

เอกสารอ้างอิง

1. Robert Gerald Goodchild, "Crystallography and Optical Properties of some Chalcopyrite Materials." Ph.D.'s Thesis, Department of Physics, University of Ottawa, Ottawa, Ontario, 1981.
2. Shay, J.L. and Wernick, J.H., Ternary Chalcopyrite Semiconductor, pp. 1-127, Pergamon Press, Oxford, 1975.
3. Julie Avon, Kajornyod Yoodee and John C. Woolley., "Lattice Parameter and Optical Energy-Gap Values for $Cu_{1-x}Ag_xGa_{1-y}In_y(Se_{1-z}Te_z)_2$ Alloys." to be published, Department of Physics, University of Ottawa; Ottawa, Canada.
4. วิรุฬห์ สายคณิต และคณะ , การศึกษามลิกกิ่งตัวนำซาลโคไพไรท์ ชนิดโลหะผสมเพื่อใช้ในการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์, วารสาร.วิทยาศาสตร์, ฉบับที่ 11, ปีที่ 34, 2523.
5. Shewchun, J., Loferki, J.J., Beaulieu R., Chapman, G.H. and Garside, B.K., J. Appl Phys. 50(1979) : 11.
6. Charle Kittel, Introduction to Solid State Physics, 5th ed., pp. 25-28, 207-211, John Wiley & Sons, Inc., New York, 1971 .
7. Somphong Chatraphorn, J. Sci. Soc. Thailand. 6(1980) : 239-247.
8. Abrahams, S.C. and Bernstein, J.L., J. Chem. Phys. 59(1973) : 5415-5422.

9. Sze, SM., Physics of Semiconductor Devices, 2nd ed., pp. 12-14,
John Wiley & Sons, Inc., New York, 1981.
10. Tell, B. and Kasper, H.M. , Phys Rev B. 4(1971), 4455.
11. Shay, J.L., Tell, B. and Kasper, H.M. Phys. Rev. B. 7(1973):4485.
12. Gerald Goodchild, John C. Woolley and Jesus Gonazdes, J. Appl. Phys. 19(1980), 123-128.
13. Haupt, H. and Hess, K., Ternary Compound, pp. 5-13, Conferences Series Number 35, The Institute of Bristol and London, 1977.
14. Shay, J.S., Prog. Crystal Growth Charact. 3(1981) : 333-389.
15. Cullity, B.D., Elements of X-Ray Diffraction, pp. 1-136, 177-211, Addison-Wesley Publishing Company, Inc., 1956.
16. Kittel, C. Quantum Theory of Solids, pp. 294, John Wiley & Sons, Inc., New York. London. Sydney, 1963.
17. Abeles, F., Optical Properties of Semiconductor, pp. 23-26, North-Holland Publishing Company, Amsterdam. London, 1972.
18. Wollardson, R.K., Albert C. Beer, Semiconductors and Semimetals, pp. 155-169, Academic Press, New York, 1967.
19. Frederick Wooten, Optical Properties of Solids, pp. 1-29, 80-116, Academic Press, New York and London, 1972.
20. Shay, J.L., Phys. Rev. B. 4(1971) : 2482-2483.
21. Sokolnikoff, I.S. and Redheffer, R.M., Mathematics of Physics and Modern Engineering, 2nd ed., pp. 673-676, McGraw-Hill Book Company, New York, 1966.

ภาคผนวก ก.

การสร้างเตาหลอมโซนเดี่ยว

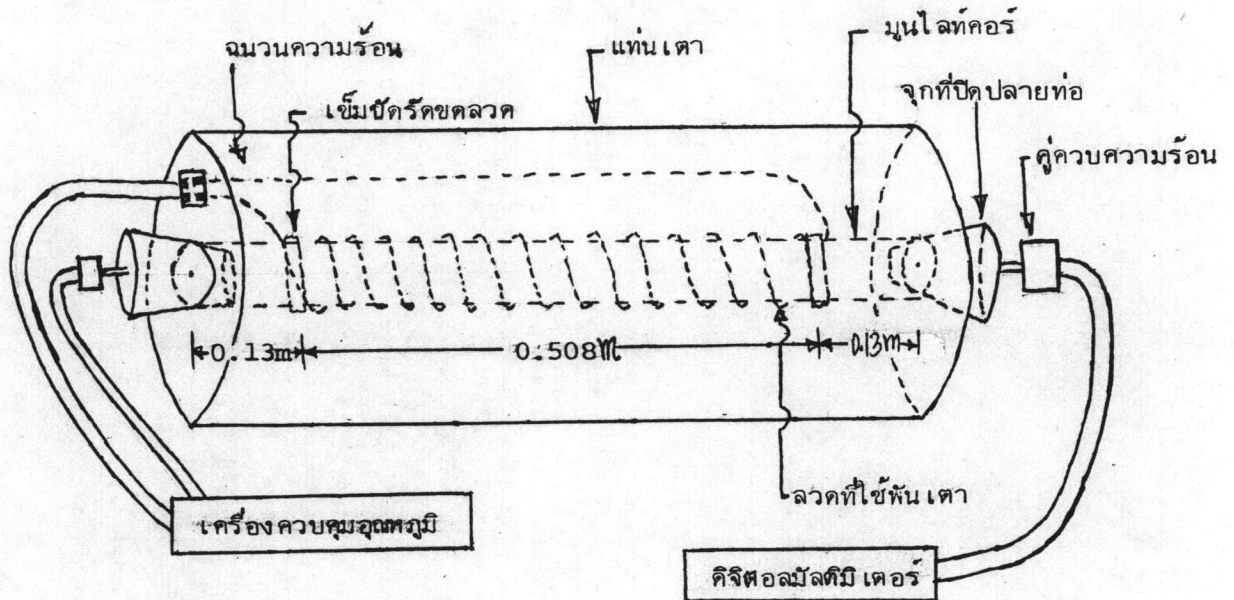
เตาหลอมโซนเดี่ยว (single zone furnace) นี้เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมผลิตภัณฑ์และมีลักษณะภายในดังรูปที่ 1 อุปกรณ์นี้ได้ถูกสร้างขึ้นก่อนการทดลอง เมื่อสร้างเสร็จแล้วก็ได้ทดสอบอุณหภูมิภายในเตา ปรากฏว่าเป็นเตาที่ใช้สำหรับหลอมสารและแอนนิลสารได้รายละเอียดต่าง ๆ เกี่ยวกับการสร้างและการทดสอบอุณหภูมิภายในเตามีดังนี้

อุปกรณ์ที่ใช้สร้าง มีดังนี้คือ

1. ลวดที่ใช้พันเตาเป็นลวดที่มีความต้านทาน $1.47 \Omega/m$ เราต้องการนำลวดนี้มาพันรอบท่อโดยให้ส่วนหนึ่งของท่อยาว 0.508 m ถูกพันหมด ดังนั้นจึงต้องเตรียมลวดยาวประมาณ 18.672 m ที่สามารถพันให้ได้จำนวนรอบประมาณ 98 รอบ จากการทราบความต้านทานของลวดต่อหน่วยความยาวและความยาวของลวดที่ใช้ทำให้ทราบว่าความต้านทานทั้งหมดของลวดมีค่าประมาณ 27.448Ω เมื่อปล่อยกระแสไฟฟ้าผ่านขดลวดดังกล่าวคาดว่าขดลวดนี้จะกินกระแสไฟฟ้าสูงสุดประมาณ 8.37 A ถ้าแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่ใช้มีค่า 220 V ก็จะทำให้กำลังไฟฟ้าต่อหน่วยความยาวของลวดมีค่าประมาณ 0.3622 watt/m
2. ท่อที่ใช้พันเตาเป็นท่อชนิดที่เรียกว่ามูนไลท์คอร์ (moonlite core) ซึ่งสร้างมาจาก Al_2O_3 40 % และ SiO 60 % ท่อนี้มีความยาวประมาณ 0.767 m ใช้รองรับขดลวดซึ่งพันอยู่รอบ ๆ
3. เข็มชักรัดขดลวดใช้รัดขดลวดให้อยู่กับที่ในขณะที่พัน ส่วนปูนทนความร้อนใช้ทาบนขดลวดซึ่งได้พันรอบท่อแล้ว เพื่อให้ขดลวดติดแน่นกับท่อเป็นการป้องกันไม่ให้ขดลวดแตะกันจนกระทั่งเกิดการลัดวงจรในขณะที่ใช้งาน
4. แท่นเตาทำจากอะลูมิเนียม เป็นอุปกรณ์ที่ใช้รองรับท่อและมีฉนวนความร้อนอยู่โดยรอบท่อซึ่งอยู่ภายในแท่นเตา

5. ฉนวนความร้อนทำจากซีรามิกไฟเบอร์ (ceramic fiber) ทำหน้าที่ป้องกันไม่ให้ความร้อนจากท่อระบายออกไปเป็นผลทำให้อุณหภูมิของ เตามัก้า เกือบคงที่

6. จุดที่ปิดปลายทั้งสองของท่อเป็นวัสดุที่ทำหน้าที่ป้องกันไม่ให้ความร้อนภายในท่อหรือเตาถูกระบายออกไปเป็นการรักษาอุณหภูมิภายในเตาให้ เกือบคงที่

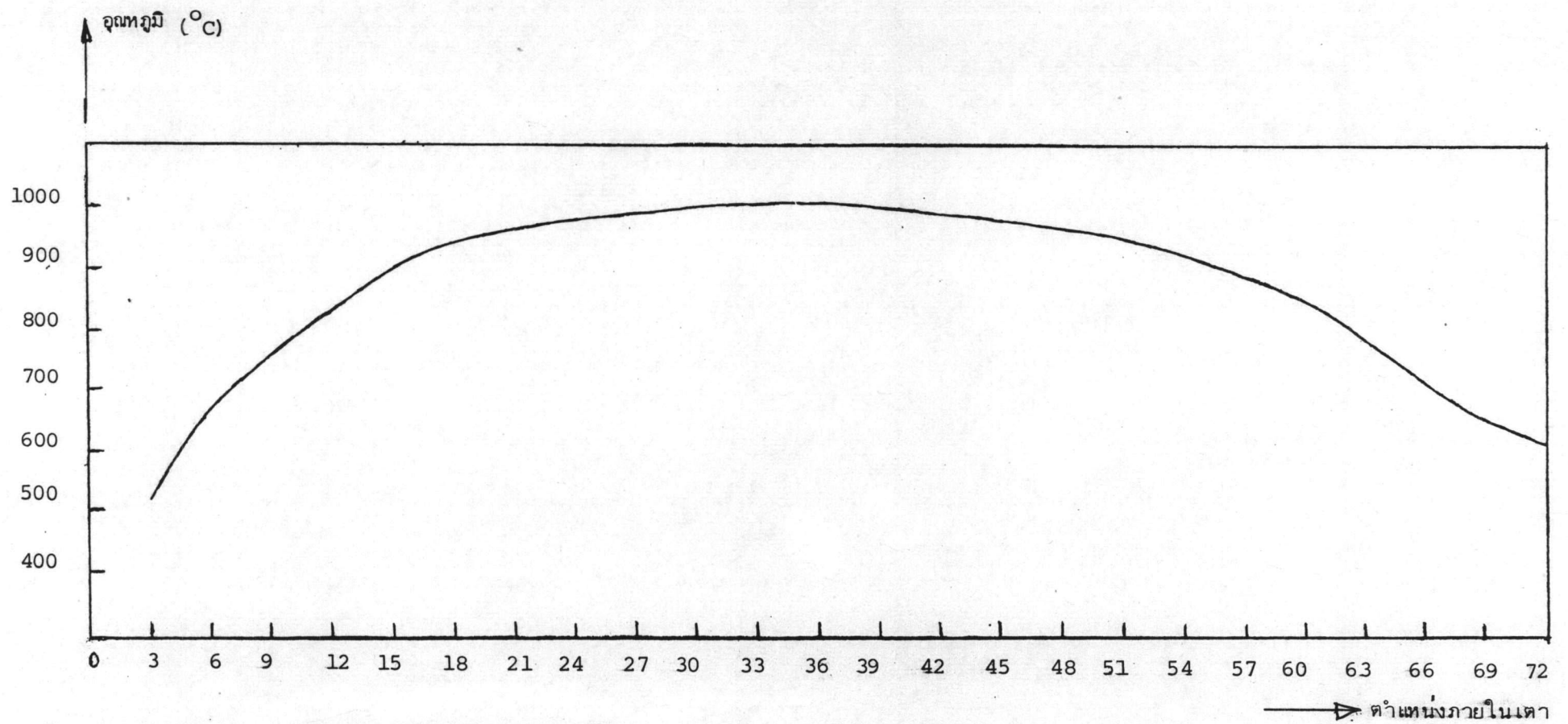


รูปที่ 1 แสดงการสร้างเตาหลอม

วิธีสร้าง

เมื่อได้อุปกรณ์ต่าง ๆ ครบแล้วก็ดำเนินการสร้างได้โดยยกท่อที่ใช้ทำเตาขึ้นแท่น แล้วดึงขดลวดมาแตะท่อตรงตำแหน่งที่ห่างจากปลายท่อด้านหนึ่ง 0.13 m พร้อมกันนั้นก็รัดขดลวดปลายนั้นด้วยเข็มขัดให้แน่นหรือใช้ลวดครีดยกได้โดยให้ขดลวดปลายนั้นโผล่ห่างจากท่อพอสมควรเพื่อทำเป็นขั้วไฟฟ้า ต่อไปก็เริ่มต้นพันโดยหมุนท่อจนกระทั่งลวดถูกพันรอบท่อและให้พันตามความยาวของท่อได้ยาว 0.508 m ในขณะที่พันให้ขดลวดแต่ละรอบห่างกันพอควรเพื่อให้ขดลวดที่ถูกพันมีจำนวนรอบประมาณ 98 รอบ เมื่อพันขดลวดเสร็จแล้วให้ใช้เข็มขัดรัดขดลวดปลายที่เหลือให้แน่นหรือใช้ลวดครีดยกแทนก็ได้ แล้วตัดขดลวดโดยให้ปลายขดลวดนี้โผล่ออกจากท่อพอสมควรเพื่อทำเป็นขั้วไฟฟ้า แล้วก็ดึงปลายขดลวดเดิมและใหม่ออกมา ในขณะที่ขดลวดยังไม่เกาะแน่นกับท่ออาจจะแตะกันได้ในขณะที่ใช้งาน ดังนั้นจึงใช้ปูนทนความร้อนทาทับขดลวดและท่อแล้วปล่อยให้แห้งหนึ่งคืนก็จะได้ท่อพร้อมขดลวดรอบท่อดังแสดงในรูปที่ 1 ต่อไปก็นำท่อนี้ไปติดตั้งในแท่นเตาและใส่ฉนวนความร้อนซึ่งทำด้วยซีรามิก

ไฟเบอร์ แล้วยกปิดฝาของแท่นเตาและนำจุกปิดปลายทั้งสองของท่อก็จะได้เตาหลอมโซลิดเตียวออกมา เนื่องจากต้องการทราบอุณหภูมิภายในเตาก่อนใช้งาน ดังนั้นจึงต้องทดสอบอุณหภูมิภายในเตาโดยการให้เครื่องควบคุมอุณหภูมิป้อนกระแสไฟฟ้าเข้าไปในขดลวดจนได้อุณหภูมิตามที่ต้องการ อุณหภูมินี้ถูกวัดโดยคู่ควบคุมความร้อน (thermocouple) เมื่อคู่ควบคุมความร้อนได้รับความร้อนจะมีแรงเคลื่อนไฟฟ้า เป็นมิลลิโวลต์เกิดขึ้นที่ปลายทั้งสอง แรงเคลื่อนไฟฟ้านี้จะถูกวัดด้วยดิจิตอลมัลติมิเตอร์ (digital multimeter) เป็นมิลลิโวลต์ นำแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่อ่านได้มาเปิดตารางก็จะได้อุณหภูมิตามตำแหน่งต่าง ๆ ของเตาตามต้องการ แต่ก่อนที่จะเปิดตารางต้องมาพิจารณาลักษณะการใช้งานของคู่ควบคุมความร้อนก่อน ถ้าปลายหนึ่งของคู่ควบคุมความร้อนอยู่ภายในท่อ ของเตาซึ่ง ร้อนกว่าและอีกปลายหนึ่งอยู่นอกเตาที่อุณหภูมิ 0°C ซึ่งเย็นกว่าแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่อ่านได้จะนำมาเปิดตารางอ่านอุณหภูมิได้ทันที แต่ในการทดลองนี้ปลายร้อนอยู่ภายในท่อของเตา ส่วนปลายที่เย็นอยู่ที่อุณหภูมิห้อง ดังนั้นก่อนที่จะใช้ตาราง เปลี่ยนแรงเคลื่อนไฟฟ้าเป็นอุณหภูมินั้นต้องเอาแรงเคลื่อนไฟฟ้าซึ่ง เกิดจากอุณหภูมิห้องนี้บวกเข้าไปก่อนจึงจะได้ อุณหภูมิตามตำแหน่งต่าง ๆ ของเตาตามต้องการ เมื่อได้ทดสอบอุณหภูมิภายในเตาเรียบร้อยแล้วปรากฏว่าได้กราฟดังแสดงในรูปที่ 2 เตาหลอมที่ผ่านการทดสอบอุณหภูมินี้จะใช้สำหรับเตรียมสาร (§ 5.1)



รูปที่ 2 แสดงอุณหภูมิที่ตำแหน่งต่าง ๆ ภายในเตาหลอม

ภาคผนวก ข.

การพิสูจน์สูตรที่ใช้สำหรับคำนวณค่าคงที่ของโครงผลึก (a, c)

ในหัวข้อนี้จะพิสูจน์สูตรของสมการ (5.1) และ (5.2) โดยเริ่มต้นจากสมการ (3.7)

$$\frac{\sin^2 \theta}{\lambda^2} = \frac{1}{4} \left[\frac{h^2 + k^2}{a^2} + \frac{\ell^2}{c^2} \right] \quad (3.7)$$

โดยการแทนค่า $\frac{1}{4a^2} = A$ และ $\frac{1}{4c^2} = C$ ลงในสมการ (3.7) ก็จะได้ผลดังสมการ (1)

$$\frac{\sin^2 \theta}{\lambda^2} = A(h^2 + k^2) + C\ell^2 \quad (1)$$

เนื่องจากต้องการหาค่าคงที่ของโครงผลึก (a, c) ที่ได้จากการพิจารณาขนาดต่าง ๆ ทั้งหมด ดังนั้นจึงต้องรวมพารามิเตอร์แต่ละตัวในสมการ (1) ของทุก ๆ ระบายโดยการใส่เครื่องหมายการบวก (Σ) ก็จะได้ผลดังสมการ (2)

$$\Sigma \frac{\sin^2 \theta}{\lambda^2} = A\Sigma(h^2 + k^2) + C\Sigma\ell^2 \quad (2)$$

เอาเทอม $(h^2 + k^2)$ คูณสมการ (1) แล้วรวมพารามิเตอร์แต่ละตัวในสมการที่ได้ของทุก ๆ ระบายโดยการใส่เครื่องหมายการบวกก็จะได้ผลดังสมการ (3)

$$\Sigma \left[(h^2 + k^2) \frac{\sin^2 \theta}{\lambda^2} \right] = A\Sigma(h^2 + k^2)^2 + C\Sigma \left[\ell^2 (h^2 + k^2) \right] \quad (3)$$

หลังจากนั้นก็แก้สมการ (2) และ (3) ก็จะได้ผลดังสมการ (4) และ (5)

$$A = \frac{1}{4a^2} = \frac{\Sigma \left[\frac{\sin^2 \theta}{\lambda^2} \right] \Sigma \left[\ell^2 (h^2 + k^2) \right] - \Sigma \left[(h^2 + k^2) \frac{\sin^2 \theta}{\lambda^2} \right] \Sigma \ell^2}{\Sigma (h^2 + k^2) \Sigma \left[\ell^2 (h^2 + k^2) \right] - \Sigma (h^2 + k^2)^2 \Sigma \ell^2} \quad (4)$$

$$C = \frac{1}{4c^2} = \frac{\Sigma \left[\frac{\sin^2 \theta}{\lambda^2} \right] \Sigma (h^2 + k^2)^2 - \Sigma \left[(h^2 + k^2) \frac{\sin^2 \theta}{\lambda^2} \right] \Sigma (h^2 + k^2)}{\Sigma \ell^2 \Sigma (h^2 + k^2)^2 - \Sigma \left[\ell^2 (h^2 + k^2) \right] \Sigma (h^2 + k^2)} \quad (5)$$

สมการ (4) และ (5) นี้ก็คือสูตรที่อยู่ในสมการ (5.1) และ (5.2) นั้นเอง

ภาคผนวก ค.

การหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ของโครงผลึกกับสัดส่วนอะตอมโดยวิธีกำลังสองน้อยที่สุด

การหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ของโครงผลึกกับสัดส่วนอะตอมโดยใช้วิธีกำลังสองน้อยที่สุดนี้เริ่มจากการนำค่าคงที่ของโครงผลึกที่สัดส่วนอะตอมต่าง ๆ ของสารทุกตัวมาลงจุดบนกราฟก็จะได้ลักษณะของจุดเรียงกันเป็นเส้นโค้งคล้ายรูปพาราโบลา ดังนั้นจึงใช้วิธีกำลังสองน้อยที่สุด มาปรับเส้นโค้งด้วยสมการกำลังสอง ซึ่งอยู่ในรูปดังสมการ (1)

$$a = AZ^2 + BZ + C = f(z) \quad (1)$$

เมื่อ A, B และ C เป็นค่าคงที่ การหาเส้นโค้งนี้ทำได้โดยการเริ่มต้นให้ a_i ซึ่งได้จากการวัดเพียงเบนจาก $f(z_i)$ ซึ่งเป็นค่าคงที่ที่ต้องคำนวณน้อยที่สุดดังสมการ (2)

$$v_i = f(z_i) - a_i \quad (2)$$

เมื่อ v_i เป็นส่วนเพียงเบนที่น้อยที่สุด แล้วเลือก A, B และ C จนกระทั่งผลรวมของกำลังสองของส่วนเพียงเบน (S) มีค่าน้อยที่สุดดังสมการ (3)

$$S = \sum_{i=1}^7 v_i^2 = \sum_{i=1}^7 \left[f(z_i) - a_i \right]^2 \quad (3)$$

และแทนสมการ (1) ลงใน (3) ก็จะได้สมการ (4)

$$S = \sum_{i=1}^7 \left[AZ_i^2 + BZ_i + C - a_i \right]^2 \quad (4)$$

ถ้าคิดว่า $f(z_i)$ เพียงเบนจาก a_i น้อยที่สุดแล้วก็จะทำให้อนุพันธ์ของผลรวมกำลังสองของส่วนเพียงเบนในสมการ (4) เมื่อเทียบกับค่าคงที่ A, B และ C มีค่าเป็นศูนย์

ตั้งสมการ (5)

$$\frac{\partial S}{\partial A} = 0, \quad \frac{\partial S}{\partial B} = 0, \quad \frac{\partial S}{\partial C} = 0 \quad (5)$$

แทนสมการ (4) ลงใน (5) ก็จะได้ค่าต่าง ๆ ดังแสดงในสมการ (6), (7) และ (8)

$$7A + \left(\sum_{i=1}^7 z_i \right) B + \left(\sum_{i=1}^7 z_i^2 \right) C = \sum_{i=1}^7 a_i \quad (6)$$

$$\left(\sum_{i=1}^7 z_i \right) A + \left(\sum_{i=1}^7 z_i^2 \right) B + \left(\sum_{i=1}^7 z_i^3 \right) C = \sum_{i=1}^7 z_i a_i \quad (7)$$

$$\left(\sum_{i=1}^7 z_i^2 \right) A + \left(\sum_{i=1}^7 z_i^3 \right) B + \left(\sum_{i=1}^7 z_i^4 \right) C = \sum_{i=1}^7 z_i^2 a_i \quad (8)$$

แล้วนำ a_i และ z_i จากตารางที่ 5-3 แทนลงในสมการ (6), (7) และ (8) ก็จะได้

$$7A + 3.9 B + 3.01 C = 42.914691 \quad (9)$$

$$3.9A + 3.01 B + 2.529 C = 23.619912 \quad (10)$$

$$3.01A + 2.529B + 2.2225 C = 18.159535 \quad (11)$$

แก้สมการ (9), (10) และ (11) จะได้ A, B และ C ออกมา แล้วแทน A, B และ C นี้ลงในสมการ (1) ก็จะได้ความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ของโครงผลึก (a) กับสัดส่วนอะตอม (z) ดังสมการ (12)

$$a = 0.0173667 z^2 - 0.3637339 z + 6.3258542 \quad (12)$$

หลังจากนั้นก็นำสมการ (12) มาเขียนกราฟก็จะได้รูปพาราโบลาดังแสดงในรูปที่ 6.1
ปรากฏว่าเส้นโค้งที่ได้ปรับเข้ากับจุด (z_i, a_i) ได้อย่างเหมาะสม สรุปแล้วความสัมพันธ์
ระหว่างค่าคงที่ของโครงผลึกกับสัดส่วนอะตอมอยู่ในรูปฟังก์ชัน กำลังสอง

ประวัติผู้เขียน

นายธงชัย พันธุ์เมธาฤทธิ เกิดเมื่อวันที่ 31 พฤษภาคม พ.ศ. 2497 ที่
จังหวัดนครศรีธรรมราช สำเร็จการศึกษาปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิตจากมหาวิทยาลัย
เกษตรศาสตร์ เมื่อ พ.ศ. 2522 จากนั้นได้เข้าศึกษาต่อระดับปริญญาโทในภาควิชาฟิสิกส์
บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในระหว่างที่ศึกษาได้รับทุนการศึกษาตามโครงการ
ผลิตและพัฒนาอาจารย์จากทบวงมหาวิทยาลัย

