บทที่ 3

การเตรียมโลหะผสม $Pb_{1-x-y}\ Sn_xGe_yTe$

3.1 ความรู้พื้นฐานในการเตรียมโลหะผสม $Pb_{1-x-y}\ Sn_xGe_yTe$

3.1.1 สมบัติของโลหะผสมโดยทั่วไป

ธาตุที่เป็นโลหะจะมี สมบัติเฉพาะของธาตุนั้น ๆ ทำให้จำกัดยอบย่ายในการใช้งาน เนื่องจากในการใช้งานบางครั้งต้องการโลหะที่มีคุณสมบัตินอกเหนือจากธาตุที่มีอยู่เพื่อให้มีคุณสมบัติตามความเหมาะสมในการใช้งาน จึงมีการนำโลหะสองชนิดหรือมากกว่ามาหลอมรวมกัน เพื่อให้ได้คุณสมบัติตามต้องการ โลหะที่ได้จากการหลอมรวมกันนี้ เรียกว่า โลหะผสม (Alloy) ในการทำให้เกิดโลหะผสมนั้นนอกเหนือจาก วิธีการหลอมแล้ว ยังสามารถเตรียมได้โดยอาศัยการฟุ้งกระจายของอะตอมภายในของแข็ง (solid state diffussion) (29) ซึ่งวิธีการเตรียมโลหะผสม ด้วยวิธีการฟุ้งกระจายของอะตอมนี้ จะทำการบดโลหะเป็นผงเล็ก ๆ แล้วผสมเข้าด้วยกันในอัตราส่วนที่ต้องการแล้วอัดเข้าด้วยกัน จากนั้นนำไปแอนนีลในอุณหภูมิที่เหมาะสม

โลหะผสมส่วนใหญ่จะสามารถรวมตัวกันได้ดีในสถานะที่เป็นไอ และสถานะที่เป็นของเหลว และบางครั้งโลหะที่สามารถรวมตัวกันได้ดีในขณะที่เป็นของเหลวจะแยกตัวออกจากกันในขณะที่เย็นลงและเกือบจะไม่สามารถรวมตัวกันได้เลยในสถานะที่เป็นของแข็ง

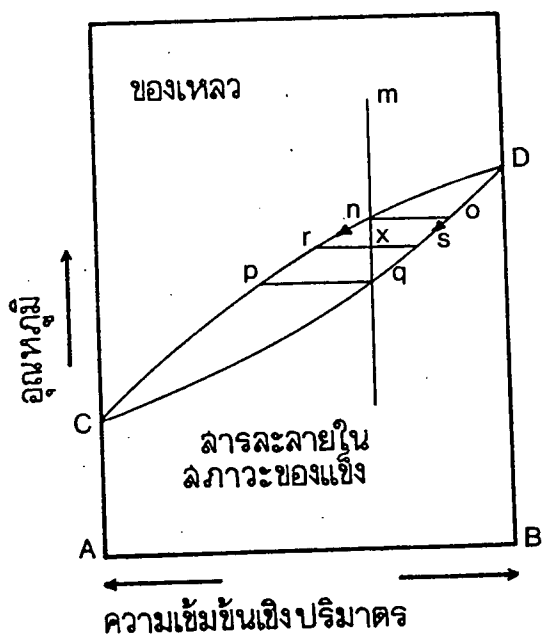
3.1.2 การสมดุล ของโลหะผสม

แผนภาพในรูปที่ 3.1 (30) เป็นแผนภาพ 2 มิติ แบบหนึ่งของการสมดุลทางความร้อน (thermal equilibrium) ของโลหะผสม ซึ่งประกอบด้วยธาตุโลหะ 2 ชนิด คือ โลหะ A และโลหะ B เส้นโค้งของแข็ง (solidus line) และเส้นโค้งของเหลว (liquidus line) เป็นขอบเขตแสดงสถานะของโลหะผสม ว่าจะเป็นของแข็งหรือของเหลวที่ส่วนผสมและอุณหภูมิต่าง ๆ

โลหะผสมที่มีส่วนผสม และอุณหภูมิอยู่ใต้เส้นโค้งของแข็งจะเป็นของแข็งทั้งหมดและโลหะผสมที่มีส่วนผสม และอุณหภูมิอยู่เหนือเส้นโค้งของเหลว จะเป็นของเหลวทั้งหมด สำหรับโลหะผสมที่มีส่วนผสม และอุณหภูมิระหว่างเส้นโค้งทั้งสอง จะมีทั้ง ของแข็งและของเหลวปนกัน โดยที่อัตราส่วนระหว่างของแข็งและของเหลว จะสามารถอธิบายได้ด้วย

หลักการของ คานโยก (lever principle) จากแผนภาพการแข็งตัวของโลหะผสม ที่มีส่วนผสมและอุณหภูมิที่ตำแหน่ง m จะสามารถอธิบายได้ดังนี้คือ เมื่ออุณหภูมิลดลงมาถึงที่ตำแหน่ง n ซึ่งเป็นเส้นโค้งของเหลว จะเริ่มเกิดผลึกของแข็งที่มีส่วนผสมในตำแหน่ง o ขณะเดียวกันจะเกิดการเปลี่ยนแปลงของส่วนผสมในของเหลวในทางที่ทำให้ปริมาณของโลหะ B ลดน้อยลง ในขณะที่อุณหภูมิลดลงนี้จะเกิดการแข็งตัวมากขึ้นตามลำดับ โดยเกิดขึ้นในส่วนผสมตามแนวเส้นโค้งของแข็งจาก o ไปยัง q และโลหะผสมในส่วนที่เป็นของเหลวจะเกิดการเปลี่ยนแปลงของส่วนผสมในแนวเส้นโค้งของเหลวจากส่วนผสมที่ตำแหน่ง n ไปสู่ส่วนผสมที่ตำแหน่ง p ของแข็งที่เกิดขึ้นจากตำแหน่งของ o ไปยัง q นี้จะเกิดการฟุ้งกระจายของอะตอมภายในของแข็งพร้อมกันไปด้วย และถ้าการลดของอุณหภูมิช้าเพียงพอ ที่จะทำให้เกิดการสมดุล อยู่ตลอดเวลาในที่สุดตำแหน่ง q จะเกิดโลหะผสมซึ่งเป็นของแข็งทั้งหมด และมีส่วนผสมเหมือนกับส่วนผสมเริ่มต้นที่ตำแหน่ง m อัตราส่วน ระหว่างของแข็ง และของเหลวซึ่งสมดุล อยู่ร่วมกัน ที่อุณหภูมิระหว่างเส้นโค้งของแข็งและของเหลวสามารถอธิบายได้ด้วยหลักการของคานโยก คือ

$$\frac{\text{ปริมาณของส่วนผสมซึ่งเป็นของแข็งที่ตำแหน่ง s}}{\text{ปริมาณของส่วนผสม ซึ่งเป็นของเหลวที่ตำแหน่ง r}} = \frac{rx}{xs}$$



รูปที่ 3.1 แผนภาพการสมดุล ทางความร้อนชนิดหนึ่งของโลหะผสมซึ่งประกอบด้วยโลหะสองชนิด

3.1.3 การใช้ความร้อนเพื่อกำจัดการเกิดแก่นในโลหะผสม

โดยทั่วไปแล้วโลหะผสมที่เกิดขึ้น จะไม่เป็นเนื้อเอกพันธ์ ทันทีหลังจากที่ทำให้แข็งตัวทั้งนี้เพราะขบวนการทำให้แข็งตัว จะทำให้เกิด เกรเดียนต์ ผลประกอบ (composition gradient) กระจายอยู่ทั่วไปในเนื้อโลหะผสม จากหัวข้อ 3.1.2 พบว่า การเกิดโลหะผสม ส่วนผสมเริ่มต้น m ที่ตำแหน่ง q จะต้องมีเงื่อนไข คือ การลดลงของอุณหภูมิจะต้องช้าเพียงพอเพื่อที่จะให้โลหะผสมอยู่ในสภาวะสมดุล จากการฟุ้งกระจายของอะตอมตลอดเวลา แต่ถ้าอุณหภูมิลดลงเร็วเกินไป โลหะผสมที่แข็งตัวจะมีส่วนผสมเกิดขึ้นได้หลายส่วนผสมตั้งแต่ o ถึง q โดยส่วนที่เริ่มแข็งตัวก่อนจะเกิดเป็นแก่น ซึ่งถูกล้อมรอบด้วยส่วนที่แข็งตัวทีหลังแก่นที่เกิดขึ้นนี้สามารถ ทำให้หมดไปได้ด้วยวิธีการนำโลหะผสมที่เตรียมขึ้นไปเผาในอุณหภูมิที่เหมาะสมเพื่อให้เกิดการฟุ้งกระจายของอะตอมภายในของแข็ง ในการเผานี้จะต้องพยายามให้อุณหภูมิสูงที่สุดโดยไม่ทำให้เกิดการหลอมละลายของโลหะผสม ดังนั้นอุณหภูมิที่เหมาะสมจึงเป็นอุณหภูมิที่อยู่ในตำแหน่งใต้เส้นโค้งของแข็งเล็กน้อย

3.2 อุปกรณ์ ในการเตรียมโลหะผสม $Pb_{1-x-y}Sn_xGe_yTe$

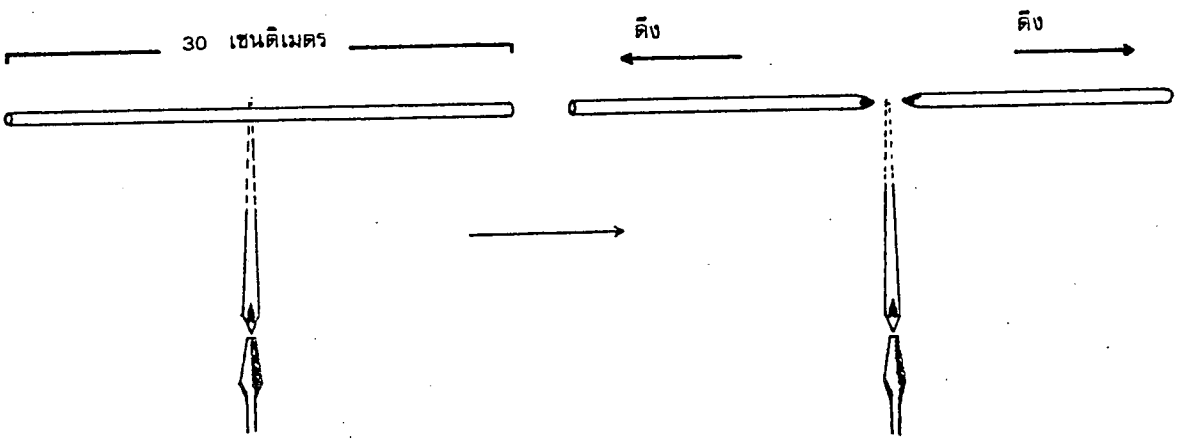
1. โลหะ Pb, Sn, Ge, และ Te บริสุทธิ์ 99.999%
2. หลอดแก้ว ควอทซ์ ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 4 มิลลิเมตร
3. เครื่องปั๊มสูญญากาศ
4. เครื่องชั่งไฟฟ้า
5. ชุดอุปกรณ์สำหรับหลอมหลอดแก้วควอทซ์ โดยใช้เปลวความร้อนจากออกซิเจน และอะเซทิลีน
6. เตาไฟฟ้าสำหรับหลอมโลหะ รูปที่ 3.6
7. ลวดวัดอุณหภูมิ

3.3 การบรรจุสารลงในหลอดแก้วสูญญากาศ

3.3.1 การเตรียมหลอดแก้วควอทซ์เพื่อบรรจุสาร

1. นำหลอดแก้วควอทซ์ มาตัดเป็นท่อนยาวท่อนละประมาณ 30 เซ็นติเมตรและทำความสะอาดโดยแช่ลงในสารละลายสีแดงของโครเมี่ยมไทรออกไซด์เป็นเวลา 24 ชั่วโมง นำหลอดแก้วขึ้นจากสารละลาย ล้างด้วยน้ำกลั่นให้สะอาด

2. ใช้เปลวไฟจากการสันดาปของออกซิเจน และอะเซทิลีน หลอมบริเวณกึ่งกลางของหลอดแก้ว พร้อมกับดึงให้แยกออกจากกัน จะได้หลอดแก้วปลายปิดด้านเดียว 2 หลอด ดังในรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 การเตรียมหลอดแก้วสำหรับบรรจุสาร

3.3.2 การคำนวณส่วนผสมของโลหะผสม

โลหะผสม $Pb_{1-x-y}Sn_xGe_yTe$ ได้เตรียมขึ้นที่ส่วนผสมต่าง ๆ ดังนี้ คือ

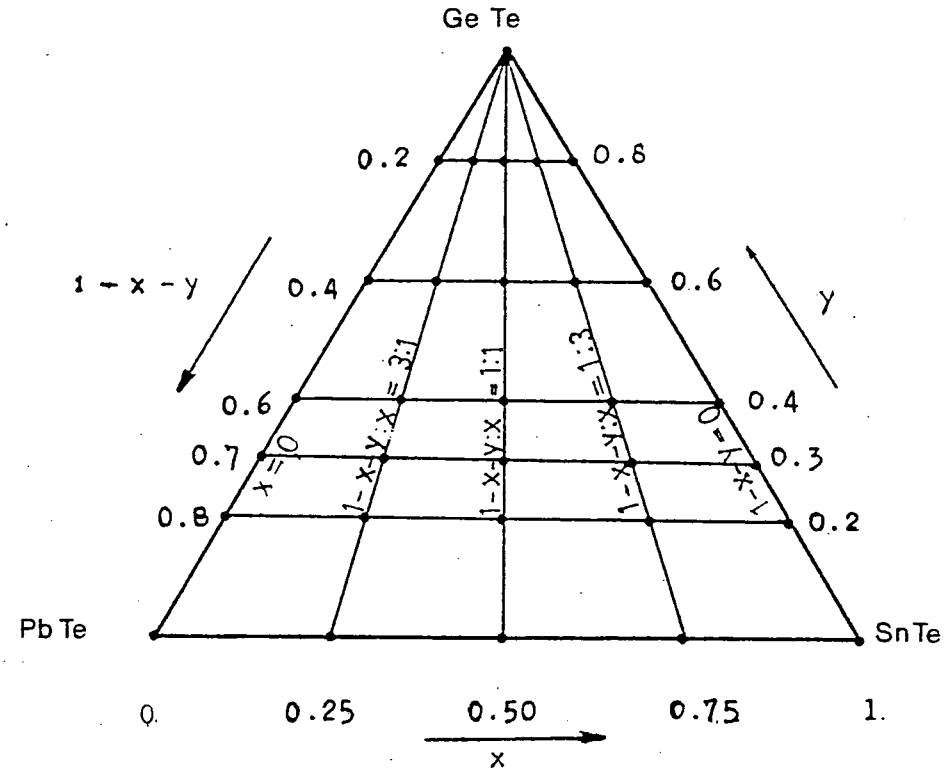
PbTe : SnTe หรือ 1-x-y:x = 1:3 ที่ (x,y) = (0.15, 0.8), (0.3,0.6), (0.45, 0.4), (0.525, 0.3), (0.6,0.2), (0.75, 0.0)

PbTe:SnTe หรือ 1-x-y:x = 1:1 ที่ (x,y) = (0.1,0.8),(0.2,0.6),(0.3, 0.4), (0.35,0.3),(0.4,0.2), (0.5, 0.0)

PbTe:SnTe หรือ 1-x-y:x = 3:1 ที่ (x,y) = (0.5,0.8),(0.1,0.6),(0.15,0.4), (0.175,0.3),(0.2,0.2), (0.25, 0.0)

PbTe = 0 หรือ 1-x-y = 0 ที่ (x,y) = 0.2,0.8), (0.4,0.6), (0.6, 0.4), (0.7, 0.3), (0.8, 0.2), (1,0)

SnTe = 0 หรือ x=0 ที่ (x, y) = (0, 0.8), (0, 0.6), (0, 0.4), (0, 0.3), (0, 0.2), (0, 0.0)



รูปที่ 3.3 แผนภาพแสดงส่วนผสมของ $Pb_{1-x-y}Sn_xGe_yTe$

- แสดงตำแหน่งของส่วนผสมที่ได้เตรียมขึ้น

ส่วนผสมที่เตรียมขึ้นนี้สามารถแสดงได้ด้วยตำแหน่งในแผนภาพแสดงส่วนผสม ดังในรูปที่ 3.3 การเตรียมโลหะผสมนี้ได้เตรียมขึ้นส่วนผสมละ 1 กรัม ซึ่งสามารถคำนวณปริมาณของโลหะต่าง ๆ ได้จากน้ำหนักอะตอมของ Pb, Sn, Ge และ Te ดังตัวอย่างต่อไปนี้

ถ้าให้โลหะผสมที่ต้องการเตรียม คือ $Pb_{0.3}Sn_{0.3}Ge_{0.4}Te$

น้ำหนักอะตอมของ Pb = 207.21

น้ำหนักอะตอมของ Sn = 118.70

น้ำหนักอะตอมของ Ge = 72.60

น้ำหนักอะตอมของ Te = 127.61

ดังนั้น 0.3 (น้ำหนักอะตอมของ Pb) + 0.3 (น้ำหนักอะตอมของ Te)

+ 0.4 (น้ำหนักอะตอมของ Ge) + (น้ำหนักอะตอมของ Te) = 254.423 กรัม

โลหะผสม 254.423กรัม ประกอบด้วย Pb = 0.3 (น้ำหนักอะตอมของ Pb) กรัม

ใน 1 กรัมของโลหะผสมจึงประกอบด้วย Pb = $\frac{0.3 \text{ (น้ำหนักอะตอมของ Pb)}}{254.423}$ กรัม

= 0.2443

ในทำนองเดียวกัน

ใน 1 กรัมของโลหะผสมจะประกอบด้วย Sn = $\frac{0.3 \text{ (น้ำหนักอะตอมของ Sn)}}{254.423}$ กรัม

$$= 0.1399$$

ใน 1 กรัมของโลหะผสมจะประกอบด้วย Ge $= \frac{0.4 \text{ (น้ำหนักอะตอมของ Ge)}}{254.423}$ กรัม

$$= 0.1141$$

ใน 1 กรัมของโลหะผสมจะประกอบด้วย Te $= \frac{1 \text{ (น้ำหนักอะตอมของ Te)}}{254.423}$ กรัม

$$= 0.5016 \text{ กรัม}$$

ตารางที่ 3.1 ได้แสดงส่วนผสมต่าง ๆ ที่เตรียมขึ้น พร้อมทั้งแสดงถึงปริมาณของโลหะที่มีในส่วนผสมนั้น โดยคำนวณจากน้ำหนักอะตอมของ Pb, Sn, Ge และ Te ข้างต้น

ตารางที่ 3.1

ปริมาณของโลหะ Pb, Sn, Ge และ Te ในส่วนผสมที่ได้เตรียมขึ้น

จำนวนโมล ร้อยละ			ปริมาณสารคิดเป็นกรัม			
Pb Te	Sn Te	Ge Te	Pb	Sn	Ge	Te
–	–	100	–	–	0.3626	0.6374
20	–	80	0.1824	–	0.2557	0.5618
40	–	60	0.3262	–	0.1715	0.5023
60	–	40	0.4425	–	0.1034	0.4542
70	–	30	0.4926	–	0.0739	0.4334
80	–	20	0.5384	–	0.0472	0.4145
100	–	–	0.6188	–	–	0.3811
15	5	80	0.1396	0.0266	0.2607	5.7318
30	10	60	0.2535	0.0484	0.1776	0.5204
45	15	40	0.3483	0.0665	0.1085	0.4767
52.5	17.5	30	0.3899	0.0745	0.0781	0.4575
60	20	20	0.4284	0.0818	0.0500	0.4397
75	25	–	0.4970	0.0949	–	0.4081
10	10	80	0.0949	0.0544	0.2660	0.5846

ตารางที่ 3.1 (ต่อ)

จำนวนโมลร้อยละ			ปริมาณสารคิดเป็นกรัม			
Pb Te	Sn Te	Ge Te	Pb	Sn	Ge	Te
20	20	60	0.1753	0.1004	0.1843	0.5399
30	30	40	0.2443	0.1399	0.1141	0.5016
35	35	30	0.2753	0.1577	0.0827	0.4844
40	40	20	0.3042	0.1742	0.0533	0.4683
50	50	-	0.3565	0.2042	-	0.4392
5	15	80	0.0484	0.0833	0.2716	0.5967
10	30	60	0.0911	0.1565	0.1915	0.5609
15	45	40	0.1289	0.2215	0.1204	0.5292
17.5	52.5	30	0.1462	0.2513	0.0878	0.5146
20	60	20	0.1626	0.2795	0.5698	0.5008
25	75	-	0.1930	0.3316	-	0.4754
-	20	80	-	0.1134	0.2773	0.6093
-	40	60	-	0.2172	0.1992	0.5836
-	60	40	-	0.3125	0.1274	0.5600
-	70	30	-	0.3574	0.0937	0.5489
-	80	20	-	0.4005	0.0612	0.5382
-	100	-	-	0.4819	-	0.5181

3.3.3 การชั่ง และ บรรจุสารลงในหลอดแก้วควอทซ์

การชั่งสารและบรรจุสารลงในหลอดแก้วควอทซ์ได้ทำตามขั้นตอนดังนี้ คือ

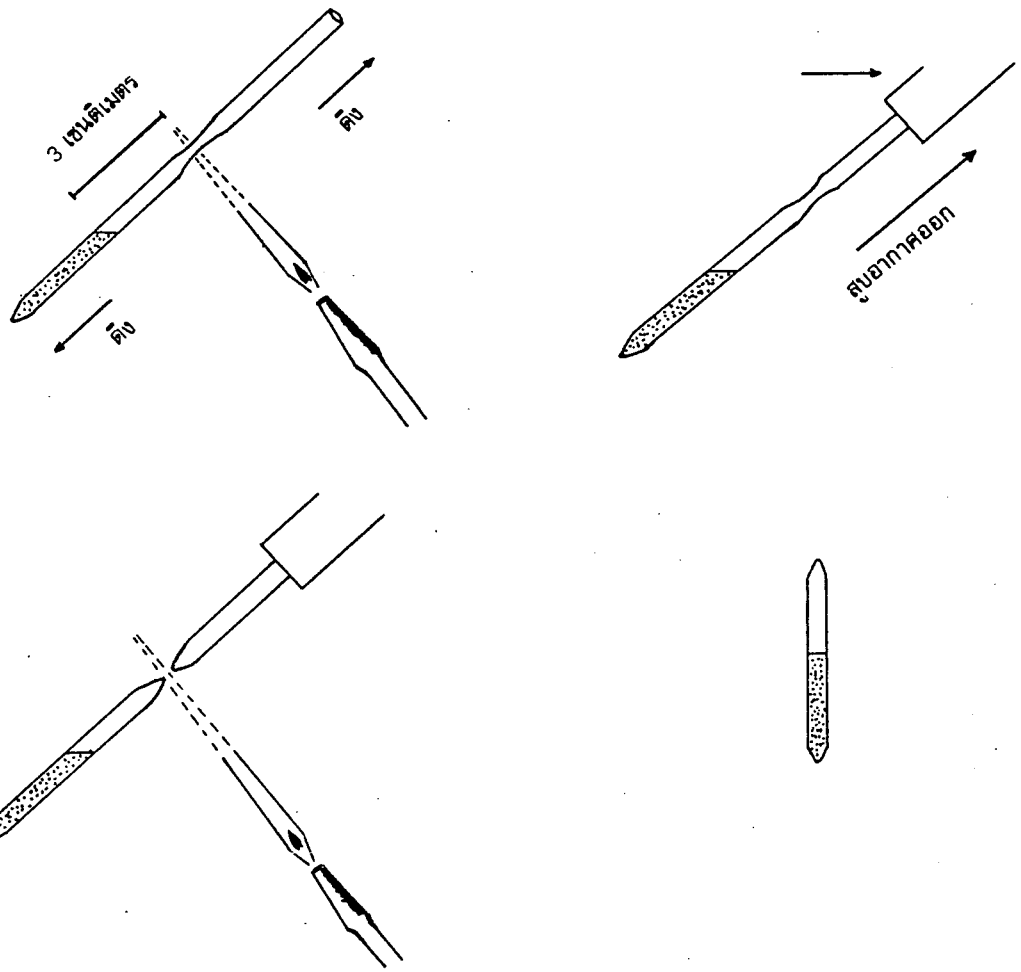
1. ทำความสะอาดผิวโลหะของ Pb และ Sn ซึ่งจะมีออกไซด์ติดอยู่ โดยวิธีการขูดผิวออกด้วยใบมีดเหล็กที่สะอาด โลหะ Pb และ Sn จะมีลักษณะของเนื้อโลหะอ่อน สามารถตัดเป็นชิ้นเล็ก ด้วยใบมีด สำหรับ Ge และ Te จะมีลักษณะแข็งเปราะสามารถหักให้เป็นชิ้นเล็ก ๆ ด้วยคีมตัดลวด

2. ชั่งสารในอัตราส่วนผสมตามที่ได้คำนวณ และแสดงไว้ในตารางที่ 3.1 โดยใช้เครื่องชั่งไฟฟ้าที่ให้ความละเอียดได้ในทศนิยมตำแหน่งที่ 4 ของกรัม

3. บรรจุสารลงในหลอดแก้ว แล้วนำหลอดแก้วที่บรรจุสารแล้วมาทำการหลอมด้วยเปลวไฟจากออกซิเจน และอะเซทิลีน ที่บริเวณสูงกว่าตำแหน่งของสารที่บรรจุอยู่ 3 เซ็นติเมตร พร้อมทั้งดึงให้หลอดแก้วคอดลงในบริเวณนั้น โดยระวังไม่ให้หลอดแก้วคอดจนติดกัน การทำให้หลอดแก้วคอดลงนี้ เพื่อให้สามารถหลอมปิดหลอดได้ง่ายในขั้นตอนต่อไป รูปที่ 3.4

4. นำหลอดแก้วบรรจุสาร มาสู่บอากาศออกด้วยเครื่องปั๊มสูญญากาศจนได้ความดัน ภายในหลอดเป็น 0.06 ทอรร์ ความดันนี้สามารถอ่านได้จากเครื่องวัดความดัน ซึ่งติดอยู่กับเครื่องปั๊มสูญญากาศ

5. ทำการหลอมปิดปลายหลอดด้วยเปลวไฟจากก๊าซออกซิเจน และอะเซทิลีน



รูปที่ 3.4 ขั้นตอนในการบรรจุสารลงในหลอดแก้วควอทซ์

3.4 <u>ขั้นตอนในการหลอม และเผาโลหะผสม $Pb_{1-x-y}Sn_xGe_yTe$</u>

1. นำโลหะผสมที่เตรียมไว้ในหลอดแก้วมาหลอมในเตาหลอมขนาดใหญ่ โดยปรับให้อุณหภูมิภายในเตาเป็น $1200^{o}C$ ปล่อยให้หลอมละลายเป็นเวลา 24 ชั่วโมง แล้วจึงปิดเตา และให้โลหะผสมเย็นลงภายในเตาหลอม ซึ่งอุณหภูมิภายในเตาจะลดลงอย่างช้า ๆ

2. นำโลหะผสม ออกจากเตา จะมีหลอดบรรจุโลหะผสมบางส่วนแตก ซึ่งคาดว่าเกิดขึ้นจากสัมประสิทธิ์การขยายตัวที่แตกต่างกันของโลหะผสมที่แข็งตัว และหลอดแก้วควอทซ์ เตรียมโลหะผสมนี้ขึ้นใหม่ โดยวิธีการตามขั้นตอนการชั่งสาร และการบรรจุหลอด

3. ทำการถ่ายภาพโลหะผสม ส่วนที่เหลือด้วยวิธีการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ โดยผลึกผง เพื่อตรวจสอบความเป็นเอกพันธ์ ของเนื้อโลหะ และ พิจารณาว่าโลหะนั้นได้เข้าสู่สมดุลหรือไม่ รูปที่ 3.5 แสดงให้เห็นถึงความแตกต่างของฟิล์มภาพถ่ายจากการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของผลึก $Pb_{1-x-y}Sn_xGe_yTe$ ที่สมดุล และ ยังไม่สมดุล

4. บดโลหะผสมที่คาดว่ายังไม่เข้าสู่สมดุล ให้เป็นผงละเอียดและทำการบรรจุหลอดตามขั้นตอนในการบรรจุหลอด

5. นำโลหะผสมที่เตรียมขึ้นใหม่ในข้อ 2 และโลหะผสมจากข้อ 4 มาทำการหลอมในเตาหลอมขนาดเล็กซึ่งสามารถนำสารออกจากเตาได้ทันที ขณะที่โลหะกำลังหลอมอยู่ โดยตั้งอุณหภูมิของเตาหลอมไว้ที่ 1200°C

6. ใช้เวลาหลอมโลหะซึ่งเตรียมขึ้นในข้อ 2 เป็นเวลา 60 นาที และโลหะผสมจากข้อ 4 ใช้เวลาหลอม 2 นาที แล้วนำหลอดบรรจุโลหะผสมออกจากเตาแช่ลงในน้ำเย็น วิธีการนี้จะลดการเกิดแก่นภายในโลหะผสม ทำให้ใช้เวลาน้อยลงในการแอนนีลเพื่อให้โลหะผสมเข้าสู่สมดุล

7. แอนนีลโลหะผสมนี้ในเตาหลอมโดยทดลองที่อุณหภูมิต่าง ๆ กัน ในช่วงอุณหภูมิ 500°C ถึง 600°C โดยใช้เวลา 2 ถึง 4 สัปดาห์

8. นำหลอดบรรจุโลหะผสมออกจากเตาเผาแล้วทุบให้แตกออก ทำการถ่ายภาพการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์โดยผลึกผงเพื่อตรวจสอบสมดุล และความเป็นเอกพันธ์ของเนื้อโลหะ

9. นำโลหะผสมที่คาดว่ายังไม่สมดุล มาทำการบรรจุหลอดแก้ว และหลอมใหม่ตามวิธีการที่ได้กล่าวไว้ในข้อ 5 และ 6 จากนั้นนำมาแอนนีลโดยลดอุณหภูมิลงจากเดิม 50°C

10. ดำเนินการตามขั้นตอน ที่ 8 และ 9 จนกว่าจะได้โลหะผสม ที่สมดุลและมีเฟสเดียว

ตารางที่ 3.2 ได้แสดงถึงอุณหภูมิในขั้นสุดท้ายสำหรับ แอนนีลโลหะผสมที่ส่วนผสมต่าง ๆ และเวลาที่ใช้ในการแอนนีล

ตารางที่ 3.2

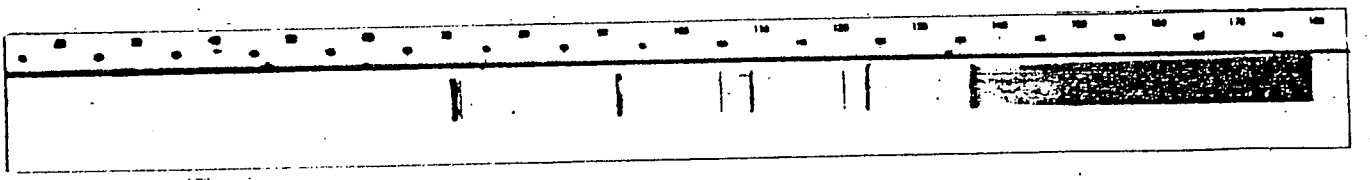
อุณหภูมิสุดท้ายและเวลาในการแอนนีลโลหะผสม

จำนวนโมลร้อยละ			อุณหภูมิ องศาเซลเซียส	เวลาที่ใช้ ในการ แอนนีล	แนวของ ส่วนผสม
Pb Te	Sn Te	Ge Te			
-	-	100	-	-	
20	-	80	580	2 สัปดาห์	x = 0

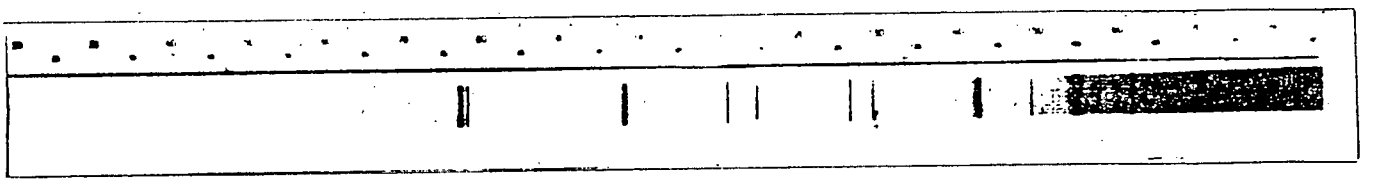
ตารางที่ 3.2 (ต่อ)

จำนวนโมลร้อยละ			อุณหภูมิองค์เซลเซียส	เวลาที่ใช้ในการแอนนีล	แนวของส่วนผสม
Pb Te	Sn Te	Ge Te			
40	-	60	580	2 สัปดาห์	
60	-	40	580	2 สัปดาห์	x = 0
70	-	30	580	2 สัปดาห์	
80	-	20	580	2 สัปดาห์	
100	-	-	580	2 สัปดาห์	
15	5	80	530	2 สัปดาห์	
30	10	60	550	2 สัปดาห์	1-x-y:x
45	15	40	580	2 สัปดาห์	= 3:1
52.5	17.5	30	580	2 สัปดาห์	
60	20	20	600	4 สัปดาห์	
75	25	-	600	4 สัปดาห์	
10	10	80	500	2 สัปดาห์	
20	20	60	500	2 สัปดาห์	1-x-y:x
30	30	40	550	2 สัปดาห์	= 1:1
35	35	30	580	2 สัปดาห์	
40	40	20	600	4 สัปดาห์	
50	50	-	600	4 สัปดาห์	
5	15	80	-	-	
10	30	60	-	-	
15	45	40	600	2 สัปดาห์	1-x-y:x
17.5	52.5	30	600	2 สัปดาห์	=1:3
20	60	20	600	4 สัปดาห์	
25	75	-	600	4 สัปดาห์	
-	20	80	480	2 สัปดาห์	
-	40	60	480	2 สัปดาห์	1-x-y
-	60	40	480	2 สัปดาห์	= 0
-	70	30	580	2 สัปดาห์	
-	80	20	580	2 สัปดาห์	
-	100	-	600	2 สัปดาห์	

หมายเหตุ ส่วนผสมที่ไม่ได้ระบุเวลาและอุณหภูมิในการแอนนีลสามารถเข้าสู่สมดุล ได้ด้วยการ ให้อุณหภูมิลดลงเองภายในเตาหลังจากปิดเตา

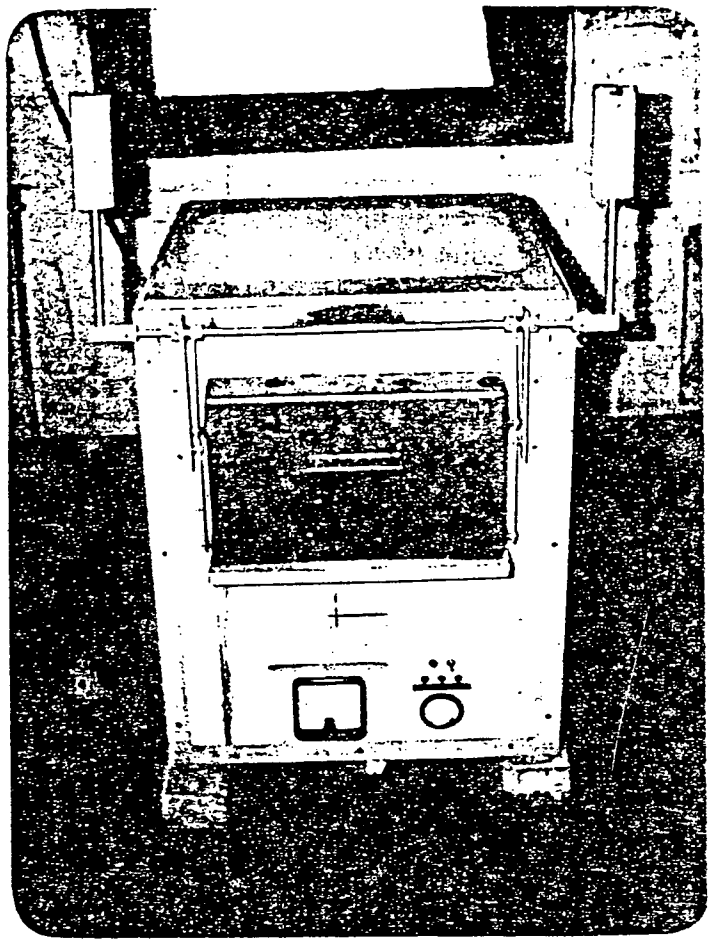


$Pb_{0.8}Ge_{0.2}Te$ ซึ่งสมดุล จะให้เส้นการสะท้อนที่คมและชัดเจนกว่ากรณีที่ยังไม่สมดุล

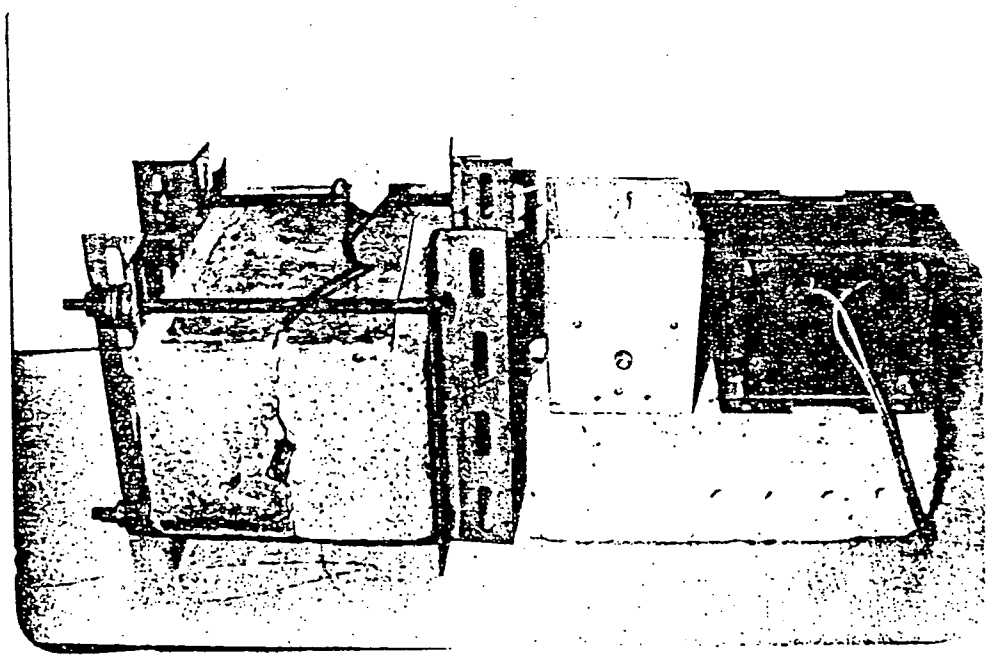


$Pb_{0.8}G_{0.2}Te$ ซึ่งไม่สมดุล

รูปที่ 3.5 ลักษณะของฟิล์มภาพถ่ายการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์จากโลหะผสมที่เข้าสู่สมดุลแล้ว เปรียบเทียบกับโลหะผสมที่ยังไม่เข้าสู่สมดุล



รูปที่ 3.6 (ก) เตาขนาดใหญ่ ซึ่งใช้ในการหลอมและแอนนีลโลหะผสม



รูปที่ 3.6 (ข) เตาขนาดเล็กซึ่งใช้ในการหลอมและแอนนีลโลหะผสม