บทที่ 6

สรุปและวิจารณ์ผลการทดลอง

จากการเตรียมโลหะผสมกึ่งตัวนำ $AgGaTe_{2(1-z)}Se_{2z}$ ที่สัดส่วนอะตอม (z) เป็น 0.0, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 0.9, และ 1.0 โดยวิธีเทคนิคการหลอมโดยตรงและแอนนีลได้ผลการทดลองพร้อมทั้งพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับการเตรียมดังแสดงในตารางที่ 5-2 ในตารางนี้เป็นการแสดงการหลอมธาตุต่าง ๆ ให้อยู่ในสภาพหลอมเหลวที่อุณหภูมิประมาณ $1000^{\circ}C$ เป็นระยะเวลาประมาณ 24 ชั่วโมง หลังจากนั้นก็ลดอุณหภูมิของเตาอย่างช้า ๆ โดยการปิดเตา ในขณะที่ลดอุณหภูมิอยู่นั้นพบว่าหลอดมักจะแตกที่อุณหภูมิค่อนข้างต่ำทำให้สารบางหลอดที่ได้มีอากาศเข้ารวมตัวจนมีสีน้ำตาลคล้ำ แต่อย่างไรก็ตามส่วนใหญ่แล้วผิวของสารหลายหลอดมีความเป็นมันซึ่งแสดงว่าไม่มีอากาศเข้ารวมตัว เนื่องจากต้องการให้อะตอมของสารที่ได้อยู่ในภาวะสมดุล ดังนั้นจึงต้องนำสารนี้ไปแอนนีลที่อุณหภูมิประมาณ $650^{\circ}C$ เป็นระยะเวลาประมาณ $1\frac{1}{2}$ ถึง $4\frac{1}{2}$ เดือน ผิวนอกของสารที่ได้มีหลุมเล็ก ๆ ขนาดต่าง ๆ กันและมีรอยแตกเป็นบางแห่ง เมื่อพิจารณาภายในสารแล้วพบว่ามีความเปราะมากน้อยต่างกัน สารที่มีสัดส่วนอะตอมเป็น 0.8 สามารถนำมาตัดเป็นแผ่นบางประมาณ 1 mm ได้ แต่ก็ขัดบางประมาณ 0.2 mm เท่านั้นเพราะภายในสารมีรูอยู่เป็นบางแห่ง ส่วนสารที่มีสัดส่วนอะตอมเป็น 1.0 มีความเปราะมากที่สุดซึ่งเป็นสมบัติทั่วไปของสารประกอบเซเลไนด์จนกระทั่งนำมาตัดเป็นแผ่นบาง ๆ ไม่ได้ แต่อย่างไรก็ตามสามารถขัดเป็นแผ่นบางประมาณ 0.3 mm ได้ สารที่มีสัดส่วนอะตอมเป็น 0.0, 0.2, 0.4, 0.6 และ 0.9 สามารถนำมาตัดและขัดเป็นแผ่นบาง ๆ ประมาณ 0.1 mm ได้ ถึงแม้ว่าสารที่มีธาตุเซเลเนียม (Se) ประกอบอยู่จะเปราะก็ตามแต่ก็สามารถนำสารทั้งหมดมาศึกษาคุณสมบัติทางฟิสิกส์ เช่นค่าคงที่ของโครงผลึกและช่องว่างแถบพลังงานได้

สารที่เตรียมได้เมื่อผ่านการศึกษาโดยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์แล้วพบว่าอะตอมต่าง ๆ ถูกเรียงตัวอยู่ในภาวะสมดุลและลักษณะของสารเป็นเฟสเดี่ยว เมื่อหาตำแหน่งของระนาบต่าง ๆ โดยอาศัยโครงสร้างผลึกแบบเททระโกนอลซาลโคไพไรท์พบว่า

ได้มุมของแบรกก์ออกมา โดยอาศัยความสัมพันธ์ระหว่างมุมของแบรกก์กับค่าคงที่ของโครงผลึก พบว่าค่าคงที่ของโครงผลึก a มีค่าอยู่ในช่วง 5.9883 ถึง 6.3260 $\mathring{A}$ และ c ในช่วง 10.8823 ถึง 11.9937 $\mathring{A}$ เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับค่าคงที่ของโครงผลึกของ $AgGaTe_2$ และ $AgGaSe_2$ จากการรายงานโดย Shay [2] ดังแสดงในตารางที่ 6-1 พบว่าได้ผลใกล้เคียงกัน การที่ผลการทดลองได้ค่าไม่ตรงกันก็เพราะในการ

สาร	ค่าคงที่ของโครงผลึก (a, c) อังสตรอม ($\mathring{A}$)			
	จากผลการทดลองครั้งนี้		Shay [2]	
$AgGaTe_2$	a = 6.3260	c = 11.9937	a = 6.301	c = 11.960
$AgGaSe_2$	a = 5.9884	c = 10.8823	a = 5.970	c = 10.870

ตารางที่ 6-1 แสดงการเปรียบเทียบค่าคงที่ของโครงผลึก

ทดลองใช้วิธีวัดและลักษณะของผลึกต่างกัน ถ้าอะตอม เรียงตัวอยู่ในตำแหน่งสมดุลมากขึ้น จะทำให้ค่าคงที่ของโครงผลึกถูกต้องมากขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งค่าคงที่ของโครงผลึกที่ได้จากการใช้ผลึกเอกพันธ์เป็นสารทดลองจะมีความถูกต้องมากกว่าเมื่อใช้ผลึกพหุพันธ์ ถ้าพิจารณาอัตราส่วน c/a แล้วพบว่ามีค่าไม่เท่ากับ 2 เป็นการยืนยันว่าอะตอมกลุ่ม VI มีการเลื่อนแบบเททระโกนอลเกิดขึ้น เมื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ของโครงผลึก (a, c) กับสัดส่วนอะตอม (z) โดยวิธีกำลังสองน้อยที่สุด (the method of least squares) ซึ่งได้แสดงในภาคผนวก ค. พบว่าได้ความสัมพันธ์นี้อยู่ในรูปฟังก์ชันกำลังสอง ดังสมการ

$$a = 0.0174z^2 - 0.3637z + 6.3259 \qquad (6.1)$$

และ

$$c = 0.1424z^2 - 1.2446z + 11.9968 \qquad (6.2)$$

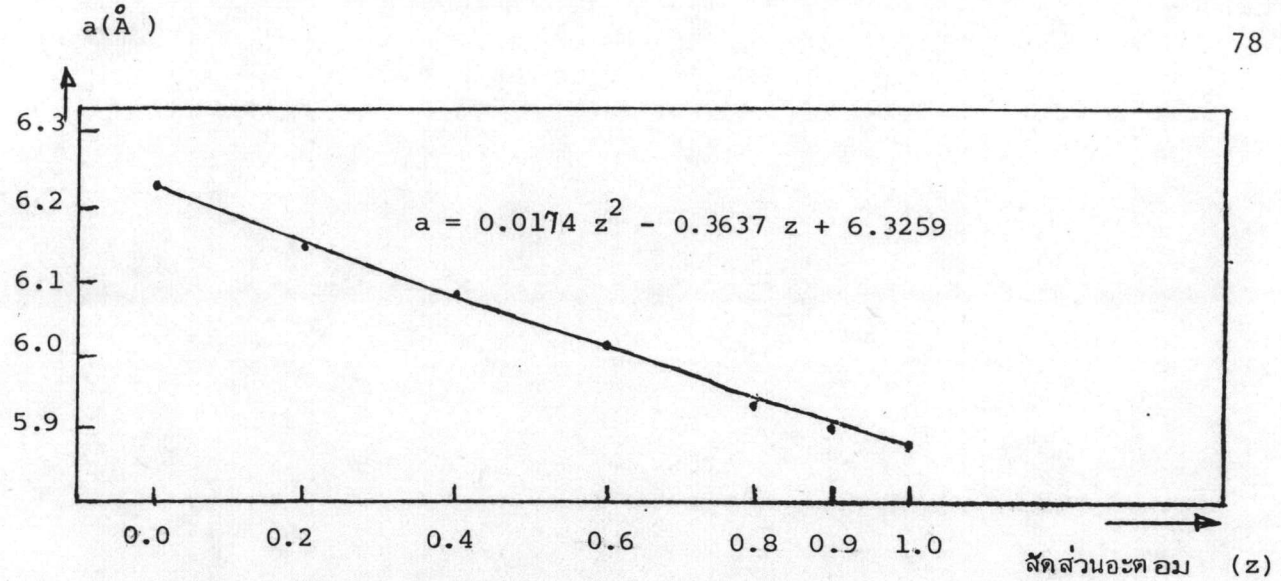
เมื่อนำความสัมพันธ์ทั้งสองมาเขียนกราฟก็จะได้รูปพาราโบลาดังแสดงในรูปที่ 6.1 และ 6.2 จากกราฟทั้งสองจะให้รายละเอียดเกี่ยวกับค่าคงที่ของโครงผลึกที่สัดส่วนอะตอมค่าต่าง ๆ ทำให้สามารถคัดเลือกสารที่มีค่าคงที่ของโครงผลึกที่เหมาะสมมาพัฒนาอุปกรณ์กึ่งตัวนำบางชนิดได้

เมื่อนำสารที่อยู่ในรูปเฟสเดี่ยวหรือรูปผลึกพหุพันธ์มาศึกษาการดูดกลืนแสงพบว่าสารที่มีสัดส่วนอะตอมต่างกันจะดูดกลืนแสงที่มีพลังงานค่าต่างกันซึ่งเป็นผลทำให้ช่องว่างของแถบพลังงานของสารมีค่าต่างกันดังแสดงในตารางที่ 5-4 จากตารางนี้ได้แสดงช่องว่างของแถบพลังงานที่ได้จากการวัด 2 ครั้งพร้อมด้วยค่าเฉลี่ยและยังแสดงความหนาต่าง ๆ ตลอดจนชนิดของการย้ายสถานะพลังงานของอิเลคตรอนซึ่งเป็นแบบตรงไว้ด้วย ช่องว่างของแถบพลังงานเฉลี่ยซึ่งได้จากการวัด 2 ครั้ง มีค่าอยู่ในช่วง 1.13 ถึง 1.75 eV เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับผลจากการรายงานของ Pamplin[7] และ Shay[3] ดังแสดงในตารางที่ 6-2 พบว่าสำหรับ $AgGaTe_2$ ได้ผลใกล้เคียงกันและ $AgGaSe_2$

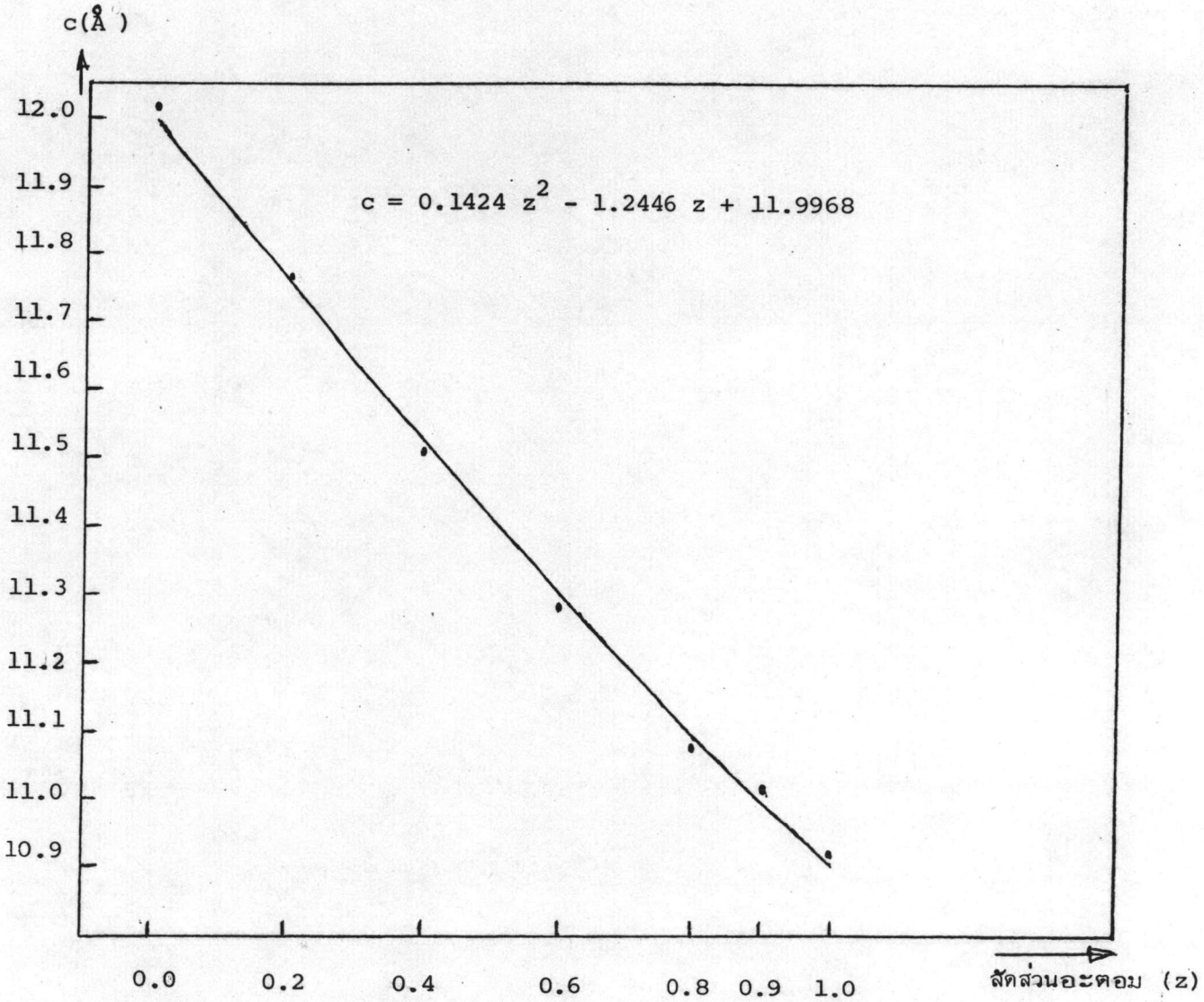
สาร	ช่องว่างของแถบพลังงาน (Eg), eV		ช่องว่างของแถบพลังงาน (Eg), eV	
	ผลจากการทดลอง	Pamplin[7]	ผลจากการทดลอง	Shay[3]
$AgGaTe_2$	1.13	1.10	-	-
$AgGaSe_2$	-	-	1.75	1.83

ตารางที่ 6-2 แสดงการเปรียบเทียบช่องว่างของแถบพลังงาน

ได้ผลต่างกันเล็กน้อย การที่ผลการทดลองไม่ตรงกันก็เพราะการใช้วิธีการวัดและปริมาณของพาหะอิสระในสารแต่ละชนิดต่างกันตลอดจนชนิดและปริมาณของความบกพร่องในผลึก (crystal



รูปที่ 6.1 แสดงค่าคงที่ของโครงผลึก (a) ที่สัดส่วนอะตอมค่าต่าง ๆ



รูปที่ 6.2 แสดงค่าคงที่ของโครงผลึก (c) ที่สัดส่วนอะตอมค่าต่าง ๆ

defects) ต่างกัน ในการวิจัยนี้วัดโดยวิธีการดูดกลืนแสงซึ่งจะได้ค่าถูกต้องน้อยกว่าวิธีอื่น เช่นวิธีอีเลคโตรรีแฟลคแตนซ์ (electroreflectance) หรือเทอร์โมรีแฟลคแตนซ์ (thermoreflectance) เป็นต้น จากการทดลองพบว่าเมื่อแสงตกกระทบสารที่มีพาหะอิสระมาก พาหะอิสระจะดูดกลืนแสงมากจนกระทั่งแสงที่ทะลุออกมามีน้อย สัญญาณรบกวนต่าง ๆ จะมีส่วนทำให้ความเข้มของแสงทะลุผ่านมีค่าไม่เรียบและอ่านค่ายากขึ้น เป็นผลทำให้ช่องว่างของแถบพลังงานที่วัดได้คลาดเคลื่อนไป ถ้าต้องการให้แสงทะลุมากขึ้นควรขัดสารให้มีความหนาน้อยลง ความหนาที่เหมาะสมจะขึ้นอยู่กับปริมาณพาหะอิสระที่เกิดขึ้นในเนื้อสารแต่ละชนิด ความหนาที่ใช้ทดลองนี้อยู่ในช่วง 0.1 ถึง 0.3 mm ซึ่งได้แสดงไว้ในตารางที่ 5-4 แล้ว ส่วนชนิดและปริมาณของความบกพร่องในผลึกทำให้เกิดสัมประสิทธิ์การดูดกลืนพื้นหลัง (α_o) ที่พลังงานแสงค่าต่ำ ๆ การลากเส้นตรงในรูปที่ 5.9 และ 5.10 เพื่อหา α_o อาจเกิดความคลาดเคลื่อนเป็นผลทำให้ช่องว่างของแถบพลังงานที่ได้มีค่าคลาดเคลื่อนไป เมื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างช่องว่างของแถบพลังงาน (Eg) กับสัดส่วนอะตอม (z) ที่ใช้โดยวิธีกำลังสองน้อยที่สุด พบว่าความสัมพันธ์นี้อยู่ในรูปฟังก์ชันกำลังสอง ดังสมการ

$$Eg = 0.3839z^2 + 0.1772z + 1.1490 \qquad (6.3)$$

เมื่อนำความสัมพันธ์นี้มาเขียนกราฟก็จะได้รูปพาราโบลาดังแสดงในรูปที่ 6.3 จากกราฟนี้จะให้รายละเอียดเกี่ยวกับช่องว่างของแถบพลังงานที่สัดส่วนอะตอมค่าต่าง ๆ ทำให้สามารถคัดเลือกสารที่มีช่องว่างของแถบพลังงานที่เหมาะสมมาพัฒนาอุปกรณ์กึ่งตัวนำบางชนิดได้

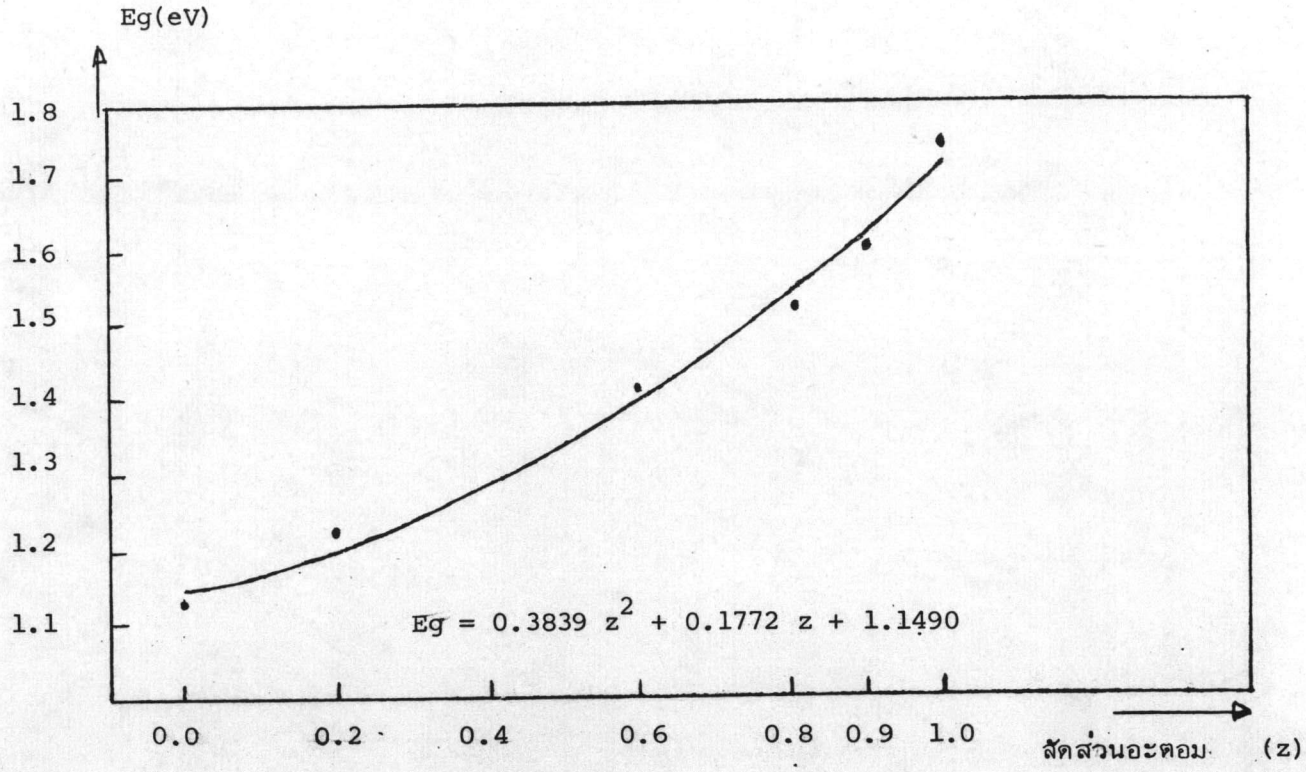
<u>ประโยชน์ในการประยุกต์ของผลการวิจัย</u>

การเตรียมสารกึ่งตัวนำเป็นขั้นตอนที่สำคัญที่สุด ถ้าปราศจากขั้นตอนนี้แล้วการศึกษาในขั้นต่อไปหรือการประยุกต์ก็ย่อมจะทำไม่ได้ วิธีการที่ใช้เตรียมโลหะผสมกึ่งตัวนำที่ใช้ในการวิจัยนี้ ตลอดจนปัญหาที่เกิดขึ้นในระหว่างการเตรียมจะใช้เป็นแนวทางนำไปปรับปรุงวิธีการเตรียมโลหะผสมกลุ่มนี้หรือสารกึ่งตัวนำกลุ่มใหม่ให้มีคุณภาพดียิ่งขึ้น เราได้กล่าวไว้ในบทนำว่าเซลล์แสงอาทิตย์เป็นอุปกรณ์กึ่งตัวนำชนิดหนึ่งที่ได้รับการศึกษามาแล้วพบว่าประสิทธิภาพ

ของเซลล์นี้จะมากเมื่อช่องว่างของแถบพลังงานอยู่ระหว่าง 1 ถึง 2 eV, โครงสร้างแถบพลังงานแบบตรงและค่าคงที่ของโครงผลึกจะต้องเหมาะสมเพื่อเป็นข้อมูลในการคัดเลือกสาร 2 ชนิดมาเชื่อม ต่อกันจนกลายเป็นอุปกรณ์กึ่งตัวนำได้ สำหรับในการวิจัยนี้ได้ผลซึ่งสามารถนำมาคัดเลือกช่องว่างของแถบพลังงานซึ่งมีค่าอยู่ในช่วง 1 ถึง 2 eV ที่สัดส่วนอะตอมค่าต่าง ๆ โดยอาศัยความสัมพันธ์ ดังแสดงในรูปที่ 6.3 และวิเคราะห์โดยอาศัยวิธีการในหัวข้อที่ 5.3.4 ได้พบว่าโลหะผสมที่ได้รับการวิจัยนี้มีโครงสร้างแถบพลังงานแบบตรงและสามารถเลือกสารที่มีค่าคงที่ของโครงผลึกที่เหมาะสมได้จากรูปที่ 6.2 จากเหตุผลดังกล่าวจะเห็นว่าสารที่ได้รับการวิจัยนี้มีคุณสมบัติ 3 ประการที่เหมาะสมกับการทำงานอย่างมีประสิทธิภาพของเซลล์นี้ ดังนั้นจึงคิดว่าสารกลุ่มนี้มีแนวโน้มสามารถนำไปสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ได้ นอกจากนี้ผลที่ได้จากการวิจัยยังสามารถนำไปใช้เป็นข้อมูลในการคัดเลือกสารที่มีค่าคงที่ของโครงผลึก และช่องว่างแถบพลังงานที่เหมาะสมมาสร้างอุปกรณ์กึ่งตัวนำชนิดอื่น ๆ ตลอดจนยังเป็นการศึกษาทางวิชาการเพื่อพัฒนาทางด้านฟิสิกส์สารกึ่งตัวนำอีกด้วยและยังเป็นแนวทางในการวิจัยขั้นสูงต่อไป

<u>ข้อเสนอแนะ</u>

ในการเตรียมสารให้อะตอมต่าง ๆ อยู่ในภาวะสมดุลและเป็นเฟสเดี่ยวนั้นเป็นเทคนิคที่ยุ่งยากมาก บางสารต้องใช้ระยะเวลาแอนนีลถึง $4\frac{1}{2}$ เดือน ถ้านำสารนี้ไปประยุกต์สร้างเป็นอุปกรณ์กึ่งตัวนำต้องใช้เวลาเตรียมนานเกินไปซึ่งเป็นผลทำให้ต้องลงทุนสูง ลักษณะของสารที่เตรียมได้มีความบกพร่อง เช่น ผิวนอกของสารมีหลุมเล็ก ๆ ขนาดต่าง ๆ และมีรอยแตกเป็นบางแห่ง ส่วนภายในสารมีรูขนาดต่าง ๆ กันเป็นบางแห่ง เป็นต้น ถ้าหากนำสารทั้งสองกรณีนี้ไปพัฒนาอุปกรณ์กึ่งตัวนำควรแก้ไขเงื่อนไขและวิธีการเตรียมที่เหมาะสมกว่านี้ เช่น ลดระยะเวลาแอนนีลให้น้อยลงและปรับปรุงลักษณะของสารที่ได้ให้ดีขึ้น เป็นต้น แต่อย่างไรก็ตามความบกพร่องนี้ก็ไม่ทำให้ค่าคงที่ของโครงผลึกและช่องว่างแถบพลังงานที่ได้รับการวิจัยนี้คลาดเคลื่อนไปมากนัก



รูปที่ 6.3 แสดงช่องว่างของแถบพลังงานที่สัดส่วนอะตอมค่าต่าง ๆ