สารบาญ

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ	ค
บทคัดย่อภาษาไทย	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	จ
สารบาญตาราง	ซ
สารบาญภาพ	ญ
บทที่ 1 บทนำ	
1.1 ความสำคัญและที่มาของงานวิจัย	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย	8
บทที่ 2 ทฤษฎี	
2.1 ความหนาแน่นของสถานะและการแจกแจงของเฟอร์มิ-ดิแรก	9
2.1.1 อิเล็กตรอนอิสระในบ่อพลังงานศักย์ 1 มิติและที่มาของระดับพลังงานเฟอร์มิ	9
2.1.2 อิเล็กตรอนอิสระในบ่อพลังงานศักย์ 3 มิติและความหนาแน่นของสถานะใน 3 มิติ	11
2.1.3 ที่มาของความหนาแน่นของสถานะใน 2, 1 และ 0 มิติ	14
2.1.4 ที่มาของการแจกแจงของเฟอร์มิ-ดิแรก	18
2.2 ฟังก์ชันคลื่นของอิเล็กตรอนในพลังงานศักย์แบบคาบและที่มาของแถบพลังงาน	22
2.2.1 รูปแบบและเงื่อนไขของพลังงานศักย์ในผลึก	22
2.2.2 สมการของชโรดิงเจอร์ในปริภูมิของโมเมนตัม (k-space)	24
2.2.3 การประมาณบ่อพลังงานศักย์และที่มาของแถบพลังงาน	26
2.3 ลักษณะทั่วไปของสารกึ่งตัวนำ	31
บทที่ 3 วิธีการคำนวณ	
3.1 วิธีการคำนวณความหนาแน่นประจุพาหะในตัวของสารกึ่งตัวนำ	34
3.1.1 วิธีการคำนวณความหนาแน่นประจุพาหะในตัวของสารกึ่งตัวนำใน 2 มิติ	36

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright © by Chiang Mai University
All rights reserved

หน้า

3.1.2 วิธีการคำนวณความหนาแน่นประจุพาหะในตัวของ
สารกึ่งตัวนำใน 1 มิติ 37
3.1.3 วิธีการคำนวณความหนาแน่นประจุพาหะในตัวของ
สารกึ่งตัวนำใน 0 มิติ 37
3.2 วิธีการคำนวณความนำไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำ 38
3.2.1 การคำนวณความนำไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำตาม
แบบจำลองของอิเล็กตรอนอิสระ 38
3.2.2 การคำนวณความนำไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำ
นอกเหนือจากแบบจำลองของอิเล็กตรอนอิสระ 41
บทที่ 4 ผลการคำนวณและการวิเคราะห์ผล
4.1 ผลการคำนวณความหนาแน่นประจุพาหะในตัวของสารกึ่งตัวนำ 49
4.2 ผลการคำนวณความนำไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำ 56
4.2.1 ผลการคำนวณความนำไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำ
ตามแบบจำลองของอิเล็กตรอนอิสระ 56
4.2.2 ผลกระทบจาก Nonequilibrium Distribution Function
และ Relaxation Time ที่มีต่อค่าความนำไฟฟ้า 65
บทที่ 5 สรุป วิจารณ์ผลและ ข้อเสนอแนะ
5.1 สรุป และวิจารณ์ผลการคำนวณ 68
5.2 ข้อเสนอแนะ และแนวทางการทำวิจัยต่อไป 70
บรรณานุกรม 71
ภาคผนวก
ภาคผนวก ก
ผลงานทางวิชาการ 74
ประวัติผู้เขียน 85

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright © by Chiang Mai University
All rights reserved

สารบาญตาราง

ตาราง	หน้า
2.1 แสดงการเข้าครอบครองสถานะของอิเล็กตรอน 6 ตัว ที่อุณหภูมิศูนย์องศาสัมบูรณ์	11
4.1 แสดงค่าความหนาแน่นของอิเล็กตรอนที่มีพลังงานสูงกว่าระดับพลังงานนำของสารกึ่งตัวนำใน 3, 2, 1 และ 0 มิติ	49
4.2 แสดงค่าความหนาแน่นของโฮลที่มีพลังงานต่ำกว่าระดับพลังงานเวเลนต์ของสารกึ่งตัวนำใน 3, 2, 1 และ 0 มิติ	50
4.3 คำตอบทั่วไปของความหนาแน่นประจุพาหะในตัวของสารกึ่งตัวนำใน 3, 2, 1 และ 0 มิติที่คำนวณจากความหนาแน่นของสถานะ	51
4.4 ความสัมพันธ์ของความหนาแน่นประจุพาหะในตัวของสารกึ่งตัวนำกับขนาดของมิติในกรณีพิเศษที่ 1 ซึ่งมีอิเล็กตรอนอยู่เฉพาะระดับพลังงาน E_c และมีโฮลอยู่เฉพาะระดับพลังงาน E_v	52
4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างความนำไฟฟ้าของอิเล็กตรอนในสารกึ่งตัวนำกับขนาดของมิติ	56
4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างความนำไฟฟ้าของโฮลในสารกึ่งตัวนำกับขนาดของมิติ	56
4.7 ความสัมพันธ์ของความนำไฟฟ้าของอิเล็กตรอนในสารกึ่งตัวนำกับขนาดของมิติโดยแต่ละระดับพลังงานเป็นสัดส่วนจากค่าความนำไฟฟ้าที่ระดับพลังงานนำ	57
4.8 ความสัมพันธ์ของความนำไฟฟ้าของอิเล็กตรอนในสารกึ่งตัวนำกับขนาดของมิติโดยแต่ละระดับพลังงานเป็นสัดส่วนจากค่าความนำไฟฟ้าที่ระดับพลังงานนำ	58
4.9 ค่าความนำไฟฟ้าของอิเล็กตรอนที่ระดับพลังงานนำ E_c เมื่อ $\frac{\Delta_n}{k_B T} \to \infty$ และ $T_{KG} = 1$ ในแต่ละมิติ	59
4.10 ค่าความนำไฟฟ้าของโฮลที่ระดับพลังงานเวเลนต์ E_v เมื่อ $\frac{\Lambda_n}{k_B T} \to -\infty$ และ $T_{KG} = 1$ ในแต่ละมิติ	59
4.11 ค่าความนำไฟฟ้าของอิเล็กตรอนที่ระดับพลังงานนำ E_c เมื่อ $\frac{\Delta_n}{k_B T} \to 0$ และ $T_{KG} = 1$ ในแต่ละมิติ	60
4.12 ค่าความนำไฟฟ้าของโฮลที่ระดับพลังงานเวเลนต์ E_v เมื่อ $\frac{\Lambda_n}{k_B T} \to 0$ และ $T_{KG} = 1$ ในแต่ละมิติ	61

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright © by Chiang Mai University
All rights reserved

หน้า

4.13 ตัวอย่างจำนวนสถานะที่มีพลังงานซ้ำกันใน 2, 1 และ 0 มิติเมื่อ $E_n = \sum_i n_i^2 E_0$ 62

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright © by Chiang Mai University
All rights reserved

สารบาญภาพ

รูป	หน้า
1.1 ตัวอย่างผลิตภัณฑ์ที่นาโนเทคโนโลยีเป็นส่วนเสริมประสิทธิภาพ	1
1.2 การเพิ่มขึ้นของพื้นที่ผิวเมื่อขนาดของสารเล็กลงแต่มีปริมาตรรวมเท่ากัน	2
1.3 ลักษณะของมิติและความหนาแน่นของสถานะของอิเล็กตรอนอิสระ ใน 3, 2, 1 และ 0 มิติ	3
1.4 แผนภาพแสดงระดับพลังงานของประจุพาหะของสารกึ่งตัวนำใน 3, 2, 1 และ 0 มิติ	4
1.5 แผนภาพแสดงระดับพลังงานกับความหนาแน่นของสถานะของสารกึ่งตัวนำในตัว ใน 3, quasi-2, quasi-1 และ 0 มิติ	5
2.1 รูปแสดงบ่อพลังงานศักย์อนันต์ความยาว L	9
2.2 รูปแสดงสถานะที่เป็นไปได้ใน k-space โดยขึ้นกับค่า $\bar{k}$ ในช่วงความหนา dk	13
2.3 แสดงสถานะใน k-space โดยขึ้นกับค่า $\vec{k}$ ในช่วงความหนา dk ใน 2 มิติ	14
2.4 แสดงความหนาแน่นของสถานะใน 3, 2, 1 และ 0 มิติของอิเล็กตรอนอิสระ	17
2.5 แสดงลักษณะการแจกแจงของเฟอร์มิ-ดิแรก ณ อุณหภูมิต่างๆ	20
2.6 (ก) แสดงค่าพลังงานของอิเล็กตรอนอิสระ และ (ข) แสดงช่องว่างพลังงานที่ไม่มีอิเล็กตรอนในระดับพลังงานช่วง $E_g \approx 2\lvert U_{\vec{K}} \rvert$ เมื่อ $\varepsilon^0_{\vec{q}} \approx \varepsilon^0_{\vec{q}-\vec{K}}$ ใน First Brillouin Zone	30
2.7 (ก) แถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำอย่างง่าย และ(ข) แถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำที่มีลักษณะเป็น Paraboric Band	31
4.1 กราฟของความหนาแน่นประจุพาหะในตัวของสารกึ่งตัวนำใน 3, 2, 1 และ 0 มิติกับอุณหภูมิสำหรับกรณีพิเศษ	53
4.2 กราฟระหว่าง $\ln n + E_g / 2k_BT$ และ $\ln T$ ของสารกึ่งตัวนำซิงค์ออกไซด์ (ZnO)	54
4.3 แสดงค่าความนำไฟฟ้าของอิเล็กตรอนใน 3, 2, 1 และ 0 มิติเทียบกับความนำไฟฟ้าที่ระดับพลังงานนำ (G/G_0) กับระดับพลังงานของอิเล็กตรอน (E_{c_n}/k_BT)	62
4.4 แสดงค่าความนำไฟฟ้าของอิเล็กตรอนใน 2 มิติเทียบกับความนำไฟฟ้าที่ระดับพลังงานนำ (G/G_0) กับระดับพลังงานของอิเล็กตรอน (E_{c_n}/k_BT) ที่มีค่า T_{KG} เป็น 1, 0.75 และ 0.5 ตามลำดับ	63
4.5 แสดงผลของสถานะพลังงานซ้ำต่อความนำไฟฟ้าของอิเล็กตรอนใน 3, 2, 1 และ 0 มิติในระดับพลังงาน(G_n) กับระดับพลังงานของอิเล็กตรอน (E_{c_n}/k_BT)	64

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright © by Chiang Mai University
All rights reserved