

การศึกษาเฟสของโลหะผสม  $Pb_{1-x-y}Sn_xGe_yTe$

ด้วยวิธีการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์



นาย บัญชา ศิลป์กุลสุข

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

ภาควิชา ฟิสิกส์

บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

พ.ศ. 2527

ISBN 974 - 563 - 205 - 8

013118

๕160081๙๙

Phase Studies of  $\text{Pb}_{1-x-y}\text{Sn}_x\text{Ge}_y\text{Te}$  Alloy  
by X-Ray Diffraction

Mr. Buncha Silskulsuk

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

1984

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การศึกษาเฟสของโลหะผสม  $Pb_{1-x-y}Sn_xGe_yTe$  ด้วยวิธีการเลี้ยวเบน

รังสีเอ็กซ์

โดย

นาย บัญชา ศิลป์กุลสุข

ภาควิชา

ฟิสิกส์

อาจารย์ที่ปรึกษา

รองศาสตราจารย์ ดร. พัทนะ ภาวะนันท์



บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยเป็นส่วนหนึ่ง  
ของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

*สุประติษฐ์ บุญนาค* ..... คณะบดีบัณฑิตวิทยาลัย  
(รองศาสตราจารย์ ดร. สุประติษฐ์ บุญนาค)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

*สุพจน์ พงษ์พานิช* ..... ประธานกรรมการ  
(รองศาสตราจารย์ สุพจน์ พงษ์พานิช)

*สุวิมล วัฒนกุล* ..... กรรมการ  
(รองศาสตราจารย์ ดร. สุวิมล วัฒนกุล)

*ดร. อรุณ วัฒนกุล* ..... กรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. อรุณ วัฒนกุล)

*ดร. พัทนะ ภาวะนันท์* ..... กรรมการ  
(รองศาสตราจารย์ ดร. พัทนะ ภาวะนันท์)

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

หัวข้อวิทยานิพนธ์                      การศึกษาเฟลล์ของโลหะผสม  $Pb_{1-x-y}Sn_xGe_yTe$  ด้วยวิธีการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์

ชื่อผู้ผลิต                                    นาย ชาญชา คิลปลักุลสูย

อาจารย์ที่ปรึกษา                        รองศาสตราจารย์ ดร. พัดมะ ภาวะนันท์

ภาควิชา                                        ฟิสิกส์

ปีการศึกษา                                 2526



บทคัดย่อ

โลหะสังกะสีผสม  $Pb_{1-x-y}Sn_xGe_yTe$  ซึ่งมีอัตราส่วน  $1-x-y : x = 3:1, 1:1, 1:3$  และ  $1-x-y = 0$  ได้จากการเตรียมโดย หลอมที่  $1200^{\circ}C$  และแอนนัลที่อุณหภูมิ  $480^{\circ}$  ถึง  $600^{\circ}C$  จากการศึกษาผลึกด้วยวิธีการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์โดยผลึกผงที่อุณหภูมิห้องพบว่าโลหะผสมนี้จะมีผลึก และมีเฟลล์เดี่ยวได้ทุกส่วนผสมโดยจะเป็นเฟลล์ คิวบิก หรือรอมโบฮีดรัล

การศึกษาเฟลล์ของโลหะ สามองค์ผสม ที่ส่วนผสม  $x=0$  ( $Pb_{1-y}Ge_yTe$ ) เตรียมโดยการหลอมที่อุณหภูมิ  $1200^{\circ}C$  และแอนนัลที่อุณหภูมิ  $580^{\circ}C$  เป็นเวลา 2 สัปดาห์ แล้วให้เป็นลงภายในเตาพบว่าโลหะผสมซึ่งมีส่วนผสมของ  $GeTe$  0% โมล ( $PbTe$ ) จะเป็นเฟลล์คิวบิกเพียงเฟลล์เดี่ยว และในกรณีของส่วนผสมซึ่งมีปริมาณ  $GeTe$  20 และ 30% โมล ซึ่งเป็นบริเวณที่เกิดการเปลี่ยนเฟลล์มีแนวโน้มว่าจะเป็นเฟลล์คิวบิก และรอมโบฮีดรัล ตามลำดับ สำหรับส่วนผสมซึ่งมีปริมาณ  $GeTe$  40 60 และ 80% โมล พบว่ามี 2 เฟลล์ร่วมกัน คือเฟลล์ คิวบิกและเฟลล์-รอมโบฮีดรัล

ผลจากการคำนวณแลททิส์พารามิเตอร์ที่อุณหภูมิห้อง ( $28^{\circ}C$ ) ของโลหะสังกะสีผสม  $Pb_{1-x-y}Sn_xGe_yTe$  ซึ่งผลึก และมีเฟลล์เดี่ยวด้วยวิธีการใช้ซิลิคอน ( $a = 5.43088 \text{ \AA}$ ) เป็นสารมาตรฐาน จากฟิล์มภาพถ่ายการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์  $CuK\alpha_1$  ( $\lambda = 1.5406 \text{ \AA}$ ) ด้วยกล้องกิเงียร์เอกซ์แบบ XDC 700 พบว่า แลททิส์พารามิเตอร์ด้าน  $a$  จะแปรผันตรงกับ  $x$  และ  $y$  สามารถอธิบายได้โดยสมการ

$$a = A_1 + B_1x + C_1y$$

และแลททิส์พารามิเตอร์ มุม  $\alpha$  สามารถอธิบายได้ด้วยสมการ

$$\alpha = A_2 + B_2y + C_2y^2$$

จากความสัมพันธ์ของแลททิซพารามิเตอร์  $a$  และ  $\alpha$  ย่างต้นทำให้  $y_t$  คือปริมาณเศษส่วนของ GeTe ในโลหะสองคัมพลัม  $Pb_{1-x-y}Sn_xGe_yTe$  ที่เกิดการเปลี่ยนเฟส สำหรับโลหะผลม ซึ่งมีส่วนผลม  $1-x-y$  :  $x = 3:1, 1:1, 1:3$  และ  $1-x-y = 0$  มีค่าเป็น 0.216 0.255 0.275 และ 0.276 ตามลำดับ จากนี้ได้ว่า ปริมาณเศษส่วน GeTe มีค่าน้อยกว่า  $y_t$  โลหะผลมจะเป็นเฟสคิวบิก และถ้ามากกว่าหรือเท่ากับ  $y_t$  จะเป็นเฟสรอมโบฮีดรัล

การศึกษาการเปลี่ยนเฟสของโลหะสองคัมพลัม ซึ่งมีส่วนผลม  $1-x-y$  :  $x = 1:3$  จากการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ที่อุณหภูมิสูงในช่วง  $28-515^\circ\text{C}$  ด้วยกล้องถ่ายภาพการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ที่อุณหภูมิสูง เดอบายเออเรอร์ UNICAM S.70 ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 19 เซนติเมตร โดยใช้รังสี  $\text{CuK}\alpha$  จากแบบของภาพถ่ายการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ แสดงให้เห็นว่า โลหะผลม ซึ่งเป็นเฟสรอมโบฮีดรัลที่อุณหภูมิห้องจะเปลี่ยนเฟสไปเป็นระบบคิวบิกเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น โดยอุณหภูมิในการเปลี่ยนเฟสจะแปรผันตรงกับปริมาณเศษส่วนของ GeTe ในโลหะผลม ตาม ความสัมพันธ์

$$T_t = 150 + 580 y \quad K$$

ซึ่งได้จากผลของข้อมูลโดยการทำมัลติเพลลิตีเนียร์รีเกรสชั่น อุณหภูมิในการเปลี่ยนเฟส จากการแปรผันนี้สันนิษฐานว่าโลหะผลมซึ่งเป็นเฟสคิวบิกที่อุณหภูมิห้องจะเกิดการเปลี่ยนเฟสไปเป็นระบบรอมโบฮีดรัลที่อุณหภูมิต่ำ อุณหภูมิในการเปลี่ยนเฟส สำหรับ  $Pb_{0.25}Sn_{0.75}Te$  และ  $Pb_{0.2}Sn_{0.6}Ge_{0.2}Te$  คาดว่าจะเกิดการเปลี่ยนเฟสที่อุณหภูมิ 150 K และ 266 K ตามลำดับ

แลททิซพารามิเตอร์ของโลหะสองคัมพลัม  $Pb_{1-x-y}Sn_xGe_yTe$  ที่อุณหภูมิสูงคำนวณจากการใช้ซิลิคอนเป็นสารมาตรฐาน โดยที่แลททิซพารามิเตอร์ของซิลิคอนที่ใช้เป็นมาตรฐาน ในช่วงอุณหภูมิระหว่าง 28 ถึง  $620^\circ\text{C}$  ได้จากการรอกัลป์เส้นโค้งด้วยเนลสัน-ไรเลย์ หรือ เทเลอร์-ซินแคลร์ฟังก์ชัน (Nelson-Riley or Taylor-Sinclair function)

$\frac{1}{2} \left( \frac{\cos^2 \theta}{\sin \theta} + \frac{\cos^2 \theta}{\theta} \right)$  โดยโลหะสองชิ้นล้นชนิดนี้ ซึ่งเป็นเฟลควิกที่อุณหภูมิห้องจะขยายตัว -  
 อย่างสม่ำเสมอ ส่วนที่เป็นเฟลอรอมโบอีตรัลจะหยุดการขยายตัวเมื่ออุณหภูมิเข้าใกล้อุณหภูมิ  
 ในการเปลี่ยนเฟล

Thesis Title Phase Studies of  $Pb_{1-x-y}Sn_xGe_yTe$  Alloy by X-Ray  
 Diffraction

Name Mr. Buncha Silskulsuk

Thesis Adviser Associate Professor Phathana Phavanantha, Ph.D.

Department Physics

Academic Year 1983



ABSTRACT

Quarternary alloys  $Pb_{1-x-y}Sn_xGe_yTe$  with the compositions of  $1-x-y : x = 3:1, 1:1, 1:3,$  and  $1-x-y = 0$  were prepared by melting at  $1200^{\circ}C$  and annealed within the range of  $480-600^{\circ}C$ . Polycrystalline X-ray diffraction study of these alloys at room temperature shows that the alloy are in equilibrium with a single phase at the stated compositions.

Ternary alloys with  $x = 0$  ( $Pb_{1-y}Ge_yTe$ ) were also prepared by melting at  $1200^{\circ}C$  and annealed at  $580^{\circ}C$  for two weeks and subsequently cooled in a furnace. Similar X-ray diffraction studies of the composition at 0 % mole in  $GeTe$  the alloy  $PbTe$  exhibits only cubic single phase; there is some indication that near the transition region of 20 and 30% mole in  $GeTe$  the alloys might be in cubic and rhombohedral phase respectively; whereas those with the compositions of 40, 60, and 80 % mole in  $GeTe$  exhibit simultaneously two phases in cubic and rhombohedral systems.

Lattice parameters at room temperature  $28^{\circ}C$  of the quarternary alloys in equilibrium and with a single phase were obtained using a Guinier-Hagg XDC 700 focussing powder camera,  $CuK\alpha_1$  radiation ( $\lambda = 1.5406 \text{ \AA}$ ), and silicon ( $a = 5.43088 \text{ \AA}$ ) as an internal standard. The length of the unit cell axes,  $a$ , and the interaxial angle,  $\alpha$ , were

found to follow simple relations :

$$a = A_1 + B_1x + C_1y$$

and

$$\alpha = A_2 + B_2y + C_2y^2.$$

The phase-transition fractional amounts,  $y_t$ , of GeTe in  $\text{Pb}_{1-x-y}\text{Sn}_x\text{Ge}_y\text{Te}$  for the compositions of 1-x-y : x = 3:1, 1:1, 1:3, and 1-x-y = 0 were found to be 0.216, 0.255, 0.275 and 0.276 respectively. With the fractional amount of GeTe below  $y_t$ , the alloys are in cubic phase; above and at  $y_t$ , the alloys are rhombohedral.

Phase-transition study by X-ray diffraction at higher temperature in the range of 28-515°C was carried out for the quaternary alloys at the compositions of 1-x-y : x = 1:3 using a 19 cm. diameter UNICAM S70 high-temperature Debye-Scherrer camera, and  $\text{CuK}\alpha$  radiation, X-ray diffraction patterns indicate that the alloys in rhombohedral phase at room temperature undergo phase transition at high temperature to cubic system. The phase-transition temperatures were found to be dependent upon the fraction of GeTe present in the alloys, and referred to possible phase transition at lower temperature to rhombohedral system for alloys being cubic at room temperature. The transition temperature was found to follow a linear relation

$$T_t = 150 + 580 y \quad \text{K}$$

For  $\text{Pb}_{0.25}\text{Sn}_{0.75}\text{Te}$  and  $\text{Pb}_{0.2}\text{Sn}_{0.6}\text{Ge}_{0.2}\text{Te}$  phase transition is expected to be at 150 K and 266 K respectively.



Lattice parameters for the corresponding alloys at high temperature were obtained with an internal standard using silicon, of which the lattice parameter in the temperature range of 28-620°C were extrapolated by a Nelson-Riley or Taylor-Sinclair function,  $\frac{1}{2} (\cos^2\theta / \sin \theta + \cos^2\theta/\theta)$ .

The lattice parameter;  $a$ , of the cubic phase alloys increases continuously with temperature, but for the rhombohedral phase alloys the increase in  $a$  rises at first with temperature although at near transition temperature there is no appreciably increase.



## กิตติกรรมประกาศ

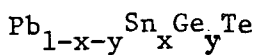
วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลงได้ด้วยความสามารถ และความช่วยเหลือจากอาจารย์และเพื่อน ๆ ดังนี้ คือ

รองศาสตราจารย์ ดร. พัฒนะ ภวะนันท์ ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ผู้ให้ความรู้ทางด้านการศึกษาผลึกโดยวิธีการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์และแนะนำแนวทางในการทำวิทยานิพนธ์ มาโดยตลอด

รองศาสตราจารย์ สุนทร พราหมทัต ซึ่งเป็นผู้ให้ความรู้ทางด้านการศึกษาผลึกโดยวิธีการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์

รองศาสตราจารย์ ดร. ศรัณวล ถนนอมกุล เป็นผู้ให้ความรู้ทางด้านการศึกษาผลึกโดยวิธีการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์

ศาสตราจารย์ วุฒเลัย เป็นผู้แนะนำแนวทางในการศึกษาโลหะผสม



ศาสตราจารย์ ดร. วิรุฬห์ สายคณิต และผู้ช่วยศาสตราจารย์ สัมพงศ์ ฉัตรภรณ์ ซึ่งเป็นผู้ควบคุมห้องปฏิบัติการสารกึ่งตัวนำได้ให้ความสะดวกในการใช้วัสดุ และสารที่ใช้ในการเตรียมโลหะผสม

รองศาสตราจารย์ ดร. ภิโย บันยารชุน ได้ให้ความสะดวกทางด้านการใช้อุปกรณ์ที่จำเป็นในการศึกษาโลหะผสม จากห้องปฏิบัติการ ซึ่งอยู่ภายใต้ ความควบคุมดูแลของท่าน

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วสันต์ พงศ์พิชญ์ หัวหน้าภาควิชา ธรณีวิทยา ได้กรุณาให้ความสะดวกในการใช้ เครื่องดีฟแฟรกโตมิเตอร์

รองศาสตราจารย์ สัมชาย ทยานยง ผู้อำนวยการสถาบันคอมพิวเตอร์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย รวมทั้ง เจ้าหน้าที่ของสถาบันฯ ที่ได้ให้ความสะดวกในการใช้เครื่องคอมพิวเตอร์ ด้วยดีเสมอมา

นางสาว บุญภาค หงษ์พันธ์ และเพื่อน ๆ ซึ่งได้ให้ความช่วยเหลือทางด้านการคำนวณ การแปลผลจากข้อมูล และการจัดรูปเล่มวิทยานิพนธ์

จึงขอขอบคุณท่านอาจารย์ และเพื่อน ๆ มา ณ ที่นี้ด้วย

นอกจากนี้ผู้เขียนได้รับทุนจากโครงการผลิต และพัฒนาอาจารย์ในปี พ.ศ. 2522

และ 2523 จึงขอขอบคุณ มา ณ ที่นี้ด้วย



บทคัดย่อ .....	ง
กิตติกรรมประกาศ .....	ญ
รายการตารางประกอบ .....	ถ
รายการรูปประกอบ .....	ฒ
บทที่	
1 บทนำ	1
1.1 โครงสร้างและเฟส	1
1.2 ความหนาแน่นของอนุภาคโพลีในโลหะผสม $Pb_{1-x}Ge_xTe$	3
1.3 แถบพลังงานของโลหะผสม $Pb_{1-x}Ge_xTe$	4
1.4 โลหะผสม $Pb_{1-x-y}Sn_xGe_yTe$ ซึ่งเตรียมขึ้นเพื่อศึกษาเฟส	5
2 ทฤษฎีการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์โดยผลึกผง	6
2.1 การเกิดรังสีเอ็กซ์	6
2.2 ระบบผลึก	8
2.3 ระนาบของผลึก	12
2.4 การเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์โดยอะตอมซึ่งจัดเรียงตัวเป็น แถวลำดับแลททิส	12
2.5 การเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์โดยผลึกผง	14
2.6 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะห่างของระนาบกับดัชนีของเซลล์	15
2.7 การทำให้เกิดรังสีเอ็กซ์เอกรงค์ด้วยวิธีการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของผลึกเดี่ยว	19
2.8 กล้องถ่ายภาพการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ชนิดกึ่งเฟอริก	21
2.9 กล้องถ่ายภาพการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ชนิดเดอบายเชอเรอร์	22
2.10 กล้องถ่ายภาพการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ชนิดจุดหมุนสูง	22
2.11 การหาแลททิสพารามิเตอร์ด้วยวิธีการอวกาศกลับเส้นโค้ง	24
2.11.1 ความคลาดเคลื่อนของมุม $\theta$ เนื่องจากความยาวของลำตัวอย่าง	26
2.11.2 ความคลาดเคลื่อนเนื่องจากดัชนีหักเหของผลึก	28
2.11.3 ความคลาดเคลื่อนเนื่องจากการหดสั้นของฟิล์ม	28
2.11.4 ความคลาดเคลื่อนเนื่องจากลำตัวอย่างเลื่อนไปจากจุดศูนย์กลางของกล้อง	29
2.11.5 การดูดกลืนรังสีเอ็กซ์โดยลำตัวอย่าง	31

	สารบัญ (ต่อ)	หน้า
2.12	ฟังก์ชันอวก์กลป์	34
2.13	การคำนวณแลททิลพารามิเตอร์โดยใช้สารมาตรฐานแก้ความคลาดเคลื่อน	38
2.14	วิธีการกำลังล่องน้อยสุด	39
2.15	วิธีการคำนวณแลททิลพารามิเตอร์ของโคเฮน	40
3	การเตรียมโลหะผสม $Pb_{1-x-y}Sn_xGe_yTe$	44
3.1	ความรู้พื้นฐานในการเตรียมโลหะผสม $Pb_{1-x-y}Sn_xGe_yTe$	44
3.1.1	สมบัติโดยทั่วไปของโลหะผสม	44
3.1.2	การสมดุลของโลหะผสม	44
3.1.3	การใช้ความร้อนเพื่อกำจัดการเกิดแก่นในโลหะผสม	46
3.2	อุปกรณ์ในการเตรียมโลหะผสม $Pb_{1-x-y}Sn_xGe_yTe$	46
3.3	การบรรจุสารลงในหลอดแก้วสุญญากาศ	46
3.3.1	การเตรียมหลอดแก้วควอทซ์เพื่อบรรจุสาร	46
3.3.2	การคำนวณส่วนผสมของโลหะผสม	47
3.3.3	การชั่งและบรรจุสารลงในหลอดแก้วควอทซ์	51
3.4	ขั้นตอนในการหลอมและเผาโลหะผสม $Pb_{1-x-y}Sn_xGe_yTe$	52
4	การเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์โดยผลึกผง $Pb_{1-x-y}Sn_xGe_yTe$ และผลจากการวิเคราะห์ภาพถ่าย	57
4.1	การถ่ายภาพการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ที่อุณหภูมิห้องด้วยกล้อง กิเยอร์เฮกท์	57
4.1.1	อุปกรณ์ในการถ่ายภาพการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของผลึกผง $Pb_{1-x-y}Sn_xGe_yTe$	57
4.1.2	วิธีการถ่ายภาพการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ด้วยกล้อง กิเยอร์เฮกท์	57
4.2	การคำนวณแลททิลพารามิเตอร์ของโลหะผสมที่อุณหภูมิห้อง	58
4.2.1	ลักษณะของเส้นการสะท้อนบนฟิล์มภาพถ่ายการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์จากกล้อง กิเยอร์เฮกท์	58
4.2.2	การคำนวณแลททิลพารามิเตอร์ของผลึกในระบบคิวบิก	59
4.2.3	การคำนวณแลททิลพารามิเตอร์ของผลึกในระบบออร์โธโรมบอยอีตรัล	62

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.3 แลททิสฟารามิเตอร์ของ $Pb_{1-x-y}Sn_xGe_yTe$ ที่อุณหภูมิห้อง	65
4.4 การแปรผันของแลททิสฟารามิเตอร์ $a$ กับลั่วนผล้ม	65
4.5 การแปรผันของแลททิสฟารามิเตอร์ $\alpha$ กับปริมาณ GeTe ในโลหะผล้ม	81
4.6 การแปรผันของ $\frac{\Delta V}{V_c}$ กับปริมาณ GeTe ในลั่วนผล้ม	92
5 การเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์โดยผลึกผง $Pb_{1-x-y}Sn_xGe_yTe$ ที่อุณหภูมิ 28 ถึง 515 °C	96
5.1 การถ่ายภาพการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ด้วยกล้องเดอบายเออเรอร์ชนิดอุณหภูมิสูง	96
5.1.1 อุปกรณ์ในการถ่ายภาพ	96
5.1.2 วิธีการถ่ายภาพ การเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ที่อุณหภูมิสูง	96
5.2 การขยายตัวของผลึกซิลิคอนจากอุณหภูมิ 28 ถึง 620 °C	97
5.3 การคำนวณแลททิสฟารามิเตอร์ของ $Pb_{1-x-y}Sn_xGe_yTe$ จากภาพถ่ายการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ที่อุณหภูมิสูง	99
5.4 แลททิสฟารามิเตอร์ของ $Pb_{1-x-y}Sn_xGe_yTe$ ระหว่างอุณหภูมิ 28 ถึง 515 °C	105
5.5 การเปลี่ยนเฟลจากระบบรวมโบฮีตรัลไปเป็นระบบคิวบิกเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น	116
5.6 การขยายตัวของโลหะผล้มจากอุณหภูมิ 28 °C จนกระทั่งเริ่มจะหลอมเหลว	122
6 สรุปลและอภิปรายผลการทดลอง	130
- เอกสารอ้างอิง	137
ภาคผนวก ก.	141
ภาคผนวก ข.	151
ภาคผนวก ค.	159
ประวัติผู้เขียน	176

รายการรูปประกอบ		หน้า
รูปที่ 1.1	การเรียงตัวของอะตอมแบบโครงสร้าง NaCl	1
รูปที่ 1.2	การบิดของแกนไปจากระบบเพชเชนเตอร์คิวบิกใน GeTe	2
รูปที่ 1.3	การแปรผันของ อะตอม Ge ที่ขาดหายไปจากแลททิซกับ $\frac{\Delta V}{V_c}$	4
รูปที่ 1.4	การแปรผันของแถบพลังงานกับส่วนผสมในโลหะผสม $Pb_{1-x}Ge_xTe$	5
รูปที่ 2.1	ส่วนประกอบของหลอดกำเนิดรังสีเอ็กซ์	6
รูปที่ 2.2	การกระจายความเข้มของคลื่นรังสีเอ็กซ์	8
รูปที่ 2.3	ลักษณะของแถวลำดับแลททิซและจุดแลททิซซึ่งอาจพิจารณาได้ว่าประกอบขึ้นด้วยหน่วยเซลล์	9
รูปที่ 2.4	โครงผลึก 14 แบบของบราวเวส	11
รูปที่ 2.5	ระนาบ 3 แบบในแลททิซ 2 มิติ	12
รูปที่ 2.6	การสะท้อนของรังสีเอ็กซ์โดยระนาบซึ่งห่างกันเป็นระยะ $d$	13
รูปที่ 2.7	ทางเดินของรังสีเอ็กซ์ เลี้ยวเบนจากผลึกผงไปยังฟิล์มซึ่งสว่างในลักษณะของกล้องเดอบายเชอเรอร์	14
รูปที่ 2.8	(ก) ระนาบ $hkl$ ซึ่งแบ่งด้านทั้งสามของหน่วยเซลล์ (ข) ระนาบบริเวณจุดกำเนิดของ (ก) (ค) และ (ง) สามเหลี่ยม AOB และ SOC จากรูป (ข) ซึ่งแยกแสดงเพื่อให้สะดวกในการคำนวณระยะ $d$	18
รูปที่ 2.9	การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์บางส่วน ซึ่งทำมุมกับระนาบของผลึกสอดคล้องกับเงื่อนไขของแบรกก์	19
รูปที่ 2.10	การโฟกัสของรังสีเอ็กซ์โดยผลึกซึ่งตัดออกบางส่วน และตัดให้โค้งแบบโคโนแอสสัน	20
รูปที่ 2.11	วิธีการสร้างกล้องแบบกีนิเยร์เอกท์ซึ่งใช้รังสีเอ็กซ์เอกรงค์จากการเลี้ยวเบนของผลึกเดี่ยว	21
รูปที่ 2.12	กล้องถ่ายภาพการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ชนิดเดอบายเชอเรอร์	23
รูปที่ 2.13	ความสามารถในการแยกของเส้นการสะท้อนจากกล้องชนิดเดอบายเชอเรอร์ และกล้อง ชนิดกีนิเยร์เอกท์	23
รูปที่ 2.14	ส่วนประกอบของกล้องถ่ายภาพการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ที่อุณหภูมิสูงชนิดเดอบายเชอเรอร์	25
รูปที่ 2.15	วงจรไฟฟ้าซึ่งใช้กับกล้องถ่ายภาพอุณหภูมิสูง	26
รูปที่ 2.16	ลักษณะของเส้นการสะท้อนซึ่งเกิดจากความยาวของลำตัวอย่าง	27

รายการรูปประกอบ ( ต่อ )

รูปที่ 2.17	เงาของขอบใบมีด จากการบรรจุฟิล์มแบบแบรดเลย์และแบรกก์ในกล้อง เดอบายเชอเรอร์	28
รูปที่ 2.18	ผลที่มีต่อตำแหน่งของเส้นการสะท้อน ฮันสับเนื่องมาจากการเลื่อนของผลึกจากตำแหน่ง ศูนย์กลางของกล้อง	30
รูปที่ 2.19	แนวทางเดินของรังสีเอ็กซ์ผ่านภาคตัดขวางของสารตัวอย่าง และการกระจายความ เข้มของเส้นการ สะท้อนเนื่องมาจากการดูดกลืนรังสีเอ็กซ์โดยสารตัวอย่าง	31
รูปที่ 2.20	การกระจายความเข้มของเส้นการสะท้อน ซึ่งเกิดขึ้นจากแหล่งกำเนิดรังสีเอ็กซ์ แบบขนานคำนวณด้วยวิธีการโตเรคล์ดรีป ที่สัมพันธ์กับการดูดกลืน $\mu x$ ต่างกัน	32
รูปที่ 2.21	ความแตกต่างของเส้นขอบเขตความเข้มซึ่ง เกิดจากแหล่งกำเนิดรังสีเอ็กซ์แบบขนาน และแหล่งกำเนิดรังสีเอ็กซ์แบบจุด	33
รูปที่ 2.22	การเลื่อนตำแหน่งของเส้นการสะท้อนเนื่องจากการเลื่อนของผลึกจากตำแหน่งศูนย์ กลางของกล้อง และการดูดกลืนรังสีเอ็กซ์	35
รูปที่ 2.23	การแปรผันของแลททิซพารามิเตอร์ $a$ กับฟังก์ชัน $\cos^2\theta$ และ $\frac{1}{2}(\frac{\cos^2\theta}{\sin\theta} + \frac{\cos^2\theta}{\theta})$	38
รูปที่ 3.1	แผนภาพการล่มสลุ ทางความร้อนชนิดหนึ่งของโลหะผสมซึ่งประกอบด้วยโลหะสอง ชนิด	45
รูปที่ 3.2	การเตรียมหลอดแก้วสำหรับบรรจุสาร	47
รูปที่ 3.3	แผนภาพแสดงส่วนผลมของ $Pb_{1-x-y}Sn_xGe_yTe$	48
รูปที่ 3.4	ขั้นตอนในการบรรจุสารลงในหลอดแก้วควอทซ์	52
รูปที่ 3.5	ลักษณะของฟิล์มภาพถ่ายภาพการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์จากโลหะผสมที่เข้าสู่สุมตุล เปรียบเทียบกับโลหะผสมที่ยังไม่เข้าสู่สุมตุล	55
รูปที่ 3.6	(ก) เตาขนาดใหญ่ ซึ่งใช้ในการหลอมและแอนนิลโลหะผสม	56
	(ข) เตาขนาดเล็กซึ่งใช้ในการหลอมและ แอนนิลโลหะผสม	56
รูปที่ 4.1	(ก) ฟิล์มภาพถ่ายภาพการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของผลึก SnTe	58
	(ข) ฟิล์มภาพถ่ายภาพการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของผลึก GeTe	58
รูปที่ 4.2	กราฟซึ่งใช้ในการแก้ความคลาดเคลื่อนของระยะ $(S-S_0)_{obs}$	60
รูปที่ 4.3	หน่วยเซลล์ในระบบบรอมโบฮีดรัล และเอกแซกโกนัลสำหรับแลททิซแบบบรอมโบฮีดรัล	65
รูปที่ 4.4	(ก) ฟิล์มภาพถ่ายภาพการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของโลหะผสม ตามแนวอัตราส่วน $1-x-y : x = 3:1$ ซึ่งสุมตุล และมีเฟสเดียว	70



รายการรูปประกอบ (ต่อ)		หน้า
รูปที่ 4.4	(ข) ภาพถ่ายภาพการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของโลหะผสม ตามแนวอัตราส่วน $1-x-y: x = 1:1$ ซึ่งสัมพันธ์ และมีเฟสเดียว	71
รูปที่ 4.4	(ค) ภาพถ่ายภาพการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของโลหะผสม ตามแนวอัตราส่วน $1-x-y: x = 1:3$ ซึ่งสัมพันธ์และมีเฟสเดียว	72
รูปที่ 4.4	(ง) ภาพถ่ายภาพการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของโลหะผสม ตามแนวส่วนผสม $1-x-y = 0$ ซึ่งสัมพันธ์และมีเฟสเดียว	73
รูปที่ 4.5	ภาพถ่ายภาพการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของโลหะผสม ตามแนวส่วนผสม $x = 0$ ซึ่งพบว่ามี 2 เฟสที่ปริมาณเศษส่วนของ GeTe หรือ $Y = 0.4, 0.6$ และ $0.8$	74
รูปที่ 4.6	การแปรผันของแลททิส์พารามิเตอร์ $a$ กับปริมาณ SnTe และ PbTe	75
รูปที่ 4.7	การแปรผันของแลททิส์พารามิเตอร์ $a$ กับปริมาณ GeTe ที่อัตราส่วน $1-x-y: x = 3:1, 1:1, 1:3$ และ $1-x-y = 0$	77
รูปที่ 4.8	จุดซึ่งเกิดจากการลงจุดค่าของแลททิส์พารามิเตอร์ $\alpha$ เทียบกับปริมาณ GeTe	82
รูปที่ 4.9	(ก) การแปรผันของแลททิส์พารามิเตอร์ $\alpha$ กับปริมาณ GeTe ที่ $1-x-y = 0$	85
รูปที่ 4.9	(ข) การแปรผันของแลททิส์พารามิเตอร์ $\alpha$ กับปริมาณ GeTe ที่ $1-x-y: x = 1:3$	86
รูปที่ 4.9	(ค) การแปรผันของแลททิส์พารามิเตอร์ $\alpha$ กับปริมาณ GeTe ที่ $1-x-y: x = 1:1$	87
รูปที่ 4.9	(ง) การแปรผันของแลททิส์พารามิเตอร์ $\alpha$ กับปริมาณ GeTe ที่ $1-x-y: x = 3:1$	88
รูปที่ 4.9	(จ) การแปรผันของแลททิส์พารามิเตอร์ $\alpha$ กับปริมาณ GeTe ที่ $x = 0$ ซึ่งคำนวณจากข้อมูลของ วูลเลย์และนิโคลลิค	89
รูปที่ 4.9	(ฉ) การแปรผันของแลททิส์พารามิเตอร์ $\alpha$ กับปริมาณ GeTe ซึ่งคำนวณจากข้อมูลที่ $1-x-y: x = 3:1, 1:1, 1:3$ และ $1-x-y = 0$	90
รูปที่ 4.9	(ช) การแปรผันของแลททิส์พารามิเตอร์ $\alpha$ กับปริมาณ GeTe ซึ่งคำนวณจากข้อมูลที่ $1-x-y: x = 3:1, 1:1, 1:3, 1-x-y = 0$ และจากข้อมูลของ วูลเลย์ และนิโคลลิค ทางด้าน $x = 0$	91
รูปที่ 4.10	แผนภาพแสดงแนวเส้นแบ่งเฟสของโลหะผสม $Pb_{1-x-y}Sn_xGe_yTe$	92
รูปที่ 4.11	การแปรผันของ $\frac{\Delta V}{V_c}$ กับปริมาณ GeTe ในโลหะผสม $Pb_{1-x-y}Sn_xGe_yTe$	94
รูปที่ 5.1	การปิดผลึกบนแท่นปิดผลึกของกล้องถ่ายภาพการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ชนิดอุณหภูมิสูง	97
รูปที่ 5.2	อุณหภูมิซึ่งสอดคล้องกับ ความต่างศักย์ไฟฟ้าจากเส้นลวดวัดอุณหภูมิ	98

รายการประกอบ (ต่อ)		หน้า
รูปที่ 5.3	ฟิล์มภาพถ่ายภาพการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของผลึกผงซิลิคอนจากกล้องถ่ายภาพการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ $\text{CuK}\alpha_1$ ( $1.5406 \text{ \AA}$ ) ที่อุณหภูมิ $95^\circ\text{C}$	102
รูปที่ 5.4	การรอกัลป์เส้นโค้ง เพื่อหาค่าแลททิส์พารามิเตอร์ $a$ ของผลึกซิลิคอน	103
รูปที่ 5.5	การขยายตัวของซิลิคอนเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น	104
รูปที่ 5.6	กราฟสำหรับแก้ความคลาดเคลื่อนของ $\sin^2\theta_{\text{obs}}$	108
รูปที่ 5.7	การเลื่อนของเส้นการสะท้อนจากผลึกในระบบบรมโบฮิตรีลไปเป็นผลึกในระบบคิวบิกเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ของโลหะผสม $\text{Pb}_{0.05}\text{Sn}_{0.15}\text{Ge}_{0.8}\text{Te}$	117
รูปที่ 5.8	การหาอุณหภูมิในการเปลี่ยนเฟลด้วยวิธีการรอกัลป์เส้นโค้งซึ่งได้จากการลงจุดค่าของ $\Delta D$ เทียบกับอุณหภูมิ	118
รูปที่ 5.9	การแปรผันของอุณหภูมิขณะเกิดการเปลี่ยนเฟลกับปริมาณ $\text{GeTe}$ ในส่วนผสม	121
รูปที่ 5.10 (ก)	การขยายตัวของ $\text{GeTe}$ และการเปลี่ยนแปลงของแลททิส์พารามิเตอร์ $\alpha$ จากอุณหภูมิ 28 ถึง $500^\circ\text{C}$	123
รูปที่ 5.10 (ข)	การขยายตัวของ $\text{Pb}_{0.05}\text{Sn}_{0.15}\text{Ge}_{0.8}\text{Te}$ และการเปลี่ยนแปลงของแลททิส์พารามิเตอร์ $\alpha$ จากอุณหภูมิ 28 ถึง $475^\circ\text{C}$	124
รูปที่ 5.10 (ค)	การขยายตัวของ $\text{Pb}_{0.1}\text{Sn}_{0.3}\text{Ge}_{0.6}\text{Te}$ และการเปลี่ยนแปลงของแลททิส์พารามิเตอร์ $\alpha$ จากอุณหภูมิ 28 ถึง $350^\circ\text{C}$	125
รูปที่ 5.10 (ง)	การขยายตัวของ $\text{Pb}_{0.15}\text{Sn}_{0.45}\text{Ge}_{0.4}\text{Te}$ และการเปลี่ยนแปลงของแลททิส์พารามิเตอร์ $\alpha$ จากอุณหภูมิ 28 ถึง $380^\circ\text{C}$	126
รูปที่ 5.10 (จ)	การขยายตัวของ $\text{Pb}_{0.175}\text{Sn}_{0.525}\text{Ge}_{0.3}\text{Te}$ และการเปลี่ยนแปลงของแลททิส์พารามิเตอร์ $\alpha$ จากอุณหภูมิ 28 ถึง $420^\circ\text{C}$	127
รูปที่ 5.10 (ฉ)	การขยายตัวของ $\text{Pb}_{0.2}\text{Sn}_{0.6}\text{Ge}_{0.2}\text{Te}$ จากอุณหภูมิ $28^\circ\text{C}$ ถึง $420^\circ\text{C}$	128
รูปที่ 5.10 (ช)	การขยายตัวของ $\text{Pb}_{0.25}\text{Sn}_{0.75}\text{Te}$ จากอุณหภูมิ $28^\circ\text{C}$ ถึง $515^\circ\text{C}$	129

## รายการตารางประกอบ

ตารางที่	หน้า
2.1 ค่าของความยาวคลื่น ของรังสีเอ็กซ์ชนิด K	8
2.2 ระบบผลึกและบราวเวสแลททิส	10
2.3 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะห่างของระนาบกับแลททิสพารามิเตอร์	17
3.1 ปริมาณของโลหะ Pb, Sn, Ge และ Te ในส่วนผสมที่ได้เตรียมขึ้น	49-50
3.2 อุณหภูมิสุดท้ายและเวลาที่ใช้ในการ แอนนิลโลหะผสม	53-54
4.1 ขั้นตอนในการคำนวณ $\sin^2\theta$ จากตำแหน่งเส้นการสะท้อนบนฟิล์ม ซึ่งเกิดจากการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของ SnTe ด้วยกล้องชนิดกึ่งนิเออร์เฮกก์	61
4.2 ขั้นตอนในการคำนวณ $\sin^2\theta$ จากตำแหน่งเส้นการสะท้อนบนฟิล์ม ซึ่งเกิดจากการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของ GeTe ด้วยกล้องชนิดกึ่งนิเออร์เฮกก์	64
4.3(ก) แลททิสพารามิเตอร์ของโลหะผสม $Pb_{1-x-y}Sn_xGe_yTe$ ตามแนวส่วนผสม $1-x-y=0$	66
4.3(ข) แลททิสพารามิเตอร์ของโลหะผสม $Pb_{1-x-y}Sn_xGe_yTe$ ที่อัตราส่วน $1-x-y:x = 3:1$	67
4.3(ค) แลททิสพารามิเตอร์ของโลหะผสม $Pb_{1-x-y}Sn_xGe_yTe$ ที่อัตราส่วน $1-x-y:x = 1:1$	68
4.3(ง) แลททิสพารามิเตอร์ของโลหะผสม $Pb_{1-x-y}Sn_xGe_yTe$ ที่อัตราส่วน $1-x-y:x = 1:3$	69
4.4 แลททิสพารามิเตอร์ของโลหะผสม $Pb_{1-x-y}Sn_xGe_yTe$ ตามแนวส่วนผสม $x = 0$ ซึ่งเป็นผลของ วูลเลย์และนิโคลิค	79
4.5 แลททิสพารามิเตอร์ของโลหะผสม $Pb_{1-x-y}Sn_xGe_yTe$ ตามแนวส่วนผสม $1-x-y = 0$ ซึ่งเป็นผลของมาเชลล์กี และผู้ร่วมงาน	80
4.6 สัมการแสดงการแปรผันของแลททิสพารามิเตอร์ $\alpha$ กับปริมาณ GeTe ในโลหะผสม $Pb_{1-x-y}Sn_xGe_yTe$	84
4.7 ค่าของ $\frac{\Delta V}{V_c}$ สำหรับโลหะผสมตามแนว $1-x-y = 0$ และ $1-x-y:x = 1:3, 3:1, 1:1$	95
5.1 ขั้นตอนในการคำนวณมุม $\theta$ จากเส้นการสะท้อนบนฟิล์มภาพถ่ายการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของผลึกผงซิลิคอน ด้วยกล้องชนิดเดอบายเชอเรอร์	100
5.2 ค่าของแลททิสพารามิเตอร์ $a$ คำนวณจากเส้นการสะท้อนที่มุม $\theta$ ต่าง ๆ กัน และค่าของเนลสัน-โรเลย์ฟังก์ชัน ซึ่งใช้ในการอริทัลป์เส้นโค้ง เพื่อหาแลททิสพารามิเตอร์	101

	รายการตารางประกอบ (ต่อ)	หน้า
	ของซิลิคอนที่อุณหภูมิห้อง	101
5.3	ขั้นตอนในการคำนวณมุม $\theta$ โดยใช้ข้อมูลจากภาพถ่ายการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ที่อุณหภูมิ $100^{\circ}\text{C}$ ของ $\text{GeTe}$	106
5.4	ขั้นตอนการคำนวณ $\sin^2\theta_{\text{corr}}$ จากข้อมูลการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของ $\text{GeTe}$ ที่อุณหภูมิ $100^{\circ}\text{C}$	107
5.5(ก)	แลททิส์พารามิเตอร์ของ $\text{Pb}_{0.25}\text{Sn}_{0.75}\text{Te}$ ที่อุณหภูมิ $28^{\circ}\text{C}$ ถึง $515^{\circ}\text{C}$	109
5.5(ข)	แลททิส์พารามิเตอร์ของ $\text{Pb}_{0.2}\text{Sn}_{0.6}\text{Ge}_{0.2}\text{Te}$ ที่อุณหภูมิ $28^{\circ}\text{C}$ ถึง $420^{\circ}\text{C}$	110
5.5(ค)	แลททิส์พารามิเตอร์ของ $\text{Pb}_{0.175}\text{Sn}_{0.525}\text{Ge}_{0.3}\text{Te}$ ที่อุณหภูมิ $28^{\circ}\text{C}$ ถึง $400^{\circ}\text{C}$	111
5.5(ง)	แลททิส์พารามิเตอร์ของ $\text{Pb}_{0.15}\text{Sn}_{0.45}\text{Ge}_{0.4}\text{Te}$ ที่อุณหภูมิ $28^{\circ}\text{C}$ ถึง $380^{\circ}\text{C}$	112
5.5(จ)	แลททิส์พารามิเตอร์ของ $\text{Pb}_{0.1}\text{Sn}_{0.3}\text{Ge}_{0.6}\text{Te}$ ที่อุณหภูมิ $28^{\circ}\text{C}$ ถึง $350^{\circ}\text{C}$	113
5.5(ฉ)	แลททิส์พารามิเตอร์ของ $\text{Pb}_{0.05}\text{Sn}_{0.15}\text{Ge}_{0.8}\text{Te}$ ที่อุณหภูมิ $28^{\circ}\text{C}$ ถึง $475^{\circ}\text{C}$	114
5.5(ช)	แลททิส์พารามิเตอร์ของ $\text{GeTe}$ ที่อุณหภูมิ $28^{\circ}\text{C}$ ถึง $500^{\circ}\text{C}$	115
5.6	ระยะห่าง ระหว่างเส้นการสะท้อน 220 และ $\bar{2}20$ ของโลหะผสม $\text{Pb}_{1-x-y}\text{Sn}_x\text{Ge}_y\text{Te}$ ที่อุณหภูมิ $28^{\circ}\text{C}$ ถึงอุณหภูมิซึ่งเกิดการเปลี่ยนเฟส	119
5.7	อุณหภูมิ ซึ่ง เกิดการเปลี่ยนเฟสของโลหะผสม $\text{Pb}_{1-x-y}\text{Sn}_x\text{Ge}_y\text{Te}$ ที่อัตราส่วน $1-x-y:x = 1:3$	120
6.1	การแปรผันของแลททิส์พารามิเตอร์ $a$ จากการทดลองสกัดกลุ่มข้อมูลแบบต่างๆ กัน	135
6.2	การแปรผันของแลททิส์พารามิเตอร์ $a$ จากการทดลองสกัดกลุ่มข้อมูลแบบต่างๆ กัน	136