บทที่ 6

สรุปและวิจารณ์ผลการทดลอง

ผลการทดลองวัดสภาพนำไฟฟ้าเชิงแสงของสารกึ่งตัวนำ $AgGaTe_2$ สามารถแบ่งออกเป็น 3 เรื่องใหญ่ ๆ คือเรื่องการทำรอยต่อแบบโอห์มิค เรื่องการมีอยู่ของเซนชิไดชิงเซนเตอร์ใน $AgGaTe_2$ และสุดท้ายคือเรื่องการแยกของแถบวาเลนซ์จากอันตรกริยาสปินกับออร์บิทและจากอันตรกริยาเนื่องจากสนามของผลึกซึ่งไม่เป็นลูกบาศก์ ซึ่งจะได้กล่าวถึงเป็นเรื่อง ๆ ไป

การทำรอยต่อแบบโอห์มิคสำหรับ $AgGaTe_2$ ในครั้งนี้ พบว่าสามารถทำรอยต่อแบบโอห์มิคได้ง่าย ๆ โดยใช้ In-Ga สัมผัสกับ $AgGaTe_2$ โดยตรงแล้วนำไปให้ความร้อนด้วยการฉายไฟสปอร์ตไลท์ให้รอยต่อมีอุณหภูมิประมาณ $100^{o}C$ เป็นเวลาประมาณ 15 ชั่วโมง ก็จะได้รอยต่อแบบโอห์มิคตามเหตุผลที่กล่าวมาแล้วในบทที่ 4 แต่รอยต่อที่ใช้ In-Ga สัมผัสโดยตรงนี้จะใช้ไม่ได้ที่อุณหภูมิต่ำ เพราะจะเกิดรอยแยกขึ้นที่รอยต่อทำให้เกิดสัญญาณกวนมากหรืออาจไม่มีสัญญาณออกมาเลย จึงใช้วิธีบัดกรีด้วยตะกั่วบัดกรีให้ส่วนผสมของโลหะทั้งหมดติดแน่นกับ $AgGaTe_2$ แล้วนำไปให้ความร้อนด้วยไฟสปอร์ตไลท์เหมือนเดิม ก็จะได้รอยต่อแบบโอห์มิคซึ่งใช้ได้ดีทั้งที่อุณหภูมิห้องและอุณหภูมิต่ำ

จากการวัดสภาพนำไฟฟ้าเชิงแสงของ $AgGaTe_2$ ในครั้งนี้ สามารถตรวจพบการย้ายสถานะของระดับพลังงาน 5 ระดับด้วยกัน โดยการย้ายสถานะจะทำให้เกิดพีค (peak) หรือบ่า (shoulder) ในกราฟของผลตอบสนองต่อแสง ระดับพลังงานทั้ง 5 ที่ตรวจพบมีระดับที่อุณหภูมิห้องที่ 1.11 eV 1.20 eV 1.30 eV 1.37 eV และ 2.18 eV ตามลำดับ ระดับ 1.11 eV นั้นเห็นเป็นพีคทั้งจากการวัดตามแบบฉบับ (รูป 5.9) และจากการวัดตามแบบกระแสคงที่ (รูป 5.10) ระดับ 1.20 eV จากการวัดตามแบบฉบับจะเห็นเป็นบ่าแต่จากการวัดแบบกระแสคงที่จะเห็นเป็นพีค ระดับ 1.30 eV และ 1.37 eV จากการวัดตามแบบฉบับจะเห็นเป็นพีครวมกันเป็นพีคเดียว แต่จากการวัดตามแบบกระแสคงที่จะเห็นแยกเป็นพีคและบ่าอย่างชัดเจน ส่วนระดับ 2.18 eV นั้นจะเห็นได้เฉพาะจากการวัดตามแบบฉบับ

ในบทที่ 3 ได้กล่าวมาแล้วว่าการมีเซนซิไตซิงเซนเตอร์ในสารกึ่งตัวนำนั้น จะทำให้เกิดปรากฏการณ์ 3 อย่างคือ ซุปเปอร์ลิเนียริตี ออพติคัลเควนชิงและเทอร์มัลเควนชิง ในการทดลองครั้งนี้จะเห็นปรากฏการณ์ซุปเปอร์ลิเนียริตีได้จากรูป 5.13 ในช่วงที่ความเข้มของแสงน้อย ๆ จากรูปเดียวกันนี้ในช่วงที่แสงมีความเข้มมาก ๆ จะเห็นปรากฏการณ์ออพติคัลเควนชิงเด่นขึ้นมา ส่วนปรากฏการณ์เทอร์มัลเควนชิงนั้นดูได้จากทั้งรูปที่ 5.9 และ 5.10 ซึ่งจะเห็นว่าผลตอบสนองต่อแสงที่อุณหภูมิห้องน้อยกว่าผลตอบสนองต่อแสงที่อุณหภูมิต่ำหลายสิบเท่า นั่นก็คือเมื่อเพิ่มอุณหภูมิจะเกิดปรากฏการณ์เทอร์มัลเควนชิงขึ้น จากหลักฐานดังกล่าวแสดงว่า $AgGaTe_2$ ที่ใช้ทดลองนี้มีเซนซิไตซิงเซนเตอร์โดยการจะมีเซนซิไตซิงเซนเตอร์ได้นั้นจะต้องมีเซนเตอร์อย่างน้อย 2 เซนเตอร์คือเซนเตอร์ I และเซนเตอร์ II ซึ่งแต่ละเซนเตอร์ต้องมีความหนาแน่นมากพอสมควร โดยเซนเตอร์ II จะอยู่ตื้น ๆ ส่วนเซนเตอร์ I จะอยู่ลึกเข้าไปในช่องว่างแถบพลังงาน เซนเตอร์ II จะต้องมีครอสเซคชันที่จะจับพาหะข้างน้อยมากกว่าครอสเซคชันที่จะจับพาหะข้างมาก หรือก็คือเซนเตอร์ II ควรจะมีระดับพลังงานในกราฟของผลตอบสนองต่อแสงใกล้เคียงกับระดับของช่องว่างแถบพลังงาน

ในสารกึ่งตัวนำกลุ่มชาลโคไพไรท์แถบวาเลนซ์จะแยกออกเป็น 3 ระดับเพราะอันตรกริยาสปินกับออร์บิทและเพราะอันตรกริยาเนื่องจากสนามของผลึกซึ่งไม่เป็นลูกบาศก์ จึงทำให้เกิดช่องว่างแถบพลังงาน 3 ระดับเช่นกันคือ E_A, E_B และ E_C ดังได้กล่าวมาแล้วในบทที่ 2 สำหรับ $AgGaTe_2$ นั้นมีผู้รายงานว่า [8] $E_A = 1.32$ eV $E_B = 1.43$ eV และ $E_C = 2.23$ eV ตามลำดับ โดยผลการวัดช่องว่างแถบพลังงานของ $AgGaTe_2$ ครั้งอื่น ๆ ที่หลายคนได้วัดไว้ [21] จะได้ E_A อยู่ในช่วง 1.1 – 1.326 eV ถ้ายึดถือข้อมูลนี้ประกอบกับข้อมูลของเซนซิไตซิงเซนเตอร์ตามที่กล่าวมาแล้ว และระลึกว่า $AgGaTe_2$ ที่ใช้ทดลองครั้งนี้เป็นสารกึ่งตัวนำชนิดพีซึ่งได้กล่าวมาแล้วในบทนำ ดังนั้นระดับพลังงาน 5 ระดับที่ตรวจพบจึงควรมีความหมายดังนี้

ระดับ 1.11 eV ควรเป็นระดับของเซนเตอร์ I ซึ่งอยู่เหนือแถบวาเลนซ์ประมาณ 1.11 eV ระดับ 1.20 eV ควรเป็นระดับของเซนเตอร์ II ซึ่งอยู่เหนือแถบวาเลนซ์ประมาณ 1.20 eV ทั้งเซนเตอร์ I และเซนเตอร์ II เกิดจากสิ่งเจือปน

หรือความไม่สมบูรณ์ของผลึก โดยเซนเตอร์ II จะมีกรอสเซคชันที่จะจับอิเลกตรอนอิสระมากกว่ากรอสเซคชันที่จะจับโฮลอิสระ ความหนาแน่นของเซนเตอร์ I และเซนเตอร์ II นั้น อาจประมาณอย่างคร่าว ๆ ได้จากรูป 5.10 โดยดูความสูงของพีคที่ 1.11 eV และ 1.20 eV เทียบกับความสูงของพีคที่สูงที่สุดคือพีคที่ 1.30 eV ซึ่งจะเห็นว่าความหนาแน่นของเซนเตอร์ I และเซนเตอร์ II นั้นมากพอที่จะเชื่อได้ว่าทำให้เกิดเซนซิไตซิงเซนเตอร์ขึ้นได้

ระดับ 1.30 eV ควรเป็นระดับของ E_A ระดับ 1.37 eV ควรเป็นระดับของ E_B และระดับ 2.18 eV ควรเป็นระดับของ E_C ที่อุณหภูมิต่ำจากการวัดตามแบบกระแสคงที่ (รูป 5.10) จะเห็นได้อย่างชัดเจนว่าระดับเหล่านี้จะเลื่อนไปทางขวาเล็กน้อยประมาณ 0.02 eV เมื่อเทียบกับที่อุณหภูมิห้อง ซึ่งหมายความว่าเมื่อลดอุณหภูมิลงช่องว่างแถบพลังงานจะเพิ่มขึ้นเล็กน้อยนั่นเอง

ความไม่สามารถทำซ้ำได้ในการวัดสภาพนำไฟฟ้าเชิงแสงดูได้จากกราฟในรูปที่ 5.9 เมื่อใช้ตัวกรองแสงต่างกันกราฟจะไม่ซ้ำเดิม หรือแม้แต่ใช้ตัวกรองแสงชนิดเดียวกันในรูป 5.11 ก เมื่อเวลาต่างกันผลตอบสนองต่อแสงจะไม่คงที่ ความไม่สามารถทำซ้ำได้นี้สามารถแก้ไขได้โดยการเควนช์ด้วยแสง ซึ่งจากรูป 5.11 ข เมื่อเควนช์แล้วผลตอบสนองต่อแสงจะคงที่ และจากรูป 5.14 จะเห็นว่าปรากฏการณ์ซุปเปอร์ลิเนียริตีและออพติคัลเควนชิงจะไม่เกิดขึ้นเมื่อเควนช์ด้วยแสง แต่การเควนช์ด้วยแสงนี้จะทำให้รูปร่างกราฟของผลตอบสนองต่อแสงผิดไปจากเดิม เห็นได้จากรูปที่ 5.12 เมื่อเควนช์ด้วยแสงความยาวคลื่นมากกว่า 1,050 nm พีคของเซนเตอร์ II ที่ 1.20 eV จะหายไป

ข้อสรุปผลการทดลองทั้งหมดข้างต้น ได้จากการวัดผลตอบสนองต่อแสง 2 แบบ คือการวัดตามแบบฉบับและการวัดตามแบบกระแสคงที่ ซึ่งทั้งสองแบบต่างก็ให้ผลยืนยันใกล้เคียงกัน สำหรับข้อดีข้อเสียของการวัดแต่ละแบบมีดังนี้

การวัดสภาพนำไฟฟ้าเชิงแสงตามแบบฉบับ

ข้อดี 1. วัดได้ง่ายเพราะไม่ต้องปรับแวริแอค

2. วัดได้ในช่วงพลังงานแสงกว้าง โดยเมื่อวัดที่อุณหภูมิต่ำจะวัดได้ในช่วงพลังงานแสงกว้างขึ้นอีก

ข้อเสีย 1. แยกพีคหรือบ่าให้เห็นระดับพลังงานต่าง ๆ ได้ไม่ชัดเจน

2. ผลตอบสนองต่อแสงอาจเชื่อถือไม่ได้

การวัดสภาพนำไฟฟ้าเชิงแสงตามแบบกระแสคงที่

ข้อดี 1. แยกพีคหรือบ่าให้เห็นระดับพลังงานต่าง ๆ ได้อย่างชัดเจน

2. ผลตอบสนองต่อแสงเชื่อถือได้

ข้อเสีย 1. วัดได้ยากเพราะต้องปรับแวริแอคให้กระแสคงที่

2. วัดได้ในช่วงพลังงานแสงที่ไม่กว้างเพราะสัญญาณจะอ่อนจนเชื่อถือไม่ได้เมื่อลดแวริแอคลง

การวัดคุณสมบัติของสารกึ่งตัวนำนั้น การวัดแต่ละอย่างก็มีข้อดีข้อเสียของตัวเอง ตัวอย่างเช่นการวัดสภาพนำไฟฟ้าเชิงแสงมีกระบวนการหลายกระบวนการเข้ามาเกี่ยวข้องดังได้กล่าวมาแล้วในบทที่ 3 ดังนั้นข้อมูลที่ได้จึงไม่ตรงไปตรงมา แต่การวัดสภาพนำไฟฟ้าเชิงแสงสามารถแยกระดับพลังงานที่ใกล้เคียงกันให้เห็นได้ (โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อวัดแบบกระแสคงที่) ซึ่งถ้าเป็นการวัดการดูดกลืนแสงแล้วถึงแม้ข้อมูลที่ได้ตรงไปตรงมาแต่ไม่สามารถแยกระดับพลังงานที่ใกล้เคียงกันให้เห็นได้โดยเด่นชัด ดังตัวอย่างในรูป 2.16 ยิ่งถ้าเป็นระดับพลังงานที่ใกล้เคียงกับช่องว่างแถบพลังงานแล้วการวัดการดูดกลืนแสงยิ่งแยกไม่ออกว่าอันไหนเป็นระดับในช่องว่างแถบพลังงาน อันไหนเป็นระดับของตัวช่องว่างแถบพลังงานเอง (22) และการที่มีผู้วัดได้ช่องว่างแถบพลังงานของ $AgGaTe_2$ อยู่ในช่วง 1.1-1.326 eV นั้น อาจเป็นเพราะว่าระดับพลังงานที่วัดได้นั้นไม่ใช่ระดับพลังงานของช่องว่างแถบพลังงาน แต่เป็นระดับพลังงานของสิ่งเจือปนหรือความไม่สมบูรณ์ของผลึกที่มีความหนาแน่นจำนวนมากและมีระดับพลังงานใกล้เคียงกับช่องว่างแถบพลังงาน จะเห็นได้จากตัวอย่างในรูป 2.15 ซึ่งการวัดการดูดกลืนแสงได้ค่าช่องว่างแถบพลังงานของ $AgGaTe_2$ เพียง 1.21 eV เท่านั้น

ประโยชน์ที่ได้รับจากผลการวิจัย

การวิจัยครั้งนี้ทำให้รู้แนวทางและวิธีในการทำรอยต่อแบบโอห์มิค โดยเฉพาะอย่างยิ่งสำหรับสารกึ่งตัวนำชนิดพีนั้นสามารถทำรอยต่อแบบโอห์มิคที่ใช้งานได้ดีทั้งที่อุณหภูมิห้องและที่อุณหภูมิต่ำ จึงเป็นพื้นฐานของการวัดอื่น ๆ ที่ต้องการรอยต่อแบบโอห์มิค และในการวิจัยครั้งนี้ทำให้รู้ว่า $AgGaTe_2$ ที่เตรียมขึ้นมาได้ยังมีสิ่งเจือปนหรือความไม่สมบูรณ์ของผลึกอยู่ จึงเป็นประโยชน์ในการเตรียม $AgGaTe_2$ ครั้งต่อไป และการศึกษาสภาพนำไฟฟ้าเชิงแสงนั้นยังทำให้สามารถศึกษาครอสเซคชันของการย้ายสถานะเนื่องจากแสงความยาวคลื่นต่าง ๆ ซึ่งเป็นปริมาณทางฟิสิกส์ที่เกี่ยวข้องโดยตรงกับสัมประสิทธิ์ของการดูดกลืนแสง

จากผลการวิจัยครั้งนี้ สิ่งที่นับว่าเป็นประโยชน์โดยตรงต่อวิชาการทางด้านนี้ก็คือเป็นการยืนยันผลการศึกษาการแยกของแถบวาเลนซ์ของสารกึ่งตัวนำกลุ่มชาลโคไพไรท์ ซึ่งได้มีการศึกษาโดยวิธีอื่น ๆ มาแล้ว และผลการวิจัยครั้งนี้ยังให้ความกระจ่างต่อผลการศึกษาช่องว่างแถบพลังงานโดยวิธีวัดการดูดกลืนแสงซึ่งให้ค่าของช่องว่างแถบพลังงานต่ำกว่าความเป็นจริงอันเป็นผลสืบเนื่องมาจากระดับพลังงานในช่องว่างแถบพลังงานซึ่งระดับพลังงานนี้เกิดจากสิ่งเจือปนหรือความไม่สมบูรณ์ของผลึก

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ข้อเสนอแนะ

วิธีวัดสภาพนำไฟฟ้าเชิงแสงสามารถใช้ได้ดีในการศึกษาโครงสร้างแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำที่มีสิ่งเจือปนหรือความไม่สมบูรณ์ของผลึกที่เรียกว่าเซนซิไตซิงเซนเตอร์ ดังนั้นในสารกึ่งตัวนำธรรมดาที่ไม่มีเซนซิไตซิงเซนเตอร์ ก็อาจใช้วิธีสภาพนำไฟฟ้าเชิงแสงได้ โดยการเติมสิ่งเจือปนลงไปในสารกึ่งตัวนำนั้น ให้เกิดเซนซิไตซิงเซนเตอร์ขึ้นมา ซึ่งทำให้สามารถใช้วิธีการดังกล่าวนี้ศึกษาโครงสร้างแถบพลังงานรวมทั้งระดับพลังงานในช่องว่างแถบพลังงานของสารนั้นได้

อนึ่ง จากผลการศึกษานี้สารกึ่งตัวนำ $AgGaTe_2$ มี E_g = 1.30 eV ซึ่งมีขนาดที่พอเหมาะที่สามารถนำไปใช้ประดิษฐ์เป็นเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีประสิทธิภาพสูงได้ และ $AgGaTe_2$ นี้เป็นสารซึ่งมีความไม่สมบูรณ์ที่เกิดขึ้นโดยตัวของสารเอง (native defect) ซึ่งทำให้เป็นสารที่มีผลตอบสนองต่อแสงสูงมาก จึงน่าจะมีการวิจัย $AgGaTe_2$ ในเชิงประยุกต์ทางด้านการประดิษฐ์เป็นเซลล์แสงอาทิตย์ต่อไป

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย