบัติบ่งชี้ของสารกึ่งตัวนำเชิงค้ำชีลีไนต์



นาย ธานีกร โอสถจันทร์

ศูนย์วิทยทรัพยากร

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชาฟิสิกส์

บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

พ.ศ. 2532

ISBN 974-569-798-2

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

016141

J10303480

Crystal Growth and Characterization of Zinc Selenide Semiconductor



Mr. Tanakorn Osotchan

ศูนย์วิทยทรัพยากร
A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Science
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Department of Physics

Graduate School
Chulalongkorn University


1989

ISBN 974-569-798-2


หัวข้อวิทยานิพนธ์ การปลูกผลึกและการศึกษาคุณสมบัติของสารกึ่งตัวนำชนิดซิลิโคน
โดย นาย ธนากร โอสถจันทร์
ภาควิชา ฟิสิกส์
อาจารย์ที่ปรึกษา ผู้ช่วยศาสตราจารย์ สมพงษ์ จัตราภรณ์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ชวรงค์ อ्यूดี

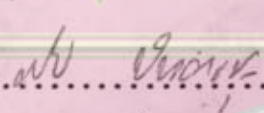


บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยฉบับนี้เป็นส่วน
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

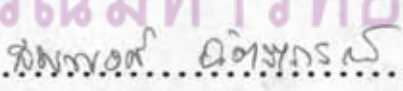

..... คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย
(ศาสตราจารย์ ดร. อถรร วัยราษฎร์)

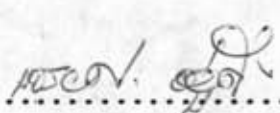
คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์


..... ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร. จิตณะ กวณะเมธี)


..... กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร. กิโย โป ปันยารชุน)

ศูนย์วิทยุทรัพยากร
..... กรรมการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วิจิต ศรีตระกูล)


..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ สมพงษ์ จัตราภรณ์)


..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ชวรงค์ อ्यूดี)

ธนากร ไอลงจันทร์ : การปลูกผลึกและการศึกษาคุณสมบัติบ่งชี้ของสารกึ่งตัวนำซิงค์ซีลีไนด์
(CRYSTAL GROWTH AND CHARACTERIZATION OF ZINC SELENIDE SEMICONDUCTOR)
อ.ที่ปรึกษา : ผศ.สมพงษ์ ชัตรารณณ์ และ ผศ.ดร.ขจรยศ อยู่ดี , 172 หน้า

ในงานวิจัยนี้ได้ปลูกผลึกเดี่ยว ZnSe ขนาด $10 \times 10 \times 5 \text{ mm}^3$ จากสมภาวะไอ ในบรรยากาศของแก๊สไฮโดรเจนที่อุณหภูมิ $1100-1250 \text{ }^\circ\text{C}$ สารตั้งต้นสังเคราะห์โดยตรงจากธาตุ Zn(99.9999%) และ Se(99.999%) การปลูกผลึกจากเทคนิคการแกว่งกวัดของอุณหภูมิจะทำให้ได้ผลึกที่สมบูรณ์และมีเกรนขนาดใหญ่ จากการถ่ายภาพเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์แบบวง พบว่ามีโครงสร้างผลึกเป็นแบบซิงค์เบลนด์ มีค่าคงที่โครงผลึกเท่ากับ $5.6682 \pm 0.0004 \text{ \AA}$

การนำไฟฟ้าในผลึก ZnSe ที่ปลูกได้อธิบายได้ด้วยกระแส space-charge-limited จากการวัดการสะท้อนไมโครเวฟ ได้ค่าสภาพต้านทานและค่าคงที่ไดโพลิกทริกที่ความถี่ไมโครเวฟ เท่ากับ $3 \times 10^8 \text{ } \Omega\text{-cm}$ และ 8.76 ตามลำดับ ได้ศึกษาการเปลี่ยนสภาพต้านทานของผลึก ZnSe โดยการโด๊ปด้วย Zn, Ga, Al และ Cu ตามลำดับ ผลึกที่โด๊ปด้วย Al จะมีสภาพต้านทานต่ำถึง $0.2-0.6 \text{ } \Omega\text{-cm}$ ได้คำนวณหาความเข้มข้นพาหะจากการวัด C-V ของรอยต่อ MS และ MIS

จากการวัดการดูดกลืนแสง พบว่าผลึก ZnSe ที่ปลูกได้ มีช่องว่างแถบพลังงานเป็นแบบตรงมีขนาดเพิ่มขึ้นจาก 2.633 eV ถึง 2.751 eV เมื่ออุณหภูมิลดลงจาก 300K ถึง 11K การเปลี่ยนแปลงช่องว่างแถบพลังงาน และพารามิเตอร์ความเข้มข้นทางของเอชภาค กับอุณหภูมิ แสดงให้เห็นว่าการดูดกลืนเหล่านี้มีผลมาจากการที่โฟนอนเชิงแสงตามยาวเหนี่ยวนำให้ เกิดสนามไฟฟ้าย่อยภายในสาร การดูดกลืนที่พลังงานโฟตอนต่ำกว่า E_g สอดคล้องกับการย้ายสถานะในแถบพลังงานเดียวกันและการดูดกลืนจากพาหะอิสระ



ศูนย์วิทยทรัพยากร จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชา ฟิสิกส์
สาขาวิชา ฟิสิกส์
ปีการศึกษา 2531

ลายมือชื่อนิสิต ธนากร ไอลงจันทร์
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา สมพงษ์ ชัตรารณณ์



TANAKORN OSOTCHAN : CRYSTAL GROWTH AND CHARACTERIZATION OF ZINC SELENIDE SEMICONDUCTOR. THESIS ADVISORS : ASSISTANT PROFESSOR SOMPHONG CHATRAPHORN AND ASSISTANT PROFESSOR KAJORN YOD YOODEE, Ph.D. 172 pp.

Single crystals of ZnSe with dimensions of $10 \times 10 \times 5 \text{ mm}^3$ were grown from vapor-phase in hydrogen atmosphere at $1100\text{-}1250 \text{ }^\circ\text{C}$. The starting material was prepared by direct synthesis from Zn(99.9999%) and Se(99.999%). The crystals of larger grain and higher quality were obtained by temperature oscillation technique. X-ray powder diffraction method was used to determine the ZnSe crystal structure to be zinc-blende type with lattice constant of $5.6682 \pm 0.0004 \text{ \AA}$.

The mechanism of electrical conduction in as grown crystals could be described as space-charge-limited current process. However resistivity at microwave frequencies obtained from microwave reflection technique was $3 \times 10^8 \text{ } \Omega\text{-cm}$ with a dielectric constant of 8.76. The change in resistivity of ZnSe samples was studied by doping with Zn, Ga, Al and Cu respectively. Low resistivity of $0.2\text{-}0.6 \text{ } \Omega\text{-cm}$ was obtained from the Al doped samples. Carrier concentrations were also obtained by C-V measurement of MS and MIS samples.

The experimental results of optical absorption measurement show that the as grown ZnSe has direct energy gaps between 2.633 eV and 2.751 eV at temperatures from 300K down to 11K, respectively. The temperature dependence of the energy gap and the slope parameter in Urbach tail indicates that the absorption is influenced by the LO phonon-induced electric microfields. Absorption at photon energies lower than E_g is due to intraband transition and free carrier absorption.

ศูนย์วิทยพัชกร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชา ฟิสิกส์
สาขาวิชา ฟิสิกส์
ปีการศึกษา 2531

ลายมือชื่อนิสิต ศานนท์ ไชยจันทร์
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา สมพงษ์ ฉัตรพูน



กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ได้สำเร็จลุล่วงไปได้ ด้วยความช่วยเหลืออย่างดียิ่ง ของ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ สมพงษ์ ฉัตรภรณ์ และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ขจรยศ อยุ่ดี อาจารย์ ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ซึ่งท่านได้ให้คำแนะนำและข้อคิดเห็นต่างๆการวิจัยมาด้วยดีตลอด อีกทั้งได้รับการสนับสนุนอย่างดียิ่งจากท่าน ผู้ช่วยศาสตราจารย์ กิรภัณฑ์ รัตนธรรมพันธ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วิชิต ศรีตระกูล และคณะผู้วิจัยฟิสิกส์สารกึ่งตัวนำ ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ได้ให้คำปรึกษา และแนะนำเกี่ยวกับวิชาการ ทางด้านฟิสิกส์สารกึ่งตัวนำ และอำนวยความสะดวกในการวิจัย

ขอขอบคุณ รองศาสตราจารย์ ดร. พัทธนะ ภาะนันท์ และ รองศาสตราจารย์ สุกนิจ พราหมทัต ที่ได้ช่วยให้คำแนะนำปรึกษาเกี่ยวกับการถ่ายภาพเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ และในการวัดสมบัติสารด้วยเทคนิคทางไมโครเวฟ รองศาสตราจารย์ ดร. อนันตสิน เตชะภาพุช ได้ให้คำแนะนำปรึกษาและอนุญาตให้ใช้อุปกรณ์ในการวัด จึงขอขอบคุณมา ณ ที่นี้

ขอขอบคุณ คุณไอศาร บัวม่วง และ คุณคุณุฎี แสงต์ดี เจ้าหน้าที่ประจำห้องปฏิบัติการ หน่วยวิจัยฟิสิกส์สารกึ่งตัวนำ ภาควิชาฟิสิกส์ ที่ได้ช่วยอำนวยความสะดวกเกี่ยวกับเครื่องมือต่าง ๆ ที่ใช้ในการวิจัย ตลอดจนนิสิต โปรแกรมปริญญาตรีบัณฑิต คุณณพภูล สุทธิศิริ และนิสิต โปรแกรม มหาบัณฑิต อันได้แก่ คุณกัลยา เอื้อประเสริฐศักดิ์, คุณงามนิตย์ วงศ์เจริญ, คุณจิตินัย แก้วแดง, คุณวิชิต ศิริโชติ, คุณธนา สุทธิโอกาส และ คุณพงษ์ ทรงพงษ์ ซึ่งทุกท่านมีส่วนช่วยให้เนื้อหา ของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น



สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	จ
กิตติกรรมประกาศ	ฉ
สารบัญตาราง	ญ
สารบัญรูป	ฎ
บทที่ 1 บทนำ	1
บทที่ 2 การปลูกผลึก	4
2.1 เทคนิคการปลูกผลึก ZnSe	4
2.1.1 เทคนิคการปลูกผลึกจากสภาวะไอ	5
2.1.2 การปลูกผลึก ZnSe จากสภาวะไอ	9
2.1.3 การปลูกผลึก ZnSe จากวิธีอื่น	11
2.2 ทฤษฎีการปลูกผลึกจากสภาวะไอ	12
2.2.1 ออกุทพลศาสตร์ของ ZnSe	12
2.2.2 การไหลของแก๊ส	14
2.2.3 การแพร่กับอัตราการปลูกผลึก	16
2.2.4 จลนพลศาสตร์ของการปลูกผลึก	17
2.3 ขั้นตอนการปลูกผลึก ZnSe	21
2.3.1 วิธีเตรียมสารตั้งต้น ZnSe	21
2.3.2 วิธีปลูกผลึก ZnSe จากสภาวะไอ	23
2.3.3 ลักษณะผลึกที่ปลูกได้	27
บทที่ 3 ผลึกศาสตร์	37
3.1 โครงสร้างผลึก	37
3.1.1 โครงผลึกแบบซิงค์เบลนด์	39
3.1.2 โครงผลึกแบบเวอรัทไซต์	40
3.1.3 โครงผลึกแบบโพสิโทท์	41
3.1.4 โครงผลึกแบบร็อคซอลล์	41

3.2	หลักการถ่ายภาพการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์	42
3.2.1	การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์	43
3.2.2	หลักการถ่ายภาพการเลี้ยวเบนแบบผง	44
3.2.3	หลักการถ่ายภาพการเลี้ยวเบนแบบเลาเอ	45
3.2.4	ความเข้มของการเลี้ยวเบน	46
3.3	วิธีถ่ายภาพการเลี้ยวเบนแบบผง	48
3.3.1	การเตรียมข้อมูลของเส้นเลี้ยวเบน	49
3.3.2	การระบุระนาบของเส้นเลี้ยวเบน	51
3.3.3	การคำนวณค่าคงที่โครงสร้างอย่างละเอียด	53
3.3.4	โครงสร้างแบบอื่นที่พบในการปลูกผลึก	57
3.4	วิธีถ่ายภาพการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์แบบสะท้อนกลับ	59
3.4.1	ภาพถ่าย stereographic	61
3.4.2	การระบุระนาบของภาพถ่ายการเลี้ยวเบนแบบสะท้อนกลับ	66
3.4.3	สมมาตรของการถ่ายภาพเลี้ยวเบนแบบสะท้อนกลับ ...	69
3.4.4	ภาพถ่ายการเลี้ยวเบนแบบสะท้อนกลับของทวิน	71
3.5	หน้าผลึกและการกัดผิวหน้าผลึก	74
บทที่ 4	สมบัติบ่งชี้เชิงไฟฟ้า	78
4.1	ส่วนพ่วงกับการนำไฟฟ้า	78
4.2	การนำไฟฟ้าในสารกึ่งตัวนำ	81
4.3	กระแส space-charge-limited (SCL)	84
4.4	รอยต่อ โลหะ-สารกึ่งตัวนำ (MS)	87
4.5	การวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าโดยวิธีแวนเดอร์เพาฟ์	90
4.6	การวัดสภาพยอมเชิงซ้อนด้วยเทคนิคไมโครเวฟ	93
4.7	สมบัติเชิงไฟฟ้าของผลึก ZnSe ที่ปลูกได้	96
4.7.1	การวิเคราะห์กระแส SCL	96
4.7.2	การหาค่าคงที่ไดโพลีกรีกจากการวัดความจุไฟฟ้า ...	99
4.7.3	วิธีหาสภาพยอมเชิงซ้อนด้วยเทคนิคไมโครเวฟ	102
4.8	ผลึก ZnSe ที่ลดสภาพต้านทานไฟฟ้า	106
4.8.1	วิธีลดสภาพต้านทานไฟฟ้า	106

	หน้า
4.8.2 จุดสัมผัสไอโธรมิก	107
4.8.3 สภาพต้านทานไฟฟ้า	112
4.8.4 สัมประสิทธิ์ของฮอลล์	116
4.8.5 รอยต่อ MS (และ MIS) กับการหาความเข้มข้นพาหะ	119
บทที่ 5 สมบัติปั้งซีเชิงแสง	126
5.1 โครงสร้างแถบพลังงานของผลึก ZnSe ซิงค์เบลนด์	126
5.2 สมบัติเชิงแสงของสารกึ่งตัวนำ	129
5.2.1 การดูดกลืนหลักมูล	131
5.3 สัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงของผลึก ZnSe	132
5.3.1 การวัดสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง	132
5.3.2 ขอบการดูดกลืนหลักมูล	134
5.3.3 ส่วนหางของเออเบาด	135
5.3.4 ขนาดช่องว่างแถบพลังงานที่อุณหภูมิต่าง ๆ	137
5.3.5 การดูดกลืนที่พลังงานต่ำกว่าขอบการดูดกลืนหลักมูล ...	140
บทที่ 6 สรุปและวิจารณ์	142
เอกสารอ้างอิง	148
ภาคผนวก	161
ประวัติผู้เขียน	172

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
2.1	แสดงสมบัติทางอุณหพลศาสตร์ของธาตุ [1]	12
2.2	แสดงลักษณะผลึกที่ปลูกได้ในสภาพต่าง ๆ	33
3.1	การแบ่งโครงผลึก AB ด้วยการบรรจุของแอนไอออน	38
3.2	atomic scattering factor ของ Zn และ Se ที่มุมต่าง ๆ [39]	48
3.3	แสดงการคำนวณระบุนาบบของฟิล์มในรูปที่ 3.8ก	52
3.4	แสดงการคำนวณระบุนาบบของฟิล์มในรูปที่ 3.8ข	56
3.5	แสดงการคำนวณระบุนาบบของฟิล์มในรูปที่ 3.8ค	58
3.6	แสดงการคำนวณระบุนาบบของฟิล์มในรูปที่ 3.8ง	60
3.7	แสดงค่ามุมระหว่างจุดระนาบที่สำคัญบนภาพหลายในรูปที่ 3.16	67
3.8	แสดงสมมาตรภาพหลายของภาพถ่ายแบบเลาเอที่รังสีตกกระทบผลึกลูกบาศก์ ในทิศทางต่าง ๆ	69
4.1	แสดงแนวโน้มชนิดการนำไฟฟ้าในสารประกอบกลุ่ม II-VI [50] ...	80
4.2	ความสัมพันธ์ระหว่างกระแส-ความต่างศักย์ และกระแส-อุณหภูมิของ สามขบวนการนำไฟฟ้าในลนนวน [57]	85
4.3	ข้อมูลในการหาค่าคงที่ไดโอิเล็กทริก	102
4.4	ขบวนการลดสภาพต้านทานไฟฟ้าผลึก ZnSe และลักษณะผลึกที่ได้	107
4.5	สมบัติโลหะเจือ In ชนิดต่าง ๆ ที่ใช้ทำจุดสัมผัสโอห์มมิกับผลึก n-ZnSe	109
4.6	สภาพต้านทาน ไฟฟ้าและพลังงาน โออไนซ์ของสิ่งเจือปนของผลึก ZnSe ต่าง ๆ	115
4.7	ชนิดและความเข้มข้นของพาหะอิสระของผลึกที่โดยด้วยสารต่าง ๆ จากวิธี การวัดด้วยเทคนิคฮอลล์และความจุไฟฟ้า-แรงดันของรอยต่อ MS และ MIS	122
5.1	character table ของกรุปทวิคูณ Γ (ที่ $k=0$ ของผลึกซิงค์เบลนด์)	128



สารบัญรูป

รูปที่		หน้า
2.1	การปลูกผลึกจากสภาวะไอ ก) แบบพลศาสตร์ [1], ข) แบบสถิตศาสตร์ของ Greene และคณะ [5] A-แผ่นควอทซ์บิดสองข้าง, B-ถ้วยควอทซ์, C-ผงสารตั้งต้น, D-ท่อควอทซ์, E-ท่อหมุนไคท์, F-แก้วสวมต่อกับเครื่องทำสุญญากาศ	5
2.2	แสดงผลึกที่ปลูกได้จาก Boyd และ Sihvonen [6] ก) แบบที่ 1, ข) แบบที่ 2, ค) และ ง) แบบที่ 3 (สเกลต่างกัน), และระบบที่ใช้ปลูกผลึก จ) แบบที่ 2, ฉ) แบบที่ 3	6
2.3	แสดงระบบและ โปรไฟล์ของอุณหภูมิในการปลูกผลึกของ Piper และ Polich [4]	7
2.4	แสดงลักษณะการปลูกผลึกของ Clark และ Woods [7] ในตำแหน่งเริ่มต้น	8
2.5	แผนภาพสมดุลเฟสของ CdTe [1] ก) T-X, ข) P-T	14
2.6	การไหลแบบการพาโดยอิสระ ก) สภาวะเสถียร, ข) การพาโดยธรรมชาติ, ค) สภาวะอุปเสถียร	15
2.7	ผลของแอนทราซีนต่อโปรไฟล์ [30] ของ ก) ความเร็ว, ข) อุณหภูมิ	16
2.8	แสดงการสร้างผิวใหม่ p' และ p'' เพื่อทดสอบความเสถียรของผิว	18
2.9	กราฟของพลังงานพื้นผิวต่อหน่วยพื้นที่ที่หน้าผลึกต่าง ๆ ในสามกรณี	18
2.10	ก) แสดงโปรไฟล์ผิวของการปลูกผลึก, ข) กราฟของอัตราการปลูกผลึกที่หน้าผลึกต่าง ๆ	19
2.11	กราฟของอัตราการปลูกผลึกเฟสแซเทอรัคคิวบิกที่หน้าผลึก (111), (011) ถึง (111)	20
2.12	โปรไฟล์ผลึกและเส้นต่อที่มีความชันเท่าจากในกราฟรูป 2.10 ข) แบบที่ I	21
2.13	ระบบกลับสารตั้งต้น ZnSe	22
2.14	แสดงระบบและ โปรไฟล์อุณหภูมิในการปลูกผลึก ZnSe จากสภาวะไอที่สเกลเดียวกัน	23

รูปที่		หน้า
2.15	ระบบแก๊ส H_2 ที่ใช้ในการปลูกผลึก	25
2.16	ภาพถ่ายผิวผลึก Se แสดงผิววงกันรอยของการปลูกผลึกแบบวิสเคอร์ .	28
2.17	ภาพถ่ายแสดงขนาดก้อนผลึก ZnSe ที่ปลูกได้	29
2.18	ภาพถ่ายภาคตัดขวางของผลึกแสดงขอบเกรนและแถบทวิน (เส้นขนาน)	30
2.19	ภาพถ่ายปลายด้านตัดของก้อนผลึกที่ปลูกได้ แสดงผิวเปิดอิสระ ก) เป็น ผิวสามเหลี่ยมซ้อนเป็นชั้น ข) เป็นเกาะกระจาย โดยผิวสามเหลี่ยมบน แต่ละเกาะจะขนานกัน	31
2.20	ภาพถ่ายแสดงการปลูกผลึกแบบเป็นชั้น	31
2.21	ภาพถ่ายรอยแตกเป็นชั้นของผลึก ก) บริเวณปลายแหลม ข) แสดง การเปลี่ยนแนวของชั้นของรอยแตก	32
2.22	ภาพถ่ายผิวผลึกด้านข้างแสดงสิ่งพร่องที่เกิดจากผิวควอทซ์	33
2.23	ภาพถ่ายภาคตัดขวางของผลึกแสดง ก) วอยด์ขนาดเล็ก(จุด) ข) วอยด์ ขนาดใหญ่ ซึ่งจะสังเกตเห็นผิวสามเหลี่ยมด้านในวอยด์	34
2.24	ภาพถ่ายลักษณะและตำแหน่งผลึกที่ปลูกได้ บริเวณปลายแหลม, สารตั้งต้น และส่วนท้าย	35
2.25	ภาพถ่ายผลึกด้านข้างแสดงรอยต่อเมื่อมีการหยุดการปลูกผลึกหรือมีการ ปลูกผลึก ใหม่อีก	36
3.1	โครงผลึก ก) ลูกบาศก์ซิงค์เบลนด์ ข) เฮกซะโกนอลเวอร์ทซ์ วงกลมโปร่งแทนอะตอม Se (อโลหะ) วงกลมแทนอะตอม Zn (โลหะ)	39
3.2	แสดงความมีชั้นในโครงผลึก ก) ซิงค์เบลนด์ ข) เวอร์ทซ์ หน้า A ประกอบด้วยอะตอมโลหะ(วงกลมทึบเล็ก) และหน้า B เป็นอะตอม อโลหะ(วงกลมใหญ่)	40
3.3	โครงผลึก โพลีไทท์ แสดงการจัดเรียงของอะตอมโลหะ(วงกลมทึบเล็ก) และอะตอมอโลหะ(วงกลมโปร่งใหญ่) อักษร A,B,C แทนแต่ละรูปแบบของ การจัดชั้นอะตอม	42
3.4	ก) การกระเจิงของรังสีเอกซ์โดยอะตอมที่จุด O และ A ข) ทรงกลม ของการสะท้อน แสดงภาคตัดที่ระนาบรังสีตกและรังสีเลี้ยวเบน	43
3.5	ก) แสดงการเกิดกรวยของรังสีเลี้ยวเบน ข) ทรงกลมขีดจำกัดในการ ถ่ายภาพแบบผง	45

รูปที่	หน้า
3.6	ทรวงกลมของการสะท้อนของการถ่ายภาพแบบเลาเอ ก) แลตทิซส่วนกลับ คงที่ ข) แลตทิซส่วนกลับเปลี่ยนตามความยาวคลื่น 46
3.7	การถ่ายภาพเลี้ยวเบนแบบผงด้วยกล้อง Debye-Scherrer ก) ลักษณะ การเกิดการเลี้ยวเบน ข) แสดงภาคตัดขวาง [37] 49
3.8	ภาพถ่ายการเลี้ยวเบนแบบผงด้วยกล้อง Debye-Scherrer ของ ก) ก้อนผลึกที่ปลูกได้ ข) ก้อนสารสีดำที่เหลือจากการสังเคราะห์ ZnSe ค) ZnO ง) เกล็ดสีขาวที่เหลือจากการปลูกผลึก ZnSe จากสถานะไอ จ) ผงสารประกอบ ZnSe สำเร็จ 50
3.9	กราฟระหว่างค่าคงที่โครงสร้าง (a) ของผลึก ZnSe ซิงค์เบลนด์ที่ปลูกได้ กับ ก) ฟังก์ชัน $\sin^2\theta$ ข) ฟังก์ชัน Nelson-Riley 55
3.10	แสดงตำแหน่งจุดเลี้ยวเบนแบบเลาเอ ก) เป็นรูปวงรีในการถ่ายภาพ แบบทะลุผ่าน ข) เป็นรูปพาราโบลาในการถ่ายภาพแบบสะท้อนกลับ 61
3.11	ภาพถ่ายการเลี้ยวเบนแบบสะท้อนกลับของผลึก ZnSe ที่หน้าผลึกใด ๆ (ซึ่งจะ ได้กล่าวถึงการระบุระนาบในบทความ) 62
3.12	ก) แสดงระบบพิกัดของมุม ρ'' และ θ'' ข) แสดงเส้นทางเดินของ จุดบนผิวทรวงกลมของการสะท้อน เมื่อ ρ'' และ θ'' คงที่ [43] 63
3.13	แสดงความสัมพันธ์ของมุม δ และ γ [37] 63
3.14	แสดงการใช้แผนภูมิ ก) Greninger และ ข) Wulff net ช่วยลง จุดบนภาพฉาย [37] 64
3.15	แสดงการสร้างภาพฉาย stereographic [37] 65
3.16	ภาพฉายของจุดเลี้ยวเบนในรูปที่ 3.11 66
3.17	กรุปสมมาตรจุดบนระนาบ [43] 69
3.18	ภาพถ่ายการเลี้ยวเบนแบบสะท้อนกลับบริเวณระนาบ 111 70
3.19	ก) ภาพถ่ายการเลี้ยวเบนแบบสะท้อนกลับของทวิน ซึ่งสามารถแยกได้ เป็นสองชุดดังในรูป ข) และ ค) 72
3.20	แสดงแถบทวินในโครงสร้าง FCC โดยระนาบกระดาะเป็น (110) [37] 73
3.21	ก) ภาพฉายและ ข) แผนภาพลักษณะของผลึกทวินของภาพถ่ายในรูปที่ 3.19 74
3.22	ภาพถ่ายการเลี้ยวเบนแบบสะท้อนกลับที่ระนาบผลึก ก) (100) ข) (110) ค) (111) 76

รูปที่		
4.1	ความเข้มข้นของอิเล็กตรอน โหล์และจุดพร่องเป็นฟังก์ชันของ P_m สำหรับสารประกอบ MX ที่ไม่ได้โดป (เส้นประ) และโดป (เส้นทึบ) ด้วยผู้ให้ที่ความเข้มข้น $4 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$ [49]	81
4.2	ความเข้มข้นของอิเล็กตรอนเป็นฟังก์ชันกับอุณหภูมิของผลึก ZnSe ที่คำนวณได้ โดยกำหนดให้ $m_{\text{con}}=0.17$, $m_{\text{an}}=0.65$, $E_g=2.7\text{eV}$	83
4.3	ความหนาแน่นกระแส SCL ในภาวะชั่วคราวสำหรับ ก) ผลึกฉนวน ข) ผลึกตัวนำ [63]	86
4.4	ระดับพลังงานของรอยต่อ MS บนผลึกกึ่งตัวนำชนิด ก) n และ ข) p	87
4.5	ความสูงกำแพงศักย์ของโลหะต่าง ๆ บนผิวหน้า 110 ของผลึก ZnSe [67] ก) ที่ถูกหักในสุญญากาศ ข) ที่ถูกกัดด้วยสารเคมี	88
4.6	ระดับพลังงานของรอยต่อ MS ชนิด n ก) ขณะไม่ให้ไบแอส จะอยู่ในสมดุลเชิงความร้อน ข) ขณะไบแอสตรง ค) ขณะไบแอสกลับ	89
4.7	ชิ้นสารตัวอย่างที่มีสี่จุดสัมผัสที่ขอบเพื่อวัดสภาพต้านทานไฟฟ้า (และปรากฏการณ์ฮอลล์) ก) รูประนาบครึ่งวงกลม ข) รูปรางใด ๆ	91
4.8	ฟังก์ชันแก๊ f ในการหาค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าด้วยวิธีแวนเดอเพอร์ [70]	92
4.9	แผนภาพ ก) แสดงคลื่นโหมด TE_{10} ในท่อนำคลื่นสี่เหลี่ยม เส้นทึบแทนสนามไฟฟ้า เส้นประแทนสนามแม่เหล็ก ข) แสดงการกระตุ้น	93
4.10	การสะท้อนของไมโครเวฟที่สารตัวอย่างในท่อนำคลื่น	94
4.11	ก) เมจิกที และแผนภาพของสนามไฟฟ้าเมื่อคลื่นตกกระทบใน ข) แชนที่ 1 ค) แชนที่ 2	95
4.12	ความหนาแน่นของกระแส SCL ที่ปลูกได้ (สภาพต้านทานไฟฟ้าสูง) I_0 เป็นกระแส ในที่มืด และ F_1 และ F_2 เป็นกราฟเมื่อเพิ่มความเข้มแสง	97
4.13	ความหนาแน่นกระแส SCL ภาวะชั่วคราว ในผลึก ZnSe ที่ปลูกได้ ที่ความต่างศักย์ต่าง ๆ	99
4.14	ความหนาแน่นกระแส SCL ในผลึก ก) ZnSe:Zn(v) และ ข) ZnSe:Se I_0 เป็นกระแสในที่มืด และ F_1 และ F_2 เป็นกราฟเมื่อเพิ่มความเข้มแสง	100
4.15	ระบบไมโครเวฟที่ใช้วัดสภาพยอมเชิงซ้อนของสาร	103
4.16	ระยะคลื่นเชอร์ที่ปรับให้บริดจ์สมดุลที่ความถี่ต่าง ๆ เมื่อ 1) ไม่ได้ใส่สาร 2) ใส่สารหนา 7.619 mm และ 3) ใส่สารหนา 10.060 mm	104

รูปที่		หน้า
4.17	สัมประสิทธิ์การสะท้อนเชิงซ้อน p และ $\tan\theta$ ที่ความถี่ต่าง ๆ ของ สารหนา ก) 7.619 mm และ ข) 10.060 mm	105
4.18	ภาพถ่ายผิวหน้าชั้นผลึก ZnSe ที่โคบด้วย Al แสดงความบกพร่อง (ตาข่าย) ที่เกิดจากการแพร่	108
4.19	แผนภาพ ก) แสดงสิ่งประดิษฐ์ โลหะ-สารกึ่งตัวนำ-โลหะ และ ข) แสดงระดับพลังงานของสิ่งประดิษฐ์	110
4.20	ก) ความต่างศักย์ที่ตกคร่อมสิ่งประดิษฐ์ โลหะ-ZnSe:Al-โลหะ ที่กระแส คงที่ค่าต่าง ๆ เป็นฟังก์ชันกับอุณหภูมิ ข) การเขียนกราฟแบบ Richardson ของ สิ่งประดิษฐ์ โลหะ-ZnSe-โลหะ ที่โคบด้วยสารต่าง ๆ . เพื่อหาความสูงกำแพงศักย์	111
4.21	ส่วนกลับของความต้านทานซึ่งสอดคล้องกับความหนาแน่นพาหะ เป็นฟังก์ชัน กับส่วนกลับของอุณหภูมิของผลึก ZnSe ที่โคบด้วยสารต่าง ๆ	114
4.22	ก) สัมประสิทธิ์ของฮอลล์ และความเข้มข้นของอิเล็กตรอนของผลึก n-ZnSe:Al เป็นฟังก์ชันกับส่วนกลับของอุณหภูมิ ข) สภาพเคลื่อนที่ได้ ของฮอลล์ของอิเล็กตรอนที่อุณหภูมิต่าง ๆ	118
4.23	สภาพเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนที่ Ruda [103] คำนวณได้ ก) เป็นฟังก์ชัน กับอุณหภูมิ เนื่องจากการกระเจิงจากกระบวนกรต่าง ๆ และ ข) เป็น ฟังก์ชันกับความเข้มข้นพาหะอิสระที่ $T=300K$	120
4.24	รอยต่อ MS ของ InHg-ZnSe:Al ก) กราฟสมบัติบ่งชี้ความหนาแน่น กระแสกับโวลตเตจเมื่อ โบแอสดตรงและกลับ ข) กราฟระหว่าง I_0 กับพารามิเตอร์ V_A เพื่อหาแฟคเตอร์อุดมคติและความต้านทาน	121
4.25	รอยต่อ MS บนผลึก ZnSe:Zn(m) และ ZnSe:Al ก) การเปลี่ยน $1/C^2$ กับแรงดันไบโอส ข) โพรไฟล์ความเข้มข้นของการโคบจากการวัด C-V	123
4.26	กราฟสมบัติบ่งชี้ความจุไฟฟ้ากับแรงดันไบโอสของรอยต่อ MIS บนผลึก p-ZnSe:Cu	124
5.1	บริลลันโซนของแลตทิซ ที่มีสมมาตรการเลื่อนที่แบบเฟซเซนเตอร์คิวบิก (เช่น ซิงค์เบลนด์และไดมอนด์) แสดงเส้นและจุดสมมาตรที่สำคัญ	127
5.2	โครงสร้างแถบพลังงานของ ZnSe ตามแกนสมมาตร [111], [100] และ [110] ก) ไม่รวมผลของสปิน-ออร์บิต [112] ข) รวมผลของ	

รูปที่		หน้า
	สปีน-ออร์บิท [114]	129
5.3	ปริมาณการถ่ายเทพลังงานในระบบที่มีการสะท้อนกลับภายในหลายครั้ง	130
5.4	แผนภาพระบบทางเดินแสง สัญญาณไฟฟ้า และระบบทำความเย็น ในการวัดสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง	133
5.5	สัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงบริเวณขอบการดูดกลืนหลักมุลของผลึก ZnSe ที่ปลูกได้ที่ 300K และกราฟของฟังก์ชัน $[(\alpha-\alpha_0)hv]^2$ กับ hv	134
5.6	ก) ขอบของการดูดกลืนหลักมุลของผลึก ZnSe ที่ปลูกได้ แสดงส่วนหางของเออภาค (แนวจุด) ข) เปรียบเทียบพารามิเตอร์ความกว้างของเอกซ์โพเนนเชียลกับอุณหภูมิที่วัดได้กับที่คำนวณได้จากสมการที่ 5.6	136
5.7	ขอบการดูดกลืนหลักมุลที่ 11 K ของผลึก ZnSe ที่โดบด้วยสารต่าง ๆ	137
5.8	ก) ขอบการดูดกลืนหลักมุลของผลึก ZnSe ที่ปลูกได้ที่อุณหภูมิต่าง ๆ ข) การเปลี่ยนแปลงช่องว่างแถบพลังงานที่อุณหภูมิต่าง ๆ ของผลึก ZnSe ที่โดบด้วยสารต่าง ๆ	138
5.9	สัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงช่วงไกลจากขอบการดูดกลืนหลักมุล สัมประสิทธิ์การดูดกลืนรวมที่วัดได้ 1 หักกับการดูดกลืนจากพาหะอิสระ 2 จะได้การดูดกลืนภายในแถบ 1-2	139
5.10	สัมประสิทธิ์การดูดกลืนจากพาหะอิสระที่ Ruda [120] คำนวณได้เป็นฟังก์ชันกับ ก) ความยาวคลื่น ข) ความเข้มข้นพาหะที่ $\lambda=10\mu m$	140

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย