

การศึกษาโลหะผลึกกึ่งตัวนำ $\text{AgIn}_{0.8}\text{Ga}_{0.2}\text{Te}_{2(1-z)}\text{Se}_{2z}$

โดยวีรสิทธิ์วเบนรังสีเอ็กซ์



นายกำชัย ตริชัยรัมย์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

ภาควิชาฟิสิกส์

บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

พ.ศ. 2528

ISBN 974-564-189-8

008722

115137399

X-RAY DIFFRACTION STUDY OF
SEMICONDUCTOR ALLOYS $\text{AgIn}_{0.8}\text{Ga}_{0.2}\text{Te}_{2(1-z)}\text{Se}_{2z}$



Mr. Kamchai Treechairusme

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements

for the Degree of Master of Science

Department of Physics

Graduate School

Chulalongkorn University

1985

หัวข้อวิทยานิพนธ์ การศึกษาโลหะผสมกึ่งตัวนำ $\text{AgIn}_{0.8}\text{Ga}_{0.2}\text{Te}_2(1-z)\text{Se}_{2z}$
 โดยวิธีเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์

โดย นายกำชัย ตรีชัยรัมย์

ภาควิชา ฟิสิกส์

อาจารย์ที่ปรึกษา รองศาสตราจารย์ ดร.พัฒนา ภาวะนันท์



บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยฉบับนี้เป็นส่วน
 หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

..... คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย
 (รองศาสตราจารย์ ดร.สุประดิษฐ์ บุนนาค)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
 (รองศาสตราจารย์ สุพนิจ พราหมทัต)

..... กรรมการ
 (รองศาสตราจารย์ ดร.ภิญโญ บันยารชุน)

..... กรรมการ
 (ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. พิเศษฐ์ รัตนวรารักษ์)

..... กรรมการ
 (รองศาสตราจารย์ ดร.พัฒนา ภาวะนันท์)

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สำหรับ $\text{AgIn}_{0.8}\text{Ga}_{0.2}\text{Te}_2$

$$a = 6.4110 + (8.0541 \times 10^{-5})T \quad \text{เมื่อ } T = 27.0^\circ\text{C} \text{ ถึง } 215^\circ\text{C}$$

$$a = 6.4169 + (8.9431 \times 10^{-5})T \quad \text{เมื่อ } T = 307^\circ\text{C} \text{ ถึง } 430^\circ\text{C}$$

$$c = 12.5185 + (6.4624 \times 10^{-5})T + (2.1838 \times 10^{-6})T^2 \\ + (1.0906 \times 10^{-8})T^3 - (1.4192 \times 10^{-11})T^4$$

สำหรับ $\text{AgIn}_{0.8}\text{Ga}_{0.2}\text{Te}_{1.6}\text{Se}_{0.4}$

$$a = 6.3405 + (4.7663 \times 10^{-5})T \quad \text{เมื่อ } T = 27.0^\circ\text{C} \text{ ถึง } 210^\circ\text{C}$$

$$a = 6.3534 + (7.4178 \times 10^{-5})T \quad \text{เมื่อ } T = 292^\circ\text{C} \text{ ถึง } 560^\circ\text{C}$$

$$c = 12.3137 - (5.9043 \times 10^{-4})T + (5.5181 \times 10^{-6})T^2 \\ - (1.6602 \times 10^{-8})T^3 + (1.4733 \times 10^{-11})T^4$$

สำหรับ $\text{AgIn}_{0.8}\text{Ga}_{0.2}\text{Te}_{1.2}\text{Se}_{0.8}$

$$a = 6.2732 + (7.0748 \times 10^{-5})T \quad \text{เมื่อ } T = 27.0^\circ\text{C} \text{ ถึง } 195^\circ\text{C}$$

$$a = 6.2730 + (8.1633 \times 10^{-5})T \quad \text{เมื่อ } T = 330^\circ\text{C} \text{ ถึง } 490^\circ\text{C}$$

$$c = 12.1028 - (1.7387 \times 10^{-5})T - (2.6673 \times 10^{-7})T^2 \\ + (1.0944 \times 10^{-9})T^3 - (1.7721 \times 10^{-12})T^4$$

สำหรับ $\text{AgIn}_{0.8}\text{Ga}_{0.2}\text{Te}_{0.8}\text{Se}_{1.2}$

$$a = 6.1992 + (5.5985 \times 10^{-5})T \quad \text{เมื่อ } T = 27.0^\circ\text{C} \text{ ถึง } 205^\circ\text{C}$$

$$a = 6.2141 + (5.0625 \times 10^{-5})T \quad \text{เมื่อ } T = 307^\circ\text{C} \text{ ถึง } 415^\circ\text{C}$$

$$c = 11.8954 - (2.0946 \times 10^{-4})T + (1.3082 \times 10^{-6})T^2 \\ - (4.3665 \times 10^{-9})T^3 + (4.4614 \times 10^{-12})T^4$$

สำหรับ $\text{AgIn}_{0.8}\text{Ga}_{0.2}\text{Te}_{0.4}\text{Se}_{1.6}$

$$a = 6.1512 + (4.8153 \times 10^{-5})T \quad \text{เมื่อ } T = 27.0^{\circ}\text{C ถึง } 202^{\circ}\text{C}$$

$$a = 6.1605 + (4.7474 \times 10^{-5})T \quad \text{เมื่อ } T = 301^{\circ}\text{C ถึง } 400^{\circ}\text{C}$$

$$c = 11.7577 + (4.0249 \times 10^{-4})T - (4.7032 \times 10^{-6})T^2 \\ + (1.8838 \times 10^{-8})T^3 - (2.5568 \times 10^{-11})T^4$$

สำหรับ $\text{AgIn}_{0.8}\text{Ga}_{0.2}\text{Se}_2$

$$a = 6.0774 + (5.6553 \times 10^{-5})T \quad \text{เมื่อ } T = 27.0 \text{ ถึง } 202^{\circ}\text{C}$$

$$a = 6.0740 + (7.3684 \times 10^{-5})T \quad \text{เมื่อ } T = 320^{\circ}\text{C ถึง } 550^{\circ}\text{C}$$

$$c = 11.5336 + (1.2808 \times 10^{-4})T - (1.9804 \times 10^{-6})T^2 \\ + (6.5656 \times 10^{-9})T^3 - (7.1710 \times 10^{-12})T^4$$

อีกขั้นตอนหนึ่งของการวิจัยครั้งนี้ ได้ทำการหาโครงสร้างของโลหะผสมกึ่งตัวนำ $\text{AgIn}_{0.8}\text{Ga}_{0.2}\text{Te}_{1.6}\text{Se}_{0.4}$ พบว่าอยู่ในระบบ เตตระโกนัล มีโครงสร้างคล้ายกับ ซาลโคไฟไรท์ (CuFeS_2) ซึ่งมีหมู่สมมาตรสามมิติ $I\bar{4}2d$ จากการปรับค่าคงที่โครงสร้างผลึกโดยวิธีกำลังสองน้อยที่สุดใช้ข้อมูลการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของผลึกผงที่ได้จากภาพถ่ายผลึกผงโดยกล้องกีเฟียร์-เฮกก์ ได้ค่าคงที่โครงสร้างผลึก $a = 6.3470(5) \text{ \AA}$ และ $c = 12.3134(17) \text{ \AA}$ มีค่าความหนาแน่นจากวิธีแทนที่น้ำ (D_m) = 5.8 กรัม (ซม.)⁻³ จำนวนหน่วยสูตรในหนึ่งหน่วยเซลล์ (Z) = 4 หน่วยสูตร/หนึ่งหน่วยเซลล์ มีค่าความหนาแน่นจากการคำนวณ (D_c) = 6.0 กรัม (ซม.)⁻³ และสัมประสิทธิ์การดูดกลืนรังสีเอ็กซ์เชิงเส้น $\mu_{\text{MoK}\alpha} = 211.74 \text{ (ซม.)}^{-1}$

ทำการบันทึกความเข้มรังสีเอ็กซ์ที่เลี้ยวเบนของ Mo ชนิด K_α ความยาวคลื่น $\lambda = 0.71069 \text{ \AA}$ จากกระนาบอิสระ 86 ระนาบของผลึกเดี่ยวบนแผ่นฟิล์มซ้อน โดยวิธีไวซ์-เชินเบอร์ก และวัดความเข้มสัมพัทธ์เทียบกับความเข้มมาตรฐานที่เตรียมขึ้นเพื่อใช้เป็นข้อมูล

ที่จะต้องผ่านการแก้เรื่องการดูดกลืนอีกจึงจะเป็นข้อมูลที่น่าไปหาโครงสร้างผลึก การหา
โครงสร้างโลหะผลึกใช้วิธีอะตอมหนัก ในการปรับโครงสร้างผลึกใช้วิธีผลต่างกำลังส่อง
น้อยที่สุดแบบเมทริกซ์เต็มชุด ได้ค่าดัชนีแห่งความเชื่อถือ (R) เป็น 0.081

ในการศึกษาตำแหน่งอะตอมในหนึ่งหน่วยเซลล์ พบว่าอะตอม Ag, ($\text{In}_{0.8}\text{Ga}_{0.2}$) และ ($\text{Te}_{0.8}\text{Se}_{0.2}$) อยู่ที่ตำแหน่งพิเศษ 4a, 4b และ 8d ตามลำดับ

Thesis Title X-ray Diffraction Study of Semiconductor Alloys
 $\text{AgIn}_{0.8}\text{Ga}_{0.2}\text{Te}_{2(1-z)}\text{Se}_{2z}$
 Name Mr. Kamchai Treechairusme
 Thesis Adviser Associate Professor Phathana Phavanantha, Ph.D.
 Department Physics
 Academic Year 1984

ABSTRACT

In this thesis, observations were made on the crystallographic properties of semiconductor alloys $\text{AgIn}_{0.8}\text{Ga}_{0.2}\text{Te}_{2(1-z)}\text{Se}_{2z}$ which belong to a general semiconductor alloy system $\text{Cu}_{(1-x)}\text{Ag}_x\text{In}_{(1-y)}\text{Ga}_y\text{Te}_{2(1-z)}\text{Se}_{2z}$

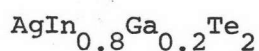
Semiconductor alloys $\text{AgIn}_{0.8}\text{Ga}_{0.2}\text{Te}_{2(1-z)}\text{Se}_{2z}$ with $z = 0.0, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8$ and 1.0 were prepared by direct melt-and-anneal technique. Depending upon the atomic fractions z , different annealing temperatures and annealing times of 12 to 18 weeks were used allowing the samples to reach equilibrium.

X-ray diffraction method was then employed to determine the state of equilibrium as well as the lattice parameters of these alloys. Observation indicated that the variation of the lattice parameters a and c as a function of atomic fraction z can be fitted to equations as follows:

$$a = -0.0143 z^2 - 0.3198 z + 6.4074 \quad \text{\AA}$$

$$c = 0.0309 z^2 - 0.9887 z + 12.5020 \quad \text{\AA}$$

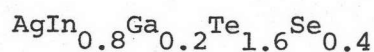
The variation of lattice constants a and c with temperature ranging from 27.0°C to 560°C was found however to fit to equations as follows:



$$a = 6.4110 + (8.0541 \times 10^{-5})T ; \text{ when } T = 27.0^{\circ}\text{C to } 215^{\circ}\text{C}$$

$$a = 6.4169 + (8.9431 \times 10^{-5})T ; \text{ when } T = 307^{\circ}\text{C to } 430^{\circ}\text{C}$$

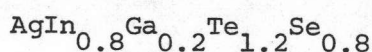
$$c = 12.5185 + (6.4624 \times 10^{-5})T - (2.1838 \times 10^{-6})T^2 \\ + (1.0906 \times 10^{-8})T^3 - (1.4192 \times 10^{-11})T^4$$



$$a = 6.3405 + (4.7663 \times 10^{-5})T ; \text{ when } T = 27.0^{\circ}\text{C to } 210^{\circ}\text{C}$$

$$a = 6.3534 + (7.4178 \times 10^{-5})T ; \text{ when } T = 292^{\circ}\text{C to } 560^{\circ}\text{C}$$

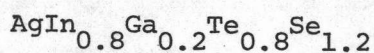
$$c = 12.3137 - (5.9043 \times 10^{-4})T + (5.5181 \times 10^{-6})T^2 \\ - (1.6602 \times 10^{-8})T^3 + (1.4733 \times 10^{-11})T^4$$



$$a = 6.2732 + (7.0748 \times 10^{-5})T ; \text{ when } T = 27.0^{\circ}\text{C to } 195^{\circ}\text{C}$$

$$a = 6.2730 + (8.1633 \times 10^{-5})T ; \text{ when } T = 330^{\circ}\text{C to } 490^{\circ}\text{C}$$

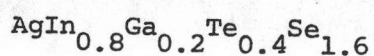
$$c = 12.1028 - (1.7387 \times 10^{-5})T - (2.6673 \times 10^{-7})T^2 \\ + (1.0944 \times 10^{-9})T^3 - (1.7721 \times 10^{-12})T^4$$



$$a = 6.1992 + (5.5985 \times 10^{-5})T ; \text{ when } T = 27.0^{\circ}\text{C to } 205^{\circ}\text{C}$$

$$a = 6.2141 + (5.0625 \times 10^{-5})T ; \text{ when } T = 307^{\circ}\text{C to } 415^{\circ}\text{C}$$

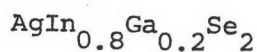
$$c = 11.8954 - (2.0946 \times 10^{-4})T + (1.3082 \times 10^{-6})T^2 \\ - (4.3665 \times 10^{-9})T^3 + (4.4614 \times 10^{-12})T^4$$



$$a = 6.1512 + (4.8153 \times 10^{-5})T ; \text{ when } T = 27.0 \text{ }^{\circ}\text{C to } 202 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$a = 6.1605 + (4.7474 \times 10^{-5})T ; \text{ when } T = 301 \text{ }^{\circ}\text{C to } 400 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$c = 11.7577 + (4.0249 \times 10^{-4})T - (4.7032 \times 10^{-6})T^2 \\ + (1.8838 \times 10^{-8})T^3 - (2.5568 \times 10^{-11})T^4$$



$$a = 6.0774 + (5.6553 \times 10^{-5})T ; \text{ when } T = 27.0 \text{ }^{\circ}\text{C to } 202 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$a = 6.0740 + (7.3684 \times 10^{-5})T ; \text{ when } T = 320 \text{ }^{\circ}\text{C to } 550 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$c = 11.5336 + (1.2808 \times 10^{-4})T - (1.9804 \times 10^{-6})T^2 \\ + (6.5656 \times 10^{-9})T^3 - (7.1710 \times 10^{-12})T^4$$

The next step in this study involved the determination of the structure of a semiconductor alloy $\text{AgIn}_{0.8}\text{Ga}_{0.2}\text{Te}_{1.6}\text{Se}_{0.4}$. Analysis of the experimental results showed the similarity of the structure of the alloy to that of CuFeS_2 , commonly known as chalcopyrite. The structure of $\text{AgIn}_{0.8}\text{Ga}_{0.2}\text{Te}_{1.6}\text{Se}_{0.4}$ is tetragonal, space group $I\bar{4}2d$, with lattice constants $a = 6.3470(5) \text{ \AA}$, $c = 12.3134(17) \text{ \AA}$ as refined by least-squares method using x-ray powder diffraction data obtained from Guinier-Hägg photographs, $D_m = 5.8 \text{ gm. cm}^{-3}$, $Z = 4$ formula units/unit cell, $D_c = 6.0 \text{ gm. cm}^{-3}$ and the linear absorption coefficient $\mu_{\text{MoK}\alpha} = 211.74 \text{ cm}^{-1}$.

The Weissenberg method was employed with $\text{MoK}\alpha$ radiation $\lambda = 0.71069 \text{ \AA}$ to record 86 independent reflections from a single crystal of $\text{AgIn}_{0.8}\text{Ga}_{0.2}\text{Te}_{1.6}\text{Se}_{0.4}$ alloy on multiple films, the intensities were measured visually, and corrected for absorption. The structure of the alloy was solved by the heavy-atom method,

and the structure parameters were refined by the full-matrix least-squares method to a final R index of 0.081.

The atoms of Ag, $(\text{In}_{0.8} \text{Ga}_{0.2})$ and $(\text{Te}_{0.8} \text{Se}_{0.2})$ were found to occupy special positions in the unit cell of $\text{AgIn}_{0.8}\text{Ga}_{0.2}\text{Te}_{1.6}\text{Se}_{0.4}$ at 4a, 4b and 8d respectively.



กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลงได้ด้วยความรู้และความช่วยเหลือตลอดจนคำแนะนำจากอาจารย์ต่าง ๆ ดังนี้

รองศาสตราจารย์ ดร.พัฒนา ภาชนะนันทน์ ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ผู้ให้ความรู้ทางด้านการศึกษาศิลปะโดยวิธีการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ และแนะนำแนวทางในการทำวิทยานิพนธ์มาโดยตลอด

รองศาสตราจารย์ สุพนิช พรหมทศ ซึ่งเป็นผู้ให้ความรู้ทางด้านการศึกษาศิลปะโดยวิธีการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์

รองศาสตราจารย์ ดร.ศรินทร์ฉัตร วัฒนกุล ซึ่งเป็นผู้ให้ความรู้ทางด้านการศึกษาศิลปะโดยวิธีการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ศศิ วงศ์ไชยบุรินทร์ ซึ่งเป็นผู้ให้ความรู้ทางด้านการศึกษาศิลปะโดยวิธีการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์

ศาสตราจารย์ ดร.วิรุฬห์ ลายคณิต และผู้ช่วยศาสตราจารย์ สัมพงษ์ ฉัตรภรณ์ ซึ่งเป็นผู้ควบคุมห้องปฏิบัติการสารกึ่งตัวนำได้ให้ความสะดวกในการใช้วัสดุ และสารที่ใช้ในการเตรียมโลหะผสมกึ่งตัวนำ

รองศาสตราจารย์ ดร. ภิโย บันยารชุน ได้ให้ความสะดวกทางด้านการใช้อุปกรณ์ ซึ่งอยู่ภายใต้ความควบคุมดูแลของท่าน

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วสันต์ พงศ์พิชญ์ หัวหน้าภาควิชาธรณีวิทยา ได้กรุณาให้ความสะดวกในการใช้เครื่องดีฟแฟรคโตมิเตอร์

รองศาสตราจารย์ สัมชาย ทยานนง ผู้อำนวยการสถาบันคอมพิวเตอร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย รวมทั้งเจ้าหน้าที่ของสถาบัน ที่ให้ความสะดวกในการใช้เครื่องคอมพิวเตอร์

นอกจากนี้ผู้เขียนได้รับทุนจากโครงการผลิตและพัฒนาอาจารย์ ในปี พ.ศ.
2523 และ 2524 จึงขอขอบคุณมา ณ ที่นี้ด้วย.



สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ช
กิตติกรรมประกาศ	ฉ
รายการตารางประกอบ.....	ค
รายการรูปประกอบ	ด
บทที่	
1 บทนำ	1
2 โครงสร้างผลึก และความไม่สมบูรณ์ของโครงสร้างผลึก	6
2.1 โครงสร้างผลึกทั่ว ๆ ไป	6
2.2 ระบบผลึกและบรเวณแลตทิซ	9
2.3 พันธะ, ความยาวพันธะ และมุมพันธะ	11
2.4 รัศมีของอะตอมหรือไอออน และรัศมีโคเวเลนต์	12
2.5 ความไม่สมบูรณ์ของผลึก	14
2.5.1 ความไม่สมบูรณ์ของผลึกในคูนัยมิติ	14
2.5.2 ความไม่สมบูรณ์ของผลึกในหนึ่งมิติ	17
2.5.3 ความไม่สมบูรณ์ของผลึกในสองมิติ	27
3 ล่ารกิ่งตัวนำ และวิธีเตรียมผลึกโลหะผล่มกิ่งตัวนำ	30
3.1 ล่ารกิ่งตัวนำ	30
3.1.1 ล่ารกิ่งตัวนำที่ประกอบด้วยธาตุเดี่ยว	31
3.1.2 ล่ารประกอบกิ่งตัวนำที่ประกอบด้วยธาตุเดี่ยว	
ล่องชนิด	32

3.1.3	สารประกอบกิ่งตัวนำที่ประกอบด้วยธาตุเดี่ยว สามชนิด	32
3.1.4	โลหะผสมกิ่งตัวนำที่ประกอบด้วยธาตุ 4, 5 หรือ 6 ชนิด	33
3.2	โครงสร้างของสารกิ่งตัวนำ	34
3.2.1	โครงสร้างแบบเพชร	34
3.2.2	โครงสร้างแบบแกรไฟต์	36
3.2.3	โครงสร้างแบบสฟาเลอไรท์หรือซิงค์เบลนด์ ..	38
3.2.4	โครงสร้างแบบเวอรัทไซต์	40
3.2.5	โครงสร้างแบบซาลโคไพไรท์	41
3.3	วิธีการเตรียมผลึกโลหะผสมกิ่งตัวนำโดยทั่วไป	45
3.3.1	วิธีเตรียมแบบเทคนิคการหลอมโดยตรงและ แอนนัล	46
3.3.2	วิธีเตรียมแบบเทคนิคของบริดจ์แมน	47
3.3.3	วิธีพาสาร์ประกอบด้วยไอสารเคมี	49
4	การศึกษาค่าคงที่ของโครงสร้างโดยวิธีการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์	52
4.1	การเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์โดยผลึก	52
4.1.1	กฎของแบรกก์	53
4.1.2	เงื่อนไขของลาวเอ	54
4.1.3	รีซีเพรเคิลแลททิส	56
4.1.4	ความสัมพันธ์ระหว่างเงื่อนไขของลาวเอกฎของ แบรกก์กับรีซีเพรเคิลแลททิส	59
4.2	การเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์โดยผลึกผงในกล้องเดอบาย- เชอร์เรอร์	62

4.2.1	ลักษณะกล้อง เตอบาย-เซอร์เรอร์	67
4.2.2	การหาค่าคงที่ของ โครงผลึกในระบบคิวบิกแบบ แม่นยำจากภาพถ่ายผลึกผงของกล้อง เตอบาย- เซอร์เรอร์	70
4.2.3	การหาค่าคงที่ของ โครงผลึกในระบบเตตระ- โกนัล จากภาพถ่ายผลึกผงของกล้อง เตอบาย- เซอร์เรอร์	89
4.3	การเลี้ยวเบนรังสี เอ็กซ์โดยผลึกผงในกล้องกีเนียร์-เฮกท์	93
4.3.1	ลักษณะกล้องกีเนียร์-เฮกท์	97
4.3.2	การหาค่าคงที่ของ โครงผลึก จากภาพถ่ายผลึก ผงของกล้องกีเนียร์-เฮกท์	98
4.4	การเลี้ยวเบนรังสี เอ็กซ์โดยผลึกผงในเครื่องดิฟแฟรค- โตมิเตอร์	99
5.	วิธีการทดลองและผลการทดลอง	102
5.1	การเตรียมโลหะผสมกึ่งตัวนำ $AgIn_{0.8}Ga_{0.2}Te_{2(1-z)}$ Se_{2z}	102
5.1.1	การคำนวณน้ำหนักของธาตุต่าง ๆ	102
5.1.2	การชั่งและบรรจุธาตุต่าง ๆ	105
5.1.3	การทำให้ภายในหลอดเป็นสุญญากาศและการ หลอมปิดหลอด	105
5.1.4	การหลอมลึ่สาร	107
5.1.5	การแอนนีลลึ่สาร	108
5.2	การหาค่าคงที่ของ โครงผลึกโดยกล้องกีเนียร์-เฮกท์ และ เครื่องดิฟแฟรคโตมิเตอร์	111

5.2.1	การเตรียมสารเพื่อถ่ายภาพ	111
5.2.2	รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของผลึกผง	112
5.2.3	การพิจารณาลักษณะของผลึกจากรูปแบบการ เลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์	115
5.2.4	การคำนวณค่าคงที่โครงผลึกของโลหะผลึกกึ่ง ตัวนำ	115
5.3	การหาค่าคงที่โครงผลึกโดยกล้องเดอบาย-เชอร์เรอร์ แบบจุดหมุนสูง	125
5.3.1	การเตรียมสารเพื่อถ่ายภาพและขั้นตอนการถ่าย ภาพ	125
5.3.2	รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของผลึกผง ...	129
5.3.3	การสร้างกราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงค่าคงที่- โครงผลึกของซิลิกอนที่ใช้เป็นสารมาตรฐาน จากอุณหภูมิ 27.0°C ถึง 585 °C	129
5.3.4	การคำนวณค่าคงที่โครงผลึกของโลหะผลึกกึ่งตัว นำที่อุณหภูมิต่าง ๆ	136
5.4	การศึกษาโครงสร้างของผลึกเดี่ยวโดยวิธีการเลี้ยวเบน รังสีเอ็กซ์	161
5.4.1	การเลือกผลึกเดี่ยวและติดผลึกบนหัวโกนไดโอ- มิเตอร์	161
5.4.2	การปรับแกนผลึกให้เป็นแกนหมุน	163
5.4.3	การถ่ายภาพออสซิลเลชัน	168
5.4.4	การถ่ายภาพไวซ์เชนเบอร์ก	172
5.4.5	การถ่ายภาพฟรีเซล์สัน	178

5.4.6	การหาค่าความหนาแน่น, จำนวนหน่วยสูตร ในหนึ่งหน่วยเซลล์ และสัมประสิทธิ์การดูดกลืน รังสี เอ็กซ์เรย์ เส้นของโลหะผสมกึ่งตัวนำ $AgIn_{0.8}Ga_{0.2}Te_{1.6}Se_{0.4}$	194
5.4.7	หมุ่ลุ่มมาตรฐานสามมิติ	196
5.4.8	การรวบรวมข้อมูลความเข้มรังสี เอ็กซ์	201
5.4.9	การคำนวณวงโคจรสร้างผลึก	203
5.4.10	การคำนวณหาตำแหน่งอะตอมโดยใช้ฟังก์ชัน- แพทเทอร์สัน	206
5.4.11	การปรับโครงสร้าง	216
6.	สรุปและวิจารณ์ผลการทดลอง	222
	เอกสารอ้างอิง	248
	ภาคผนวก ก.	251
	ภาคผนวก ข.	263
	ประวัติผู้เขียน	265

รายการตารางประกอบ

ตารางที่	หน้า
2.1 ระบบผลึก 7 ระบบ และ 14 บราวเวล์แลททิล	10
2.2 คาร์คัม โคเวเลนท์ในหน่วยอังก์ตรอมของโครงสร้างแบบ เตตระฮีดรัลที่หาโดยชานอน-พริวทท์, เพาลิง และฟิลลิปส์ ...	14
3.1 ลักษณะรูปแบบเส้นการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของผลึกผงของเพชร (จาก JCPDS powder diffraction file)	35
3.2 ลักษณะรูปแบบเส้นการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของผลึกผงของแกรฟ- ไฟต์ (จาก JCPDS powder diffraction file)	37
3.3 ลักษณะรูปแบบเส้นการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของผลึกผงของสฟา- เลอไรท์ (จาก JCPDS powder diffraction file) ...	39
3.4 ลักษณะรูปแบบเส้นการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของผลึกผงของเวอร์ท- ไชท์ (จาก JCPDS powder diffraction file)	41
3.5 ลักษณะรูปแบบเส้นการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของผลึกผงของซาล- โคไฟไรท์ (จาก JCPDS powder diffraction file) ..	43
3.6 ค่าคงที่โครงผลึก (a, c) ของสารประกอบ I-III-VI ₂ ...	44
3.7 วิธีการเตรียมสารประกอบพวก I-III-VI ₂ โดยใช้เทคนิคแบบ ต่าง ๆ โดย CVD คือวิธีการพาสารประกอบด้วยไอสารเคมี พวกสารเคมีที่ใช้เป็นพวก I ₂ หรือ Cl ₂ ; M คือวิธีหลอมโดย ตรงและแอนนิลหรือใช้เทคนิคของบริดจ์แมน	51

ตารางที่		หน้า
4.1	ตารางเปรียบเทียบค่าของ A ที่คำนวณได้โดยวิธีของโตเรค- ลัตริกกับวิธีการของแบรดเลย์	76
4.2	ค่าของ $\Delta r/r$ สำหรับแหล่งกำเนิดรังสีเอ็กซ์ให้ลำรังสีเอ็กซ์ ออกมาแบบขนาน	79
4.3	ค่าของ $\Delta r/r$ ของแหล่งกำเนิดรังสีเอ็กซ์ให้ลำรังสีเอ็กซ์ ออกมาแบบเป็นจุดโฟกัส	
	ก. เมื่อ R = 45 มิลลิเมตร, AO = 100 มิลลิเมตร .	83
	ข. เมื่อ R = 95 มิลลิเมตร, AO = 150 มิลลิเมตร .	83
5.1	ข้อมูลเบื้องต้นของธาตุต่าง ๆ ที่ต้องใช้	103
5.2	น้ำหนักของธาตุต่าง ๆ ที่คำนวณได้ ของสารทั้ง 6 ที่ต้องเตรียม ซึ่งมีน้ำหนักรวม 1 กรัม	104
5.3	ลักษณะหลอดและวิธีการหลอมของสารต่าง ๆ ตลอดจนลักษณะ ของสารที่ได้ภายหลังกการหลอม	109
5.4	ลักษณะของสารต่าง ๆ ที่ได้ภายหลังจากการแอนนีกัล และวิธี การแอนนีกัล	110
5.5	$(S - S_o)_{cal}$, θ และ hkl ของเส้นการเลี้ยวเบนรังสี- เอ็กซ์ จากซิลิกอน ซึ่งใช้เป็นสารมาตรฐาน	116
5.6	ก. ค่า hkl , $(S - S_o)_{obs}$, $(S - S_o)_{cor}$, d_{cor} , d_{cal} $(\sin^2\theta)_{cor}$, $(\sin^2\theta)_{cal}$ และ $\Delta\sin^2\theta$ จาก ภาพถ่ายผลึกผง $AgIn_{0.8}Ga_{0.2}Te_2$ ที่ใช้กล้องกีเนียร์- เฮกกี	119

ตารางที่

หน้า

ข. ค่า hkl , $(S - S_o)_{obs}$, $(S - S_o)_{cor}$, d_{cor} , d_{cal}
 $(\sin^2\theta)_{cor}$, $(\sin^2\theta)_{cal}$ และ $\Delta\sin^2\theta$ จาก
 ภาพถ่ายผลึกผง $AgIn_{0.8}Ga_{0.2}Te_{1.6}Se_{0.4}$ ที่ใช้
 กล้องกีเนียร์-เฮกท์

120

ค. ค่า hkl , $(S - S_o)_{obs}$, $(S - S_o)_{cor}$, d_{cor} , d_{cal}
 $(\sin^2\theta)_{cor}$, $(\sin^2\theta)_{cal}$ และ $\Delta\sin^2\theta$ จาก
 ภาพถ่ายผลึกผง $AgIn_{0.8}Ga_{0.2}Te_{1.2}Se_{0.8}$ ที่ใช้
 กล้องกีเนียร์-เฮกท์

121

ง. ค่า hkl , $(S - S_o)_{obs}$, $(S - S_o)_{cor}$, d_{cor} , d_{cal}
 $(\sin^2\theta)_{cor}$, $(\sin^2\theta)_{cal}$ และ $\Delta\sin^2\theta$ จาก
 ภาพถ่ายผลึกผง $AgIn_{0.8}Ga_{0.2}Te_{0.8}Se_{1.2}$ ที่ใช้
 กล้องกีเนียร์-เฮกท์

122

จ. ค่า hkl , $(S - S_o)_{obs}$, $(S - S_o)_{cor}$, d_{cor} , d_{cal}
 $(\sin^2\theta)_{cor}$, $(\sin^2\theta)_{cal}$ และ $\Delta\sin^2\theta$ จาก
 ภาพถ่ายผลึกผง $AgIn_{0.8}Ga_{0.2}Te_{0.4}Se_{1.6}$ จาก
 กล้องกีเนียร์-เฮกท์

123

ฉ. ค่า hkl , $(S - S_o)_{obs}$, $(S - S_o)_{cor}$, d_{cor} , d_{cal}
 $(\sin^2\theta)_{cor}$, $(\sin^2\theta)_{cal}$ และ $\Delta\sin^2\theta$ จาก
 จากถ่ายผลึกผง $AgIn_{0.8}Ga_{0.2}Se_2$ จากกล้อง
 กีเนียร์-เฮกท์

124

5.7

ขั้นตอนการคำนวณ θ จากเส้นการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์
 ที่ปรากฏบนฟิล์มภาพถ่ายการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของผลึกผง
 ซิลิกอน ที่ $28.8^\circ C$ ด้วยกล้องเดอบาย-เชอร์เรอร์ แบบ
 อุณหภูมิสูง UNICAM S. 70 ซึ่งบรรจุฟิล์มแบบเบรตเลย์
 และแบรกก์

132

ตารางที่		หน้า
5.8	ขั้นตอนการคำนวณมุม θ โดยใช้ข้อมูลจากภาพถ่ายการเลี้ยว- เบนรังสีเอ็กซ์ ที่อุณหภูมิ 100 °C ของ $\text{AgIn}_{0.8}\text{Ga}_{0.2}$ Te_2	139
5.9	ก. ข้อมูลของการคำนวณค่าคงที่โครงสร้างผลึกของ $\text{AgIn}_{0.8}$ $\text{Ga}_{0.2}\text{Te}_2$ ที่อุณหภูมิ 28.5 °C ถึง 480 °C	140
	ข. ข้อมูลของการคำนวณค่าคงที่โครงสร้างผลึกของ $\text{AgIn}_{0.8}$ $\text{Ga}_{0.2}\text{Te}_{1.6}\text{Se}_{0.4}$ ที่อุณหภูมิ 28.7 °C ถึง 560 °C	143
	ค. ข้อมูลของการคำนวณค่าคงที่โครงสร้างผลึกของ $\text{AgIn}_{0.8}$ $\text{Ga}_{0.2}\text{Te}_{1.2}\text{Se}_{0.8}$ ที่อุณหภูมิ 28.5 °C ถึง 490 °C	147
	ง. ข้อมูลของการคำนวณค่าคงที่โครงสร้างผลึกของ $\text{AgIn}_{0.8}$ $\text{Ga}_{0.2}\text{Te}_{0.8}\text{Se}_{1.2}$ ที่อุณหภูมิ 28.6 °C ถึง 446 °C	151
	จ. ข้อมูลของการคำนวณค่าคงที่โครงสร้างผลึกของ $\text{AgIn}_{0.8}$ $\text{Ga}_{0.2}\text{Te}_{0.4}\text{Se}_{1.6}$ ที่อุณหภูมิ 27.0 °C ถึง 400 °C	155
	ฉ. ข้อมูลของการคำนวณค่าคงที่โครงสร้างผลึกของ $\text{AgIn}_{0.8}$ $\text{Ga}_{0.2}\text{Se}_2$ ที่อุณหภูมิ 27.0 °C ถึง 550 °C	158
5.10	ก. ค่าคงที่โครงสร้างผลึกตามแกน c จากภาพถ่ายออสซิลเลชัน เมื่อใช้ CuK_α ($\lambda = 1.54059 \text{ \AA}$)	171
	ข. ค่าคงที่โครงสร้างผลึกตามแกน c จากภาพถ่ายออสซิลเลชัน เมื่อใช้ MoK_α ($\lambda = 0.71069 \text{ \AA}$)	171

ตารางที่		หน้า
5.11	ค่าของระยะการเลื่อนตัวกันเส้นเลย์เออร์ที่ n (S_n) และมุมที่ต้องเอียงกล้องเพื่อถ่ายภาพเลย์เออร์ที่ n (μ_n)	173
5.12	ค่าคงที่โคจรผลึกตามแกน a และ b ซึ่งเท่ากัน คำนวณจากภาพถ่ายไวซ์เซินเบอร์ก เมื่อใช้ $M\alpha_K$ ($\lambda = 0.71069\text{\AA}$) ตามรูป 5.23 ก.	178
5.13	ก. ค่า $\bar{\mu}$, r_s , Δ , S และเวลาที่ใช้ สำหรับถ่ายภาพฟริเซลล์ชั้นในแต่ละเลย์เออร์ โดยมีแกน a เป็นแกนฟริเซลล์ และใช้รังสีเอ็กซ์ $M\alpha_K$ ($\lambda = 0.71069 \text{\AA}$) .	188
	ข. ค่า $\bar{\mu}$, r_s , Δ , S และเวลาที่ใช้ สำหรับถ่ายภาพฟริเซลล์ชั้นในแต่ละเลย์เออร์ โดยมีแกน b เป็นแกนฟริเซลล์ และใช้รังสีเอ็กซ์ $M\alpha_K$ ($\lambda = 0.71069 \text{\AA}$)	188
5.14	ค่าคงที่โคจรผลึกตามแกน a และ b ซึ่งเท่ากัน คำนวณจากภาพถ่ายฟริเซลล์ชั้น ตามรูป 5.31 ก. และ ข.	193
5.15	ค่าคงที่โคจรผลึกตามแกน c คำนวณจากภาพถ่ายฟริเซลล์ชั้น ตามรูป 5.31 ก. และ ข.	193
5.16	ผลการทดลองเพื่อหาค่าความหนาแน่นของโลหะผสมกึ่งตัวนำ $AgIn_{0.8}Ga_{0.2}Te_{1.6}Se_{0.4}$ ณ ที่อุณหภูมิห้อง $27.0^\circ C$.	195
5.17	การหาค่าสัดส่วนโดยน้ำหนักของอะตอม Ag , In , Ga , Te , Se ต่อน้ำหนักรวมของโลหะผสมกึ่งตัวนำ $AgIn_{0.8}Ga_{0.2}Te_{1.6}Se_{0.4}$	196
5.18	เงื่อนไขการพบจุดสะท้อนที่ปรากฏในระนาบรีซีเพอเคิล-แลททิสเลย์เออร์ต่าง ๆ	200

ตารางที่		หน้า
5.19	ค่าดัชนีผลเลออร์ของระนาบที่ปิดล้อมผลึก และระยะทางจากจุดกำเนิดถึงระนาบ	206
5.20	อาร์เกออร์เวคเตอร์ที่ตำแหน่งพิเศษ 4a, 4b และ 8d ของหมู่สมมาตรสามมิติ $I\bar{4}2d$	208
5.21	ค่าแฟคเตอร์สเกล และดัชนีความถูกต้องของแฟคเตอร์สเกล	219
5.22	ค่า $ F_o _{hkl}$ และ $ F_c _{hkl}$ ของจุดสะท้อน hkl หลังจากการคำนวณปรับโครงสร้างผลึก $AgIn_{0.8}Ga_{0.2}Te_{1.6}Se_{0.4}$ สิ้นสุดลง	220
6.1	ค่าคงที่โครงสร้างผลึก a, c และ c/a ของโลหะผสมกึ่งตัวนำ ทั้ง 6 สสาร	224
6.2	ค่าคงที่โครงสร้างผลึก a, c ของสารประกอบ $AgGaSe_2$, $AgGaTe_2$, $AgInSe_2$ และ $AgInTe_2$ ของนักวิทยาศาสตร์ต่าง ๆ	226
6.3	ค่าคงที่โครงสร้างผลึก a, c และ c/a ของโลหะผสมกึ่งตัวนำ ทั้ง 6 สสาร ณ อุณหภูมิระหว่าง 27.0 °C ถึง 560 °C .	232
6.4	ค่าอัตราการเพิ่มค่าคงที่โครงสร้างผลึก a ของโลหะผสมกึ่งตัวนำ แต่ละสสารในช่วงของอุณหภูมิ 27.0 °C ถึง 200 °C กับ ในช่วงของอุณหภูมิ 300 °C ถึงมีการเปลี่ยนแปลงไป	240
6.5	ข้อมูลผลึกทั่วไปของโลหะผสมกึ่งตัวนำ $AgIn_{0.8}Ga_{0.2}Te_{1.6}Se_{0.4}$	242
6.6	โคออร์ดิเนตพิเศษส่วนของอะตอม Ag, $(In_{0.8}Ga_{0.2})$ และ $(Te_{0.8}Se_{0.2})$ ภายในหนึ่งหน่วยเซลล์ของผลึกโลหะผสมกึ่งตัวนำ $AgIn_{0.8}Ga_{0.2}Te_{1.6}Se_{0.4}$	243

ตารางที่		หน้า
6.7	โคออร์ดิเนตเศษส่วนของอะตอม Cu, Fe และ S ภายใน หนึ่งหน่วยเซลล์ของผลึก $CuFeS_2$ ที่ทำโดยฮอลล์และสจีวิต	246
6.8	ค่า λ (เมื่อค่า hk มีค่าคงที่ตามที่กำหนดให้) ค่า $ F_o \times 10$ และ $ F_c \times 10$ ของจุดสะท้อน hkl หลังจากปรับโครงสร้างผลึก $CuFeS_2$ สิ้นสุดลง โดยค่าที่ มีเครื่องหมาย * อยู่จะแสดงว่าเป็นจุด hkl ที่สังเกตไม่ ได้ ส่วนพวกที่มีเครื่องหมาย E อยู่จะแสดงว่าเป็นจุด hkl ที่ไม่ใช่ในการปรับโครงสร้าง	246

รายการรูปประกอบ

รูปที่		หน้า
1.1	แผนภาพแสดงสัดส่วนขององค์ประกอบสำหรับสาร $\text{AgIn}_{(1-y)}\text{Ga}_y\text{Te}_{2(1-z)}\text{Se}_{2z}$ ดังเช่นเส้นที่ 2 สูตรของโลหะผสมกิ่งตัวนำตามตำแหน่งแสดงด้วยจุดทั้ง 6 จากซ้ายไปขวา คือ $\text{AgIn}_{0.8}\text{Ga}_{0.2}\text{Te}_2$, $\text{AgIn}_{0.8}\text{Ga}_{0.2}\text{Te}_{1.6}\text{Se}_{0.4}$, $\text{AgIn}_{0.8}\text{Ga}_{0.2}\text{Te}_{1.2}\text{Se}_{0.8}$, $\text{AgIn}_{0.8}\text{Ga}_{0.2}\text{Te}_{0.8}\text{Se}_{1.2}$, $\text{AgIn}_{0.8}\text{Ga}_{0.2}\text{Te}_{0.4}\text{Se}_{1.6}$ และ $\text{AgIn}_{0.8}\text{Ga}_{0.2}\text{Se}_2$ ตามลำดับ	3
2.1	แสดงการตัดเรียงทรงกลมแบบโคลล์เล่ส์ที่เพ็คคิง	6
2.2	แสดงการตัดเรียงทรงกลมแบบโคลล์เล่ส์ที่เพ็คคิงของชั้นที่หนึ่งกับชั้นที่สอง	7
2.3	การตัดเรียงทรงกลมแบบเอ็กเซ็กโกนัลโคลล์เล่ส์ที่เพ็คคิง	8
2.4	การตัดเรียงทรงกลมแบบเฟล้เซินเตอร์คิวบิกโคลล์เล่ส์ที่เพ็คคิง ..	8
2.5	แสดงชุดของระนาบที่ขนานกัน 3 ชุดตัดกันเป็นแลททิส โดยมีจุดแลททิส และแสดงหนึ่งหน่วยเซลล์	9
2.6	ความยาวพันธะและมุมพันธะในการยึดกันแบบเตตระฮีดรัล	11
2.7	ลักษณะผลึกใน 2 มิติ ที่มีความไม่สมบูรณ์ในลักษณะเป็นจุด	15
2.8	ลักษณะผลึกแบบไอโอดีนใน 2 มิติที่มีความไม่สมบูรณ์ในลักษณะเป็นจุด	16
2.9 ก.	แสดงลักษณะความไม่สมบูรณ์ของผลึกในลักษณะเป็นเส้นในแบบการเคลื่อนของขอบ	17

รูปที่	หน้า
2.9 ข. แสดงลักษณะความไม่สมบูรณ์ของผลึกในลักษณะเป็น เส้นในแบบการเคลื่อนแบบลึกร	17
2.10 ก. แสดงระนาบ 2 ระนาบของแลททิซแบบคิวบิกที่อยู่ติดต่อกัน ณ บริเวณกึ่งกลางกัอนผลึก	18
ข. แสดงการบิดเบี้ยวของแลททิซโดยที่ตัดแบ่งผลึกออกเป็น 4 ส่วน	18
2.11 ก. แสดงรูป 2.10 ก. เมื่อมองจากด้านบนกัอนผลึก	19
ข. แสดงรูป 2.10 ข. เมื่อมองจากด้านบนกัอนผลึก	19
2.12 ก. แสดง 4 หน่วยเซลล์ของคิวบิกแลททิซ	20
ข. แสดงถึงการเกิดการเคลื่อนแบบลึกรแบบทวนเข็มนาฬิกา ณ ที่จุด C	20
2.13 ก. แสดงการเกิดบิดเบี้ยวของหนึ่งในสี่ส่วนของรูป 2.10 ก. .	21
ข. แสดงการเกิดการเคลื่อนของขอบของรูป 2.13 ก. ภายหลังจากเกิดการบิดเบี้ยวเรียบร้อยแล้ว	21
2.14 แสดงการเกิดความเครียดแบบการดึงในบริเวณที่แลเงาจาก ๆ และเกิดความเครียดแบบความกดตันในบริเวณแลเงาเข้ม ๆ แล้วทำให้เกิดการเคลื่อนของขอบ	22
2.15 แสดงรูปในบริเวณที่มีการเคลื่อน โดยแสดงการอธิบายเป็นในรูป 2 เวกเตอร์ คือ เวกเตอร์ \vec{c} กับ \vec{b}	23
2.16 แสดงวงจรปิด 2 วงจรขนาด 5 x 5 ของบริเวณที่มีการเคลื่อนของขอบ (ด้านหน้า) และของบริเวณที่มีการเคลื่อนแบบลึกร (ด้านแลเงา)	24
2.17 ก. แสดงการเลื่อนของระนาบจากขวาไปซ้าย: เนื่องจากการเคลื่อนของขอบอย่างเดี่ยว	25

รูปที่	หน้า
2.17	ข. แสดงการเลื่อนของระนาบจากขวาไปซ้าย เนื่องจากการเคลื่อนแบบสักรูอย่างเดี่ยว 25
2.18	การเกิดระนาบเลื่อนตรงบริเวณเส้น ๆ ที่เห็นในรูปของโลหะผสมทองแดง 93% กับอลูมิเนียม 7% โดยน้ำหนัก รูป ก. กำลังขยาย 400 เท่า รูป ข. กำลังขยาย 200 เท่า 26
2.19	ก. แสดงภาพ 2 มิติของความไม่สมบูรณ์ของผลึกบนพื้นผิว พร้อมทั้งแสดง เกรนบาวนด์ตากับความไม่สมบูรณ์ของผลึกในลักษณะต่าง ๆ 27
	ข. แสดงแผนที่ของรูป ก. โดยใช้เส้นทึบแสดงเกรนบาวนด์ตาร \perp แสดงลักษณะการเคลื่อนของขอบ, \lrcorner L แสดงลักษณะการเคลื่อนของขอบขยายกันออกไปตามแนวนั้น และ \square แสดงการเกิดช่องว่างหรือเว.เคินซี. 27
2.20	ก. แสดงระนาบทริน และทิศทางทรินในเฟลล์เซ็นเตอร์ คิวบิกแลททิส 28
	ข. แสดงขอบวนการเกิดทรินในระนาบ (110) ในเฟลล์เซ็นเตอร์ คิวบิก แลททิส 28
2.21	ภาพถ่ายของโลหะ 70% Cu, 30% Zn แสดงให้เห็นแถบของการเกิดทรินในเกรนของผลึก 29
3.1	ค่าความต้านทานไฟฟ้าแตกต่างกันของลัทธิตัวนำ ลัทธิกึ่งตัวนำ และฉนวน 30
3.2	แสดงพันธะเชิงสี่ของลัทธิกึ่งตัวนำ Si หรือ Ge ที่แต่ละอะตอมจะมีอะตอมอื่น ๆ อีกสี่อะตอมล้อมรอบ 31
3.3	ก. การจัดเรียงตัวของอะตอมในโครงสร้างเพชร 35

รูปที่	หน้า
3.3	<p>ข. ส่วนหนึ่งในรูปแบบ 3.3 ก. ซึ่งมีการยึดกันระหว่างอะตอมแบบพันธะเชิงสี่ 35</p> <p>ค. 4 หน่วยเซลล์ของโครงสร้างเพชรพร้อมทั้งแสดงตำแหน่งที่อยู่ของอะตอม C 35</p>
3.4	<p>ก. การตัดเรียงตัวของอะตอมในโครงสร้างแกรไฟไฟต์ 36</p> <p>ข. 4 หน่วยเซลล์ของโครงสร้างแกรไฟไฟต์พร้อมทั้งแสดงตำแหน่งที่อยู่ของอะตอม C 36</p>
3.5	<p>ก. การตัดเรียงตัวของอะตอมในโครงสร้างสฟาเลอไรท์หรือซิงค์เบลนด์ 38</p> <p>ข. ตำแหน่งที่อยู่ของอะตอม Zn กับ S ในหนึ่งหน่วยเซลล์ของสฟาเลอไรท์ 38</p>
3.6	<p>ก. การตัดเรียงตัวของอะตอมในโครงสร้างเวอร์ไชท์ 40</p> <p>ข. ตำแหน่งที่อยู่ของอะตอม Zn กับ S ในหนึ่งหน่วยเซลล์ของเวอร์ไชท์ 40</p>
3.7	<p>ก. การตัดเรียงตัวของอะตอมในโครงสร้างแบบซาลโคไพไรท์ของสารประกอบกึ่งตัวนำ I-III-VI₂ และลักษณะตำแหน่งที่อยู่ของอะตอมของกลุ่ม I, III และ VI ในหน่วยเซลล์ของโครงสร้างซาลโคไพไรท์ 42</p>
3.8	<p>การเพิ่มและลดอุณหภูมิตามวิธีการหลอมสารแบบบริดจ์แมน 47</p>
3.9	<p>ความไม่สมบูรณ์ของผลึกที่มีรอยแตก, มีช่องว่าง และทวินของผลึก CuInSe₂ ที่ได้จากการเตรียมแบบเทคนิคของบริดจ์แมน .. 48</p>
3.10	<p>รูปผลึก CuInSe₂ ที่เตรียมได้ตามวิธีเตรียมแบบ CVD โดยใช้ไอโอดีนเป็นตัวพาสารประกอบ ผลึกมีลักษณะเป็นแผ่น 50</p>

รูปที่		หน้า
4.11	ส่วนประกอบของกล้องเดอบาย-เซอร์เรอร์ แบบจุดหมุนสูง UNICAM S.70	67
4.12	ก. ส่วนควบคุมในการป้อนกระแสไฟฟ้าให้กับเครื่องมือต่าง ๆ ของกล้องถ่ายภาพการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ โดยผลึกของ แบบจุดหมุนสูง UNICAM S.70 และเครื่องวัดจุดหมุนที่ใช้ ต่อกับเทอร์โมคัพเพิล	68
	ข. วงจรภายในส่วนควบคุมในการป้อนกระแสไฟฟ้า	68
4.13	การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ทางด้านที่มีค่า 2θ เข้าใกล้ 180° .	71
4.14	การเกิดความคลาดเคลื่อน เนื่องจากการจัดวางผลึกผงไม่อยู่ ที่กึ่งกลางกล้อง	72
4.15	พื้นที่ภาพตัดขวางของตัวผลึกผงรูปทรงกระบอก ซึ่งภายในถูกทำ เป็นเส้นทางที่มีค่า b คงที่ และมีช่วงของ b ของแต่ละเส้น เท่ากับ $0.1 r$	76
4.16	ภาพตัดขวางของตัวผลึกผงรูปทรงกระบอกซึ่งถูกแบ่งเป็นช่วงเล็ก ๆ ตามแนวขนานกับแนวการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์พร้อมทั้งกราฟแสดงการ กระจายของค่าความเข้มในแถบรังสีเอ็กซ์ที่เลี้ยวเบนออกมา θ ที่ $\theta = 22\frac{1}{2}^\circ, \mu r = 2.0$	77
4.17	การกระจายค่าความเข้มในแถบรังสีเอ็กซ์ที่เลี้ยวเบนออกมา θ ที่ มุม $\theta = 0^\circ, 22.5^\circ, 45^\circ, 67.5^\circ$ และ 90° กับค่าของ $\mu r = 0, 1.0, 2.0$ และ 4.0 โดยที่แหล่งกำเนิดรังสีเอ็กซ์ ให้รังสีเอ็กซ์ออกมาแบบขนาน	78
4.18	ภาพตัดขวางของผลึกผงรูปทรงกระบอก ซึ่งถูกแบ่งเป็นช่วงเล็ก ๆ ตามแนวขนานกับแนวรังสีเอ็กซ์ที่ตกกระทบ พร้อมทั้งกราฟแสดง การกระจายของค่าความเข้มในแถบรังสีเอ็กซ์ที่เลี้ยวเบนออกมา	80

รูปที่		หน้า
4.19	การกระจายค่าความเข้มในแถบรังสีเอ็กซ์ที่เลี้ยวเบนออกมาซึ่งเกิดขึ้นจากแหล่งกำเนิดรังสีให้รังสีเอ็กซ์ออกมาแบบเป็นจุดโฟกัสของลำรังสีเอ็กซ์ โดยคำนวณ ณ ที่ $\theta = 45^\circ$, $\mu_r = 2.0$, $R = 45$ มิลลิเมตร, $AO = 100$ มิลลิเมตร	81
4.20	การเปรียบเทียบความแตกต่างกันของขอบเขตในแถบความเข้ม ซึ่งเกิดจากแหล่งกำเนิดรังสีเอ็กซ์แบบขนาน และแบบเป็นจุดโฟกัสเมื่อ $AO = 150$ มิลลิเมตร, $R = 95$ มิลลิเมตร, $\mu_r = 2.0$	82
4.21	การกระจายค่าความเข้มในแถบรังสีเอ็กซ์ที่เลี้ยวเบนออกมาซึ่งเกิดจากแหล่งกำเนิดรังสีเอ็กซ์แบบเป็นเส้นโฟกัสของลำรังสีเอ็กซ์ เมื่อ $R = 95.0$ มิลลิเมตร, $AO = 150$ มิลลิเมตร, $r = 0.25$ มิลลิเมตร, $\mu_r = 2.0$, $\theta = 22\frac{1}{2}^\circ$ รูป ก. เมื่อ θ ที่ตำแหน่งต่าง ๆ บนเส้นโฟกัสมีค่าความเข้มแบบเอ็กซ์โพเนนเชียล $\exp(-k^2x^2)$ รูป ค. เมื่อ θ ที่ตำแหน่งต่าง ๆ บนเส้นโฟกัสมีค่าความเข้มแบบเท่ากันโดยตลอด	84
4.22	การเปรียบเทียบความแตกต่างกันของขอบเขตในแถบความเข้ม ซึ่งเกิดจากแหล่งกำเนิดรังสีเอ็กซ์แบบเป็นเส้นโฟกัส เมื่อ θ ตำแหน่งต่าง ๆ บนเส้นโฟกัสมีค่าความเข้มแบบ $\exp(-k^2x^2)$ และแบบเป็นเส้นโฟกัส เมื่อ θ ที่ตำแหน่งต่าง ๆ บนเส้นโฟกัสมีค่าความเข้มแบบเท่ากันโดยตลอด โดยที่ $R = 95.0$ มิลลิเมตร, $AO = 150$ มิลลิเมตร, $r = 0.25$ มิลลิเมตร และ $\mu_r = 2.0$	84
4.23	กราฟของ Δr กับค่าของมุม θ สำหรับ $R = 95$ มิลลิเมตร, $AO = 150$ มิลลิเมตร, $r = 0.25$ มิลลิเมตร, $\mu_r = 2.0$ โดยกราฟ	

รูปที่

หน้า

ก. ไข่แหล่งกำเนิดเป็นจุดโฟกัส

ข. ไข่แหล่งกำเนิดเป็นเส้นโฟกัส โดย ณ ที่ตำแหน่งต่าง ๆ มีความเข้มแบบ $\exp(-k^2x^2)$

ค. ไข่แหล่งกำเนิดเป็นแบบให้รังสีแบบแนวขนาน

ง. ไข่แหล่งกำเนิดเป็นเส้นโฟกัส โดย ณ ที่ตำแหน่งต่าง ๆ มีความเข้มเท่า ๆ กัน 86

4.24 หลักการของกล้องกีเนียร์-เฮกกี 94

4.25 ลักษณะของฟิล์มที่ได้จากกล้องกีเนียร์-เฮกกี ของสารตัวอย่าง ผลึกผงที่มีโครงสร้างแบบซาลโคไฟโรที ระบบผลึกแบบเตตระโกนัล ซึ่งใส่สารซิลิกอนเป็นสารมาตรฐาน 95

4.26 แผนผังการจัดตั้งเครื่องมือของกล้องกีเนียร์-เฮกกี ชนิดปรับโฟกัสของ Philips XDC-700 96

4.27 ลักษณะการจัดตั้งเครื่องมือของกล้องกีเนียร์-เฮกกี ชนิดปรับโฟกัสของ Philips XDC-700 97

4.28 ลักษณะของเครื่องดิฟแฟรคโตมิเตอร์ 99

4.29 รูปแบบของพีคที่เกิดจากการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์โดยผลึกผงซิลิกอนที่บันทึกได้จากเครื่องดิฟแฟรคโตมิเตอร์ โดยเปรียบเทียบกับที่บันทึกได้จากกล้องเดอบาย-เซอร์เรอร์ 100

5.1 การบรรจุธาตุที่แข็งแล้วลงในหลอดแก้วควอทซ์ 105

5.2 หลอดแก้วควอทซ์ที่บรรจุธาตุ ทำคอคอดแล้วนำไปดูดเอาอากาศภายในหลอดออก 106

5.3 หลอดแก้วควอทซ์ที่บรรจุธาตุและดูดอากาศออกพร้อมทั้งปิดหลอดแล้ว 107

รูปที่		หน้า
5.4	ก. วงแหวนทองแดงใช้ในการเตรียมผลึกผงเพื่อถ่ายภาพใน กล้องกีเเนียร์-เฮกท์	111
	ข. แผ่นอลูมิเนียมเคลือบผิวใช้ในการเตรียมผลึกผงเพื่อถ่าย ภาพในกล้องของเครื่องดิฟแฟรคโตมิเตอร์	112
5.5	ก. รูปแบบของการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ที่มุมแบรกก์ต่าง ๆ ที่บันทึก ได้โดยใช้กล้องกีเเนียร์-เฮกท์ของผลึกผง $AgIn_{0.8}Ga_{0.2}Te_2$, $AgIn_{0.8}Ga_{0.2}Te_{1.6}Se_{0.4}$, $AgIn_{0.8}Ga_{0.2}Te_{1.2}Se_{0.8}$, $AgIn_{0.8}Ga_{0.2}Te_{0.8}Se_{1.2}$, $AgIn_{0.8}Ga_{0.2}Te_{0.4}Se_{1.6}$, $AgIn_{0.8}Ga_{0.2}Se_2$ ตามลำดับ ซึ่งใช้เวลาในการถ่ายภาพ รูปละ $1\frac{1}{2}$ ชั่วโมง (ใช้รังสีเอ็กซ์ชนิด CuK_{α} ณ ที่ 35 กิโลโวลท์ 20 มิลลิแอมป์)	113
	ข. กราฟของการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ที่มุมของแบรกก์ (2 θ) ต่าง ๆ ที่บันทึกได้โดยใช้เครื่องดิฟแฟรคโตมิเตอร์ของผลึกผง $AgIn_{0.8}Ga_{0.2}Te_2$, $AgIn_{0.8}Ga_{0.2}Te_{1.6}Se_{0.4}$, $AgIn_{0.8}Ga_{0.2}Te_{1.2}Se_{0.8}$, $AgIn_{0.8}Ga_{0.2}Te_{0.8}Se_{1.2}$, $AgIn_{0.8}Ga_{0.2}Te_{0.4}Se_{1.6}$, $AgIn_{0.8}Ga_{0.2}Se_2$ ตาม ลำดับ ซึ่งใช้เวลาในการบันทึกข้อมูล กราฟละ $3\frac{1}{2}$ ชั่วโมง (ใช้รังสีเอ็กซ์ชนิด CuK_{α} ณ ที่ 40 กิโลโวลท์, 30 มิลลิแอมป์ ๘ Ni เป็นตัวกรอง)	114
5.6	กราฟซึ่งใช้แก้ความคลาดเคลื่อนของระยะ $(S - S_o)_{obs}$ ของ โลหะผลึกกิ่งตัวนำ $AgIn_{0.8}Ga_{0.2}Te_2$	117
5.7	การยึดผลึกบนแท่นยึดผลึกของกล้องถ่ายภาพการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ เดอบาย-เซอร์เรอร์ แบบออปติคัลสูง UNICAM S.70	126

รูปที่		หน้า
5.8	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าจากสายเทอร์โมคัพเพิลกับค่าอุณหภูมิภายในเตา	127
5.9	ฟิล์มภาพถ่ายการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของผลึกผง $AgIn_{0.8}Ga_{0.2}Te_{1.6}Se_{0.4}$ จากกล้องถ่ายภาพการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์เดอบาย-เชอร์เรอร์ ซึ่งใช้ CuK_{α_1} (1.54059 Å) ที่อุณหภูมิ 28.7°C, 95.0°C, 210°C, 292°C, 380°C และ 560°C ตามลำดับ	128
5.10	ตำแหน่งของขอบไบสมิตและเส้นการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์จากการบรรจุฟิล์มแบบแบรดเลย์และแบรกก์ในกล้องเดอบาย-เชอร์เรอร์	130
5.11	กราฟการแปรผันของค่าคงที่โครงสร้างผลึก a กับ $\frac{1}{2}(\frac{\cos^2\theta}{\sin\theta} + \frac{\cos^2\theta}{\theta})$	133
5.12	กราฟการแปรผันของค่าคงที่โครงสร้างผลึก a กับ $\cos^2\theta$	133
5.13	การเปลี่ยนแปลงค่าคงที่โครงสร้างผลึกของซิลิกอน (a) กับอุณหภูมิ (T) ..	135
5.14	กราฟใช้แก้ความคลาดเคลื่อนของ $(\sin^2\theta)_{obs}$	138
5.15	แบบจำลองของผลึกที่มีรูปร่างและขนาด (มิลลิเมตร) ที่ใกล้เคียงผลึกจริง ๆ	162
5.16	หัวโกนโอมิเตอร์มีผลึกเดี่ยวติดยึดอยู่กับใยแก้ว	163
5.17	มุม และทิศทางที่ต้องปรับอาร์ค	164
5.18	วิธีดับเบลอออสซิลเลชันของผลึกที่ต้องการปรับ มีอาร์คอยู่ในตำแหน่ง 45° กับรังสีเอ็กซ์	
	ก. ลักษณะของอาร์คที่ถ่ายภาพออสซิลเลชัน	165
	ข. จุดสะท้อน R และ \bar{R} ลอดคล้องกับ A และ \bar{A}	165
5.19	เส้นเลย์เออร์ที่ปรากฏบนฟิล์มที่ถ่ายโดยวิธีดับเบลอออสซิลเลชัน	167

รูปที่		หน้า
5.20	ภาพถ่ายออลส์ซิลเลชันรอบแกน c ในช่วง ± 100 องศา ของ โลหะผสมกึ่งตัวนำ $\text{AgIn}_{0.8}\text{Ga}_{0.2}\text{Te}_{1.6}\text{Se}_{0.4}$ ใช้รังสีเอ็กซ์ ชนิด CuK_α ณ ที่ 35 กิโลโวลท์, 20 มิลลิแอมป์ มี Ni เป็นตัวกรอง ก. ใช้เวลา 39 ชั่วโมง ข. ใช้เวลา 110 ชั่วโมง	169
5.21	ภาพถ่ายออลส์ซิลเลชันรอบแกน c ในช่วง ± 100 องศา ของโลหะ โลหะผสมกึ่งตัวนำ $\text{AgIn}_{0.8}\text{Ga}_{0.2}\text{Te}_{1.6}\text{Se}_{0.4}$ ใช้รังสีเอ็กซ์ ชนิด CuK_α ณ ที่ 50 กิโลโวลท์, 14 มิลลิแอมป์ มี Zr เป็นตัวกรอง ก. ใช้เวลา 39 ชั่วโมง ข. ใช้เวลา 110 ชั่วโมง	170
5.22	มุม μ ที่ต้องเอียงกล้อง และความสัมพันธ์ของระยะระหว่างเลเยอร์ที่ 0 ถึงเลเยอร์ที่ n (r_n) กับระยะทางบนฟิล์มจากเลเยอร์ที่ 0 ถึงเลเยอร์ที่ n (y_n) ในรีซีเพอเคิลแลททิส ตามวิธีการถ่ายภาพแบบไวซ์เซ็นเบิร์ก	172
5.23	ก. ภาพถ่ายไวซ์เซ็นเบิร์ก $hk0$ สำหรับเลเยอร์ที่ 0 ของผลึก $\text{AgIn}_{0.8}\text{Ga}_{0.2}\text{Te}_{1.6}\text{Se}_{0.4}$ เพื่อให้ผลึกหมุนรอบแกน c โดยใช้รังสีเอ็กซ์ ชนิด MoK_α ณ ที่ 50 กิโลโวลท์ 14 มิลลิแอมป์ มี Zr เป็นตัวกรองใช้เวลา 200 ชั่วโมง .	174
	ข. ภาพถ่ายไวซ์เซ็นเบิร์ก $kh2$ สำหรับเลเยอร์ที่ 2 ของผลึก $\text{AgIn}_{0.8}\text{Ga}_{0.2}\text{Te}_{1.6}\text{Se}_{0.4}$ เพื่อให้ผลึกหมุนรอบแกน c โดยใช้รังสีเอ็กซ์ชนิด MoK_α ณ ที่ 50 กิโลโวลท์ 14 มิลลิแอมป์ มี Zr เป็นตัวกรอง ใช้เวลา 200 ชั่วโมง .	175
	ค. ภาพถ่ายไวซ์เซ็นเบิร์ก $hk4$ สำหรับเลเยอร์ที่ 4 ของผลึก $\text{AgIn}_{0.8}\text{Ga}_{0.2}\text{Te}_{1.6}\text{Se}_{0.4}$ เพื่อให้ผลึกหมุนรอบแกน c โดยใช้รังสีเอ็กซ์ชนิด MoK_α ณ ที่ 50 กิโลโวลท์ 14 มิลลิแอมป์ มี Zr เป็นตัวกรอง ใช้เวลา 200 ชั่วโมง	176

รูปที่		หน้า
5.24	จุดสะท้อนที่เกิดขึ้นบนภาพถ่ายไวซ์เซ็นเบอร์ก	
	ก. จุดสะท้อน P และ Q ห่างเส้นกึ่งกลางเท่ากัน	177
	ข. การเกิดจุดสะท้อนบนฟิล์ม	177
5.25	ระนาบรีซีเพรเอเคิลที่ยังไม่ได้ปรับแกนตัดกับทรงกลมสะท้อนในการถ่ายภาพแบบพีเอชเอช	
	ก. ระนาบรีซีเพรเอเคิลด้านบนของทรงกลมการสะท้อน	179
	ข. ระนาบรีซีเพรเอเคิลด้านล่างของทรงกลมการสะท้อน	179
5.26	ลักษณะภาพถ่ายที่ได้ในขณะที่ปรับแกนพีเอชเอชของผลึก	181
5.27	ลักษณะการปรับแกนพีเอชเอชของผลึกของ H_{arc} , V_{arc} และ V_{dial} โดยที่สัญลักษณ์ H = ส่วนโค้งในแนวระดับ, V = ส่วนโค้งในแนวตั้ง	183
5.28	หลักการถ่ายภาพพีเอชเอชของระนาบรีซีเพรเอเคิลเลย์เออร์ที่ 0.	184
5.29	หลักการถ่ายภาพพีเอชเอชของระนาบรีซีเพรเอเคิลเลย์เออร์ที่ 1.	186
5.30	ลักษณะของฉากกันรังสีเอ็กซ์ในการถ่ายภาพพีเอชเอช	187
5.31	ก. ภาพถ่ายพีเอชเอชเมื่อ a เป็นแกนพีเอชเอชเลย์เออร์ที่ 0 มี $\bar{\mu} = 30^\circ$ (MoK_α 50 กิโลโวลท์ 14 มิลลิแอมป์ มี Zr เป็นตัวกรอง ใช้เวลา 90 ชั่วโมง)	189
	ข. ภาพถ่ายพีเอชเอชเมื่อ b เป็นแกนพีเอชเอชเลย์เออร์ที่ 0 มี $\bar{\mu} = 30^\circ$ (MoK_α 50 กิโลโวลท์ 14 มิลลิแอมป์ มี Zr เป็นตัวกรอง ใช้เวลา 63 ชั่วโมง)	189
	ค. ภาพถ่ายพีเอชเอชเมื่อ a เป็นแกนพีเอชเอชเลย์เออร์ที่ 1 มี $\bar{\mu} = 24^\circ$ (MoK_α 50 กิโลโวลท์ 14 มิลลิแอมป์ มี Zr เป็นตัวกรอง ใช้เวลา 92 ชั่วโมง)	190

ง.	ภาพถ่ายพรเซล์ชัน เมื่อ b เป็นแกนพรเซล์เลย์เออร์ที่ 1 $\theta = 24^\circ$ (MoK_α 50 กิโลโวลท์ 14 มิลลิแอมป์ ฝ Zr เป็นตัวกรอง ใช้เวลา 74 ชั่วโมง).....	190
จ.	ภาพถ่ายพรเซล์ชัน เมื่อ a เป็นแกนพรเซล์เลย์เออร์ที่ 2 $\theta = 24^\circ$ (MoK_α 50 กิโลโวลท์ 14 มิลลิแอมป์ ฝ Zr เป็นตัวกรอง ใช้เวลา 95 ชั่วโมง).....	191
ฉ.	ภาพถ่ายพรเซล์ชัน เมื่อ b เป็นแกนพรเซล์เลย์เออร์ที่ 2 $\theta = 24^\circ$ (MoK_α 50 กิโลโวลท์ 14 มิลลิแอมป์ ฝ Zr เป็นตัวกรอง ใช้เวลา 92 ชั่วโมง)	191
5.32	ลักษณะภาพถ่ายพรเซล์ชันของระนาบรีซีเพอเคิลเลย์เออร์ที่ 0 .	192
5.33	ลักษณะจุดรีซีเพอเคิลแลลลิสและเงื่อนไขที่พบจุดรีซีเพอเคิล- แลลลิสของผลึก $\text{AgIn}_{0.8}\text{Ga}_{0.2}\text{Te}_{1.6}\text{Se}_{0.4}$ เมื่อ c เป็น แกนหมุนในแต่ละเลย์เออร์	
	ก. hk0 ข. hk1 ค. hk2 ง. hk3 ..	197
	ฉ. hk4 จ. hk5 ช. hk6 ซ. hk7 ..	198
5.34	กราฟของล่เกลตัวคูณกับ ξ ที่ใช้ในการแก้ความผิดพลาดของความ เข้มเนื่องจากการแยกเป็น 2 จุด ของ MoK_{α_1} กับ MoK_{α_2} ..	202
5.35	แบบจำลองของผลึกที่มีรูปร่าง และตำแหน่งโคออร์ดิเนตของจุด ต่าง ๆ บนผลึกโดยใช้มาตราส่วนตามแกน a 1.05 เซนติเมตร ต่อ $\frac{1}{100}$ มิลลิเมตร และตามแกน b กับ c 1 เซนติเมตร ต่อ $\frac{1}{100}$ มิลลิเมตร	204
5.36	แผนภาพแพทเทอร์สัน P(u,v,w) ของโลหะผสมกึ่งตัวนำ $\text{AgIn}_{0.8}\text{Ga}_{0.2}\text{Te}_{1.6}\text{Se}_{0.4}$	

รูปที่		หน้า
	ก. เมื่อ u, w มีค่าตั้งแต่ 0 ถึง 0.5 และ v มีค่าเท่ากับ 0	210
	ข. เมื่อ u, w มีค่าตั้งแต่ 0 ถึง 0.5 และ v มีค่าเท่ากับ 0.25	210
	ค. เมื่อ u, w มีค่าตั้งแต่ 0 ถึง 0.5 และ v มีค่าเท่ากับ 0.50	211
5.37	ก. แผนภาพความหนาแน่นอิเล็กตรอนสังเกต $\rho_0(x, z)$ ภาคตัดขวางที่ $y = 0.0$	212
	ข. แผนภาพความหนาแน่นอิเล็กตรอนสังเกต $\rho_0(x, z)$ ภาคตัดขวางที่ $y = 0.25$	213
	ค. แผนภาพความหนาแน่นอิเล็กตรอนสังเกต $\rho_0(x, z)$ ภาคตัดขวางที่ $y = 0.50$	214
	ง. แผนภาพความหนาแน่นอิเล็กตรอนสังเกต $\rho_0(x, z)$ ภาคตัดขวางที่ $y = 0.75$	215
6.1	การเปลี่ยนแปลงค่าคงที่โครงสร้างผลึก a, c ของโลหะผสมกึ่งตัวนำ $(Cu_{1-x}Ag_x)(In_{1-y}Ga_y)Te_2$ กับค่าสัดส่วนของอะตอม x เมื่อ $y = 0$ แสดงด้วยจุด \square , $y = 0.25$ แสดงด้วยจุด $+$, $y = 0.5$ แสดงด้วยจุด \bullet , $y = 0.75$ แสดงด้วยจุด \times และ $y = 1.0$ แสดงด้วยจุด o โดยที่รูป ก. แสดงการเปลี่ยนแปลงค่าคงที่โครงสร้างผลึก a รูป ข. แสดงการเปลี่ยนแปลงค่าคงที่โครงสร้างผลึก c	223
6.2	ค่าคงที่โครงสร้างผลึก a ในรูป ก. c ในรูป ข. ของโลหะผสมกึ่งตัวนำทั้ง 6 สสารกับของสารประกอบ $AgGaSe_2, AgGaTe_2, AgInSe_2$ และ $AgInTe_2$ ซึ่งเขียนบนลattice เดียวกัน	225

รูปที่	หน้า
6.3 ก. กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงค่าคงที่โครงสร้างผลึก a กับสัดส่วนอะตอม z โดยที่กราฟเส้นทึบเป็นกราฟจากการวิจัย ส่วนกราฟเส้นประเป็นกราฟของ เอวอนและคณะ	228
ข. กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงค่าคงที่โครงสร้างผลึก c กับสัดส่วนอะตอม z โดยที่กราฟเส้นทึบเป็นกราฟจากการวิจัย ส่วนกราฟเส้นประเป็นกราฟของ เอวอนและคณะ	229
ค. รูปลูกบาศก์ที่แทนระบบของโลหะผสมกึ่งตัวนำ $Cu_{(1-x)} Ag_x Ga_{(1-y)} In_y Te_{2(1-z)} Se_{2z}$ ที่เอวอนและคณะทำ..	230
6.4 กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงค่าคงที่โครงสร้างผลึก a รูป ก. c รูป ข. กับอุณหภูมิ (T) โลหะผสมกึ่งตัวนำ $AgIn_{0.8}Ga_{0.2}Te_2$	234
6.5 กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงค่าคงที่โครงสร้างผลึก a รูป ก. c รูป ข. กับอุณหภูมิของโลหะผสมกึ่งตัวนำ $AgIn_{0.8}Ga_{0.2}Te_{1.6}Se_{0.4}$	235
6.6 กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงค่าคงที่โครงสร้างผลึก a รูป ก. c รูป ข. กับอุณหภูมิของโลหะผสมกึ่งตัวนำ $AgIn_{0.8}Ga_{0.2}Te_{1.2}Se_{0.8}$	236
6.7 กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงค่าคงที่โครงสร้างผลึก a รูป ก. c รูป ข. กับอุณหภูมิของโลหะผสมกึ่งตัวนำ $AgIn_{0.8}Ga_{0.2}Te_{0.8}Se_{1.2}$	237
6.8 กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงค่าคงที่โครงสร้างผลึก a รูป ก. c รูป ข. กับอุณหภูมิของโลหะผสมกึ่งตัวนำ $AgIn_{0.8}Ga_{0.2}Te_{0.4}Se_{1.6}$	238

รูปที่	หน้า
6.9	
กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงค่าคงที่โครงสร้างผลึก a รูป ก.	
c รูป ข. กับอุณหภูมิของโลหะผลึมกึ่งตัวนำ $AgIn_{0.8}Ga_{0.2}Se_2$	239
6.10	
ก. หนึ่งหน่วยเซลล์ของโครงสร้างผลึกโลหะผลึมกึ่งตัวนำ $AgIn_{0.8}Ga_{0.2}Te_{1.6}Se_{0.4}$ ซึ่งมีตำแหน่งที่อยู่ของอะตอมต่าง ๆ ตามที่แสดงไว้ในตาราง 6.6	244
ข. ความยาวพันธะและค่ามุมพันธะของแต่ละอะตอมในโลหะผลึมกึ่งตัวนำ $AgIn_{0.8}Ga_{0.2}Te_{1.6}Se_{0.4}$	244