บทที่ 5
สรุป วิจารณ์ผลและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปและวิจารณ์ผลการคำนวณ

ในการหาค่าความหนาแน่นประจุพาหะของสารกึ่งตัวนำใน 2, 1 และ 0 มิติ เริ่มจากวิธีการคำนวณที่เหมือนกับ 3 มิติ พบว่าความหนาแน่นประจุพาหะในตัวของสารกึ่งตัวนำใน 2, 1 และ 0 มิติ เกิดจากผลรวมของความหนาแน่นของอิเล็กตรอนที่มีพลังงานสูงกว่าระดับพลังงานนำและความหนาแน่นของโฮลที่มีพลังงานต่ำกว่าระดับพลังงานเวเลนต์ โดยความหนาแน่นของประจุพาหะยกตัวอย่างเช่น ความหนาแน่นของอิเล็กตรอน $n_D \ \alpha \ T^{D/2}\sum_{n=0}^{\infty}\exp[(\mu - E_{c_n})/k_BT]$ เป็นผลรวมของความหนาแน่นอิเล็กตรอนในแต่ละระดับพลังงาน ($n_D^{(n)}$) เทียบกับระดับพลังงานศักย์อ้างอิง μ นั่นคือ ที่ระดับพลังงานสูงๆ ค่าของ $n_D^{(n)}$ จะลดลงเรื่อยๆ เนื่องจากเมื่ออิเล็กตรอนได้รับพลังงานจากสนามไฟฟ้าหรือแหล่งที่ให้พลังงานภายนอก ก็จะถูกกระตุ้นข้ามช่องว่างพลังงาน E_g ขึ้นไปอยู่ในระดับพลังงาน E_{c_n} โดยธรรมชาติที่ระดับพลังงานต่ำกว่าก็จะต้องมีจำนวนอนุภาคในสถานะมากกว่าที่พลังงานสูงๆ ทำให้ $n_D^{(n)}$ ลดลงที่ระดับพลังงานสูงๆ ทำนองเดียวกันสถานะที่เกิดโฮลก็สัมพันธ์กับความสามารถที่จะดึงอิเล็กตรอนวงในออกมาเป็นอิเล็กตรอนอิสระย่อมมีโอกาสน้อยกว่าที่จะดึงอิเล็กตรอนวงนอก ทำให้ที่ระดับพลังงานใกล้ๆ E_c และ E_v มีค่า $n_D^{(n)}$ และ $p_D^{(n)}$ สูง

สำหรับกรณีพิเศษ ให้ผลของ $n_D^{(n)}$ และ $p_D^{(n)}$ มีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับ E_c และ E_v หรือประมาณว่าอิเล็กตรอนอยู่เฉพาะระดับพลังงาน E_c และมีโฮลอยู่เฉพาะระดับพลังงาน E_v จะทำให้รูปแบบของสมการง่ายขึ้น ทำให้ได้ว่าความหนาแน่นประจุพาหะในตัวของสารกึ่งตัวนำมีค่าเป็น $n_{i,D} \ \alpha \ T^{D/2}\exp(-E_g/2k_BT)$ ซึ่งขึ้นกับมิติ อย่างไรก็ตามเนื่องจากเทอมของ $T^{D/2}$ มีผลต่อค่าของ $n_{i,D}$ น้อยกว่าเทอม $\exp(-E_g/2k_BT)$ มาก ทำให้ในทุกมิติสารมีแนวโน้มของ n_i ขึ้นกับอุณหภูมิในรูปแบบของแนวโน้มที่ไม่แตกต่างกันมากนัก ถ้าทุกมิติมีแนวโน้มของ n_i เหมือนกันก็แสดงว่ามิติแทบจะไม่มีผลอะไรเลย และจากกรณีพิเศษนี้ ทำให้ทราบว่าค่าของ μ และ E_g ขึ้นกับมิติด้วย คือ $\mu = E_c - \frac{1}{2}E_g + \frac{D}{4}k_BT\ln\frac{m_h}{m_e}$ สำหรับสารกึ่งตัวนำที่ถูกเจือก็มีวิธีการทำนองเดียวกับ 3 มิติ คือ เมื่อเติมสารเจือแล้วจะทำให้ค่า μ ของสารกึ่งตัวนำเปลี่ยนแปลงไป แต่จากความรู้เกี่ยวกับความหนาแน่นของสถานะทำให้ทราบว่ามิติมีผลกระทบต่อสถานะของประจุพาหะอย่างมาก ทำให้พบว่าจะต้องมีอิเล็กตรอนและโฮลครอบครองระดับพลังงานย่อย E_{c_n} และ E_{v_n} ระดับพลังงานย่อยเหล่านี้เองที่ทำให้ $n_{i,D}$ แตกต่างจาก 3 มิติ

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright © by Chiang Mai University
All rights reserved

จากการคำนวณความนำไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำโดยวิธีแบบจำลองของอิเล็กตรอนอิสระ พบว่ามีความนำไฟฟ้าของประจาหะเช่น อิเล็กตรอน เป็น $G_{D,e} \ \alpha \ G_{0,e}(T)\mathrm{T}_{KG,e}\sum_{n=1}^{\infty}(1+\chi_D \exp[-\Delta_n / k_B T])$ ซึ่งมีรูปแบบเป็น Partition Function เหมือนกับ n_D เนื่องจากแบบจำลองนี้สมมุติว่าค่าสัมประสิทธิ์การทะลุผ่าน $T_{KG,e}$ มีค่าเท่ากันในทุกระดับพลังงาน E_{c_n} ทำให้ค่าความหนาแน่นประจุพาหะในตัวแสดงรูปแบบของค่าความนำไฟฟ้า และค่าสัมประสิทธิ์การทะลุผ่านแสดงค่าของความนำไฟฟ้าว่ามีมากน้อยเพียงใด ค่าสัมประสิทธิ์การทะลุผ่าน T_{KG} แสดงความสามารถในการนำไฟฟ้า ถ้า T_{KG} มีค่าเท่ากับ 1 จะเป็นกรณีในอุดมคติ นั่นคือ สารกึ่งตัวนำที่อุณหภูมิ T มีค่าความนำไฟฟ้ามากที่สุด และเมื่อค่า T_{KG} ลดลงก็จะมีความนำไฟฟ้าลดลงด้วย รูปที่ 4.3 แสดงความแตกต่างระหว่าง 3 มิติ ซึ่งค่าความนำไฟฟ้ามีค่าต่อเนื่อง กับใน 2, 1 และ 0 มิติ อย่างไรก็ตามแบบจำลองนี้ยังบ่งบอกความแตกต่างของ 2, 1 และ 0 มิติได้ไม่ดีนัก ตัวแปรที่บ่งบอกความแตกต่างคือ จำนวนสถานะที่มีพลังงานซ้ำกัน n_c, n_v และ T_{KG} ทำให้รูปร่างของกราฟในรูปที่ 4.3 เปลี่ยนไปจากเดิม ในทำนองเดียวกันค่าความนำไฟฟ้าของประจุพาหะโฮลก็มีรูปแบบคล้ายกับรูปที่ 4.3 ซึ่งอยู่ในรูปแบบที่สมมาตรกัน

เมื่อพิจารณาผลกระทบจาก Nonequilibrium Distribution Function และ Mass Tensor ที่มีต่อค่าความนำไฟฟ้า ทำให้สภาพนำไฟฟ้าของอิเล็กตรอนในระดับพลังงานที่ n อยู่ในรูปแบบของ Conductivity Tensor ดังสมการ 4.15 โดยที่มี Mass Tensor แสดงถึงอันตรกิริยาระหว่างระดับพลังงาน n และ n' ดังสมการ 4.16 โดยกระทำกับโอเปอเรเตอร์ของความเร็ว $-i\nabla$ สำหรับกรณีประจุพาหะอิสระก็จะไม่มีอันตรกิริยาระหว่าง n และ n' ทำให้ $M^{-1}(\vec{k})$ เหลือเพียง $(1/m)\delta_{\mu\nu}$ และสมการที่ 4.14 ก็จะคล้ายกับแบบจำลองของอิเล็กตรอนอิสระ จะเห็นว่าผลของอันตรกิริยาระหว่างระดับพลังงานที่ n และ n' ทำให้ $\vec{\sigma} = \sum_n \vec{\sigma}^{(n)}$ เป็นเมตริกซ์ที่ทำการแปลงระหว่างความหนาแน่นกระแส $\vec{j}$ และสนามไฟฟ้าภายนอก $\vec{E}$ ซึ่งมีสัมประสิทธิ์ของเมเตริกซ์เป็น $j_\mu = \sigma_{\mu\nu}E_\nu$

พิจารณา $\tau_n(\varepsilon(\vec{k}))$ ซึ่งขึ้นกับระดับพลังงาน บ่งบอกถึงระยะเวลาที่ประจุพาหะที่อยู่ในระดับพลังงาน n ใช้ในการเคลื่อนที่ระหว่างการชนหรือมีอันตรกิริยากับพลังงานศักย์อื่นๆในแต่ละครั้ง $\tau_n(\varepsilon(\vec{k}))$ แบ่งเป็น 2 ส่วน คือ Elastic Relaxation Time ที่เกิดจากอันตรกิริยาระหว่างอิเล็กตรอนกับอะตอมในผลึกและ Inelastic Relaxation Time ที่เกิดจากอิเล็กตรอนกับช่องว่างที่อะตอมหายไปหรืออะตอมอื่นที่เจือปนอยู่ในผลึก (Impurity-Electron Interaction) และอันตรกิริยาระหว่างอิเล็กตรอนกับอิเล็กตรอน (Electron-Electron Interaction) โดยมีรูปแบบดังสมการ 4.18 และสมการ 4.20 ตามลำดับ ค่าของ Inelastic Relaxation Time แตกต่างกันในแต่ละมิติสมมุติว่าบ่อพลังงานศักย์มีฟังก์ชันเป็น $U = -\alpha\delta(\vec{k}-\vec{k}')$ พบว่า $\frac{1}{\tau_{in}(\vec{k})} \ \alpha \ \alpha^2 N_{im}^D$ นั่นคือ เมื่อค่ามิติ D ยิ่ง

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright © by Chiang Mai University
All rights reserved

มากจะทำให้ค่าของ $\tau_n(\varepsilon(\vec{k}))$ มีค่าลดลงหรือค่าสัมประสิทธิ์การทะลุผ่านลดลงเนื่องจากอิเล็กตรอนมีอันตรกิริยากับบ่อพลังงานศักย์ที่เกิดจากแหล่งกำเนิดต่างๆในผลึกนั่นเอง และค่าสัมประสิทธิ์การทะลุผ่านนี้จะแบ่งแยกความแตกต่างของค่าสภาพนำไฟฟ้าในแต่ละมิติได้ชัดเจนยิ่งขึ้น

5.2 ข้อเสนอแนะและแนวทางการทำวิจัยต่อไป

สำหรับแนวทางการทำงานวิจัยที่ผ่านมายึดแบบมาจากการคำนวณใน 3 มิติที่มีอยู่และใช้แบบจำลองหลายๆอย่าง โดยมีพื้นฐานมาจากแบบจำลองของอิเล็กตรอนอิสระในโลหะที่มีอยู่แพร่หลายในปัจจุบัน จุดประสงค์หลักในการทำวิจัยครั้งนี้ คือ ต้องการทราบว่าประจุพาหะในสารกึ่งตัวนำมีสมบัติเหมือนและแตกต่างจากอิเล็กตรอนอิสระในโลหะอย่างไรบ้าง แต่เนื่องจากงานวิจัยนี้ใช้แบบจำลองของโลหะเกือบทั้งหมดทำให้ผลที่ออกมาว่าไม่มีอะไรที่แตกต่างกันมากนักระหว่างโลหะกับสารกึ่งตัวนำ ดังนั้นวิธีการที่จะทำให้ได้ผลดีมากกว่านี้ คือ เริ่มจากศึกษาและทำความเข้าใจแบบจำลองต่างๆที่อธิบายลักษณะต่างๆ เช่น ระดับพลังงานของอิเล็กตรอนและโฮล, ช่องว่างพลังงานและพื้นผิวเฟอร์มิในสารกึ่งตัวนำ และทำการทดลองวัดค่าความนำไฟฟ้าประกอบเพื่อหาเงื่อนไขที่ไม่มีในทฤษฎี เนื่องจากการคิดคำนวณอย่างเดียวก็ไม่ได้สร้างเงื่อนไขได้หมดทุกอย่าง แต่ปัญหาหลักของการทดลอง คือ ความละเอียดของเครื่องมือต้องสูงมากๆเพื่อให้ได้ผลที่เชื่อถือได้และต้องแยกแยะให้ได้ว่าผลที่ทดลองได้ออกมาแตกต่างนิดหน่อยหรือไม่แตกต่างกันเลย ซึ่งสิ่งนี้คือจุดสำคัญในการทดลองในเรื่องที่ละเอียดอ่อน และความนำไฟฟ้า เป็นสมบัติทางไฟฟ้าพื้นฐานเท่านั้น ยังมีสมบัติต่างๆที่จะศึกษาผลกระทบที่เกิดจากมิติว่าทำให้สมบัติแตกต่างกันอย่างไร สมบัติที่น่าสนใจ ได้แก่ สภาพนำความร้อน ค่าความจุความร้อน ผลที่มีต่อไดอิเล็กตริก (Dielectric) ผลกระทบต่อสมบัติทางแม่เหล็ก ผลกระทบต่อพื้นผิว เป็นต้น เนื่องจากปัจจุบันสารกึ่งตัวนำมีการนำมาใช้ประโยชน์แพร่หลายโดยมีคุณสมบัติพิเศษ คือ การนำไฟฟ้าตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิมากกว่าโลหะ และเป้าหมายหลักของนักวิจัยที่มุ่งจะสร้างทฤษฎีขึ้นมาก็เพื่อคาดเดาในสิ่งที่ยังทดลองไม่ได้มองไม่เห็น ไปไม่ถึง ให้อยู่ในรูปแบบที่เป็นภาษาคณิตศาสตร์เพราะกระชับและแน่นอนแต่ก็เข้าใจยากในบางครั้งเนื่องจากยังไม่เข้าใจที่มาเริ่มต้นของคณิตศาสตร์ในแขนงนั้นๆ อย่างไรก็ตามเมื่อจะเข้าใกล้ความยุ่งเหยิงของธรรมชาติมากขึ้นเท่าใดก็จะต้องใช้คณิตศาสตร์ที่ยุ่งยากขึ้นด้วย

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright © by Chiang Mai University
All rights reserved