บทที่ 1
บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของงานวิจัย

ในปัจจุบันนี้ วิทยาศาสตร์มีความสำคัญมากสำหรับมนุษย์ เริ่มต้นจากการเรียนรู้และศึกษารายละเอียดจากตัวเองและธรรมชาติ โดยสร้างกฎและทฤษฎีพื้นฐานเพื่อให้เข้าใจธรรมชาติได้ง่ายขึ้นและเป็นรูปแบบ ตลอดจนพัฒนาความรู้นำมาประยุกต์สร้างเครื่องมือและอุปกรณ์หลายชนิด และพัฒนาประสิทธิภาพในการทำงานของเครื่องมือ เครื่องจักร และสิ่งอำนวยความสะดวกต่างๆ ให้ตอบสนองความต้องการของมนุษย์ให้มากที่สุด อย่างไรก็ตามมนุษย์มีความต้องการที่ไม่มีขีดจำกัดแต่มนุษย์ก็ต้องตระหนักไว้เสมอว่าทรัพยากรในธรรมชาตินั้นมีอยู่อย่างจำกัด เมื่อมนุษย์มีความเข้าใจในกลไกของธรรมชาติมากขึ้นก็จะสามารถนำทรัพยากรจากธรรมชาติมาใช้ได้มากขึ้นด้วย

วิทยาศาสตร์เป็นจุดเริ่มต้นของการทำความเข้าใจกับธรรมชาติ โดยใช้กระบวนการของเหตุและผล ปัจจุบันนักวิทยาศาสตร์มุ่งสนใจวิทยาศาสตร์ทางด้านนาโนเทคโนโลยี เนื่องจากพบว่าสารที่มีระดับขนาดนาโนเมตรมีสมบัติและพฤติกรรมหลายๆอย่างที่แตกต่างจากสิ่งที่มนุษย์คุ้นเคยในระดับขนาดที่มากกว่าไมโครเมตรขึ้นมา การศึกษาสมบัติของสารนาโนถูกนำมาประยุกต์ สร้างสิ่งใหม่ และเพิ่มประสิทธิภาพการใช้งานของสิ่งของเดิมที่มีอยู่ ดังรูปที่ 1.1 กระเป๋าที่เคลือบสารนาโนทำให้มีคุณสมบัติไม่เปียกน้ำและทนทานยิ่งขึ้น และชุดอุปกรณ์คอมพิวเตอร์ที่ใช้อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ทำมาจากวัสดุนาโน เช่น ตัวไอซี ทรานซิสเตอร์ มีส่วนในการช่วยในการลดขนาดและเพิ่มประสิทธิภาพในการทำงานให้สูงขึ้น

กระเป๋าหนังที่เคลือบด้วยสารนาโน[1]

ชุดอุปกรณ์คอมพิวเตอร์ที่ใช้สารนาโนเป็นส่วนประกอบอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์[2]

รูปที่ 1.1 ตัวอย่างผลิตภัณฑ์ที่นาโนเทคโนโลยีเป็นส่วนเสริมประสิทธิภาพ

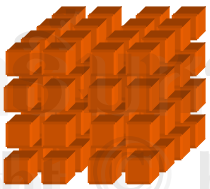
ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

นาโนเทคโนโลยี[3] (คำว่า Nano มาจากภาษากรีกแปลว่า 1 ในพันล้านหน่วย) หมายถึง ความสามารถในการทำ การวัด การสำรวจ การทำนาย และการสร้างสิ่งต่างๆ ในระดับอะตอมและโมเลกุล และสามารถใช้ประโยชน์จากคุณสมบัติและคุณลักษณะที่ค้นพบในระดับดังกล่าวได้ โดยทั่วไปแล้วนาโนเทคโนโลยีทำงานที่ระดับเล็กมากๆ ตั้งแต่ 0.1 ถึง 100 นาโนเมตร หน่วยวัด 1 นาโนเมตรมีขนาด 1 ในพันล้านของเมตร หรือประมาณ 1/80,000 เท่าของเส้นผมมนุษย์หรือ 10 เท่าของขนาดอะตอมของไฮโดรเจน

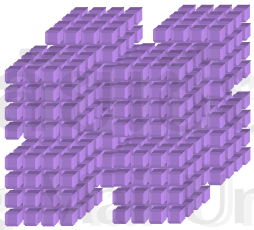
ในการศึกษาและวิจัยทางด้านฟิสิกส์ นาโนเทคโนโลยีมีความสำคัญ คือ เมื่อสารมีขนาดเล็กลงจนถึงระดับนาโนเมตร สารจะมีคุณสมบัติบางอย่างเปลี่ยนแปลงไปจากคุณสมบัติเดิมเมื่อสารมีขนาดใหญ่หรือเป็นก้อนสาร (Bulk) สมบัติของสารที่เปลี่ยนแปลงไป เช่น อัตราส่วนของพื้นที่ผิวต่อปริมาตร คุณสมบัติทางไฟฟ้า เป็นต้น เมื่อสารมีขนาดเล็กลงจนถึงระดับนาโนจะทำให้อัตราส่วนของพื้นที่ผิวต่อปริมาตรรวมทั้งหมดมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างมาก ยกตัวอย่างแสดงดังรูป 1.2 การเปลี่ยนแปลงพื้นที่ผิวต่อปริมาตรที่มีปริมาตร 1x1x1 ลูกบาศก์มิลลิเมตร ที่มีพื้นที่ผิว 6 ตารางมิลลิเมตร เมื่อลดขนาดลูกบาศก์ให้เป็น 1x1x1 ลูกบาศก์ไมโครเมตร แต่มีปริมาตรรวมเท่าเดิมสารจะมีพื้นที่ผิวเพิ่มขึ้นเป็น 6,000 ตารางมิลลิเมตร และเมื่อลดขนาดของลูกบาศก์ให้มีขนาดเพียง 1x1x1 ลูกบาศก์นาโนเมตร พื้นที่ผิวจะเพิ่มเป็น 6,000,000 ตารางมิลลิเมตร

1 mm^3
พื้นที่ผิว= 6 mm^2

1/8 mm^3/cubic
พื้นที่ผิว= 12 mm^2



1 μm^3/cubic
พื้นที่ผิว= 6,000 mm^2



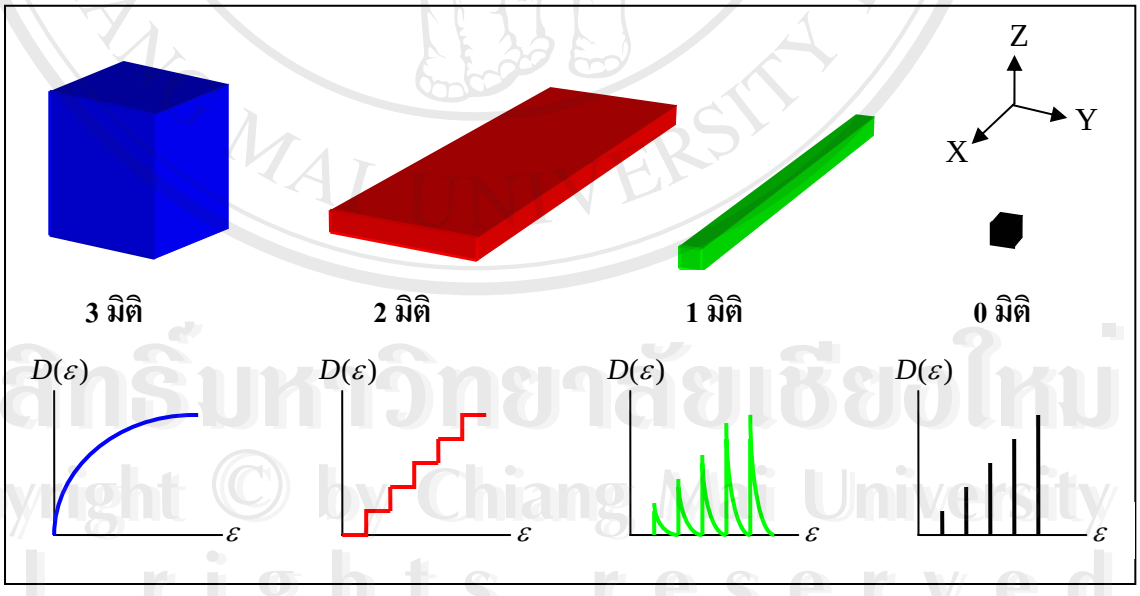
1 nm^3/cubic
พื้นที่ผิว= 6,000,000 mm^2

รูปที่ 1.2 การเพิ่มขึ้นของพื้นที่ผิวเมื่อขนาดของสารเล็กลงแต่มีปริมาตรรวมเท่ากัน[4]

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

ซึ่งเพิ่มขึ้นถึงหนึ่งล้านเท่าค่าที่เพิ่มขึ้นมากมายอย่างนี้ มีประโยชน์โดยตรงกับอุปกรณ์ต่างๆ เช่น ใช้ทำเซนเซอร์ซึ่งใช้พื้นที่ผิวในการเกิดปฏิกิริยา และสารเคลือบผิวทำให้วัสดุที่ถูกเคลือบสวยงามและใช้งานได้นานยิ่งขึ้น

สำหรับในงานวิจัยนี้ ได้ศึกษาถึงผลของมิติที่มีต่อคุณสมบัติทางไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำ (Semiconductor) เมื่อสารมีขนาดเล็กลงจนถึงระดับนาโนเมตร สิ่งที่น่าสนใจและมักจะเป็นคำถามคือ ทำไมต้องสนใจศึกษาคุณสมบัติทางไฟฟ้าที่ระดับนาโนเมตร คำตอบนั้นเนื่องมาจากผลกระทบของขนาดที่ลดลง (Size Effect) จนถึงระดับขนาดนาโนเมตรทำให้ที่อยู่หรือสถานะ (States) ที่อิเล็กตรอนสามารถครอบครองได้ในผลึก (Lattice) เปลี่ยนแปลงไป จากรูปที่ 1.3 เมื่อสารใน 3 มิติถูกลดขนาดความหนาในแนวแกน Z ลงเรื่อยๆ สถานะของอิเล็กตรอนในผลึกก็ยังไม่ได้รับผลกระทบใดๆ จนกระทั่งความหนาในแนวแกน Z อยู่ในระดับนาโนเมตร สถานะของอิเล็กตรอนก็จะได้รับผลกระทบจาก 3 มิติก็จะลดลงเหลือ 2 มิติ นั่นคือ ความหนาแน่นของสถานะ (Density of States) เปลี่ยนแปลงที่ระดับนี้นั่นเอง และเมื่อสารใน 2 มิติถูกลดขนาดความหนาในแนวแกน Y ลงเรื่อยๆ จนกระทั่งความหนาแน่นของสถานะเปลี่ยนแปลงไป จาก 2 มิติก็จะลดลงเหลือ 1 มิติ และเมื่อลดขนาดแกน X ลงจนความหนาแน่นของสถานะเปลี่ยนแปลงก็จะเป็น 0 มิติตามลำดับ



รูปที่ 1.3 ลักษณะของมิติและความหนาแน่นของสถานะของอิเล็กตรอนอิสระใน 3, 2, 1 และ 0 มิติ[5]

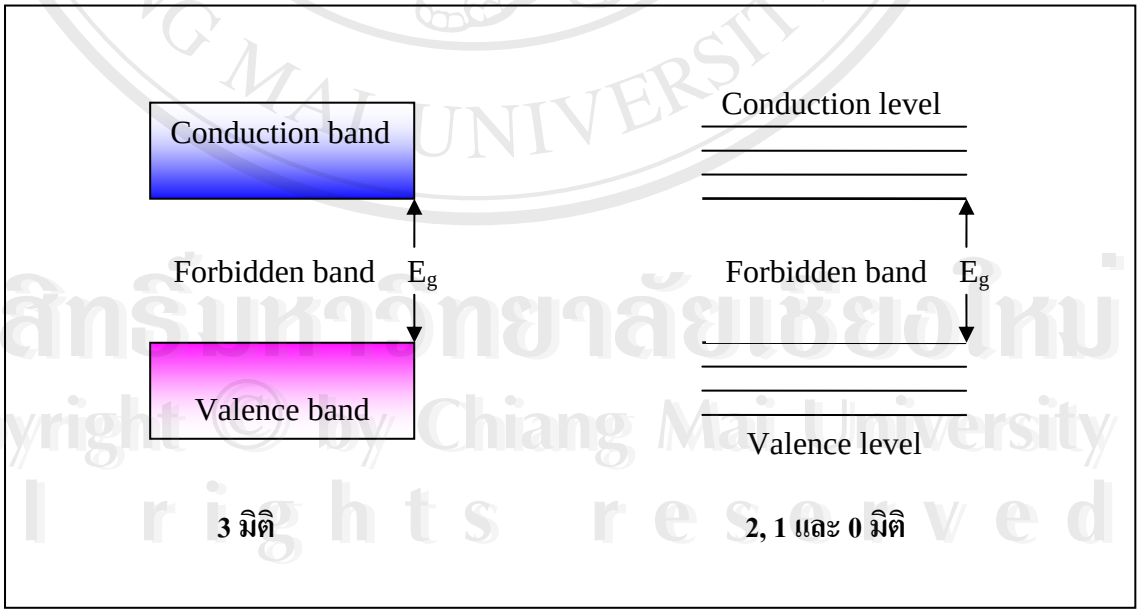
โดยที่ ε คือ ค่าพลังงานของอิเล็กตรอนอิสระ

$D(\varepsilon)$ คือ ความหนาแน่นของสถานะ

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright © by Chiang Mai University
All rights reserved

ความหนาแน่นของสถานะแสดงถึงจำนวนสถานะที่เป็นไปได้ต่อช่วงพลังงานหนึ่งๆ เช่น จากเดิมที่อิเล็กตรอนในโลหะสามารถมีพลังงานได้ทุกค่าใน 3 มิติ ก็จะกลายเป็นเลือกรับพลังงานได้บางค่าเท่านั้นใน 2, 1 และ 0 มิติ ที่ค่าพลังงานใกล้เคียงกันบางค่าพลังงานจะมีอิเล็กตรอนอยู่มากและในบางพลังงานมีอิเล็กตรอนอยู่น้อยมาก ในที่นี้ใช้ผลกระทบทางควอนตัม (Quantum Effect) เป็นตัวแบ่งมิติของสาร จะเห็นว่าใน 3 มิติ อิเล็กตรอนเป็นอิสระทั้ง 3 ทิศทางและเมื่อมิติลดลงเป็น 2 มิติ อิเล็กตรอนเหมือนถูกขังอยู่ในบ่อพลังงานศักย์ในแนวแกน Z ทำให้พลังงานของอิเล็กตรอนที่เคลื่อนที่ในแนวแกน Z ไม่ต่อเนื่อง มีผลทำให้ความหนาแน่นของสถานะเปลี่ยนแปลงไปจาก 3 มิติ ทำนองเดียวกันในสาร 1 มิติพลังงานของอิเล็กตรอนที่เคลื่อนที่ในแนวแกน Y, Z ไม่ต่อเนื่อง และใน 0 มิติพลังงานของอิเล็กตรอนไม่ต่อเนื่องทั้ง 3 แกน

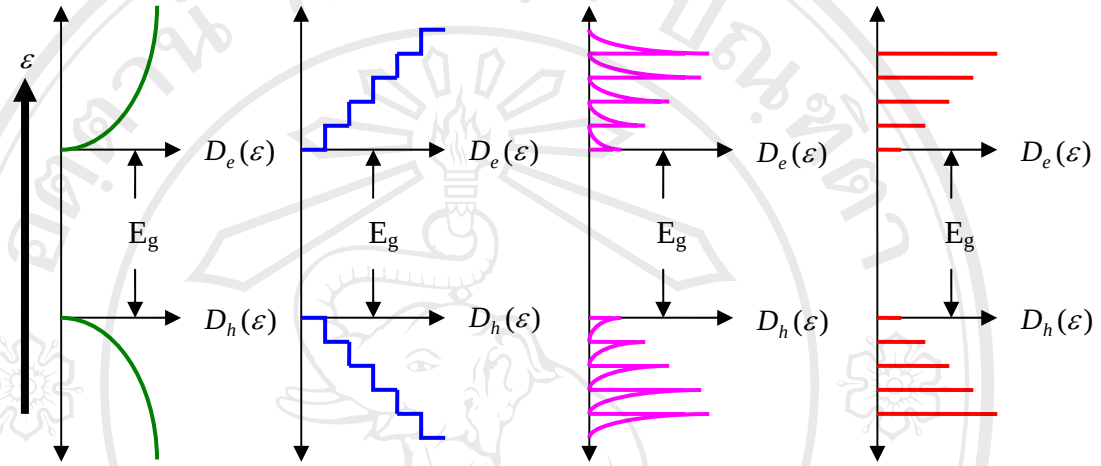
สำหรับสารกึ่งตัวนำใน 3 มิติ การนำไฟฟ้าจะใช้ประจุพาหะ 2 ชนิด[6,7] คือ อิเล็กตรอนอิสระในแถบพลังงานนำ (Conduction Band) และโฮลอิสระในแถบพลังงานเวเลนต์ (Valence Band) ดังรูปที่ 1.4 ที่อุณหภูมิศูนย์องศาสัมบูรณ์ (T = 0 K) อิเล็กตรอนทั้งหมดจะอยู่ในแถบพลังงานเวเลนต์ สารจะมีคุณสมบัติเป็นฉนวน เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นอิเล็กตรอนจากแถบพลังงานเวเลนต์จะได้รับพลังงานจากอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นและมีการเปลี่ยนระดับพลังงานกลายเป็นอิเล็กตรอนอิสระในระดับพลังงานนำ และเกิดโฮลในแถบพลังงานเวเลนต์ด้วย สารจะกลายเป็นสารกึ่งตัวนำซึ่งการนำไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำจะเปลี่ยนแปลงกับอุณหภูมิมากกว่าโลหะ



รูปที่ 1.4 แผนภาพแสดงระดับพลังงานของประจุพาหะของสารกึ่งตัวนำใน 3, 2, 1 และ 0 มิติ

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright © by Chiang Mai University
All rights reserved

ใน 2, 1 และ 0 มิติ เนื่องจากความหนาแน่นของสถานะเปลี่ยนแปลงไปจาก 3 มิติ จะทำให้แถบพลังงานนำกลายเป็นระดับพลังงานนำ (Conduction Level) และแถบพลังงานเวเลนต์กลายเป็นระดับพลังงานเวเลนต์ (Valence Level) นั่นคือ อิเล็กตรอนและโฮลมีพลังงานได้บางค่าเท่านั้นใน 2, 1 และ 0 มิติ ซึ่งเป็น quasi-dimension จะกล่าวรายละเอียดในบทที่ 2



รูปที่ 1.5 แผนภาพแสดงระดับพลังงานกับความหนาแน่นของสถานะของสารกึ่งตัวนำในตัวใน 3, 2, 1 และ 0 มิติ[5]

เมื่อ ε คือ ค่าพลังงานของสารกึ่งตัวนำ

E_g คือ ช่องว่างพลังงานของสารกึ่งตัวนำ

$D_e(\varepsilon)$ คือ ความหนาแน่นของสถานะของอิเล็กตรอนอิสระ

$D_h(\varepsilon)$ คือ ความหนาแน่นของสถานะของโฮลอิสระ

เมื่อแสดงรายละเอียดรูปที่ 1.4 เกี่ยวกับความหนาแน่นของสถานะก็จะได้ผลดังรูปที่ 1.5 จะเห็นว่า สารกึ่งตัวนำในตัวมีความสมมาตรทางพลังงานระหว่างอิเล็กตรอนและโฮลที่เป็นประจุพาหะพิจารณาอิเล็กตรอน ใน 3 มิติตั้งแต่ระดับพลังงานนำขึ้นไปเป็นระดับพลังงานของอิเล็กตรอนที่เป็นประจุพาหะ เมื่อค่าพลังงาน ε สูงขึ้น ก็จะมีสถานะให้อิเล็กตรอนเลือกมากขึ้น ใน 2 มิติสถานะของอิเล็กตรอนที่เป็นประจุพาหะจะเพิ่มขึ้นเฉพาะบางค่าพลังงาน ใน 1 มิติระดับพลังงานที่สูงกว่าระดับพลังงานนำเริ่มแยกออกให้เห็นว่าที่ระดับพลังงานใกล้กันมีความหนาแน่นของสถานะแตกต่างกันมาก และใน 0 มิติอิเล็กตรอนมีระดับพลังงานได้เฉพาะค่าเท่านั้น ซึ่งในทุกมิติมีลักษณะเหมือนกันคือที่ช่วงพลังงานสูงๆ ขึ้นไป อิเล็กตรอนมีสถานะให้เลือกมากขึ้นเรื่อยๆ แต่อย่างไรก็ตาม แม้จะมีสถานะให้อิเล็กตรอนเลือกมากมายแต่ก็มีโอกาสในการเข้าครอบครองสถานะแต่ละสถานะไม่เท่ากัน

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright © by Chiang Mai University
All rights reserved

และเมื่อมีผลของอุณหภูมิเข้ามาเกี่ยวข้องด้วยจะมีผลอย่างไร ซึ่งอธิบายด้วย การแจกแจงของเฟอร์มิ-ดิแรก (Fermi-Dirac Distribution) เนื่องจากอิเล็กตรอนและโฮลเป็นอนุภาคเฟอร์มิออนก็จะต้องมีพฤติกรรมที่เป็นไปตามหลักการกีดกันของเพาลี[8] (Pauli Exclusion Principle) ซึ่งจะกล่าวรายละเอียดในบทที่ 2 ต่อไป

จะเห็นว่าการลดลงของมิติมีผลทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสมบัติหลายๆอย่างของสาร ซึ่งการเปลี่ยนแปลงเหล่านี้ล้วนเกิดขึ้นที่ระดับนาโนเมตรทั้งสิ้น น่าสนใจว่าความหนาแน่นของสถานะที่เปลี่ยนแปลงไปจาก 3 มิตินั้นจะส่งผลทำให้สมบัติทางไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำได้รับผลกระทบอย่างไร สมบัติทางไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำที่สนใจศึกษาในงานวิจัยนี้ คือ ความหนาแน่นประจุพาหะในตัวและความนำไฟฟ้า

ความหนาแน่นประจุพาหะในตัว เป็นปริมาณที่แสดงถึงประจุที่จะใช้ในการนำไฟฟ้าว่ามีจำนวนมากน้อยเพียงใด และน่าสนใจว่าในแต่ละมิติความหนาแน่นประจุพาหะแตกต่างกันหรือไม่ ผลของมิติทำให้จำนวนของประจุพาหะมีแนวโน้มที่แตกต่างจาก 3 มิติอย่างไร สำหรับความนำไฟฟ้าซึ่งเป็นคุณสมบัติที่แสดงการตอบสนองของสารกึ่งตัวนำเมื่อได้รับพลังงานจากสนามไฟฟ้าภายนอก ความสามารถในการนำไฟฟ้าขึ้นกับอุณหภูมิอย่างไร และแต่ละมิติมีแนวโน้มแตกต่างกันหรือไม่ ซึ่งจะแสดงให้เห็นในงานวิจัยนี้

สำหรับตำราและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับความหนาแน่นของสถานะ ความนำไฟฟ้าของสารทั้งสารโลหะและสารกึ่งตัวนำ มีเอกสารที่เกี่ยวข้องดังนี้

ในปี 1957 R. Landeuer[9] ได้เสนอทฤษฎีว่าการนำไฟฟ้าของอิเล็กตรอนอิสระโลหะใน 1 มิตินั้น มีค่าไม่ต่อเนื่องเป็น $2e^2/h$ และค่าไม่ต่อเนื่องนี้ไม่ขึ้นกับชนิดของโลหะเลย แต่อย่างไรก็ตาม Landeuer ไม่ได้สนใจ Inelastic Dissipation[10,11] และอิเล็กตรอนแต่ละตัวในโลหะไม่มีผลต่อการเคลื่อนที่ของกันและกัน ซึ่งภายหลัง Fisher และ Lee[12] ได้เรียกว่า Landeuer Formula

ในปี 1988 B. J. van Wees[13] และคณะ ได้ทดลองพบว่ามีกระแสไหลผ่านระหว่างขั้วไฟฟ้า 2 ขั้วที่มีระยะห่าง 250 นาโนเมตร และกระแสที่ได้มีค่าไม่ต่อเนื่องมีค่าเป็น $2e^2/h$ ซึ่งตรงตามทฤษฎีของ Landeuer

ในปี 1996 E.N. Bogachek[14] และคณะ ได้แสดงให้เห็นว่าสภาพนำไฟฟ้าของเส้นนาโนมีค่าไม่ต่อเนื่องโดยเป็นจำนวนเท่าของ $2e/h^2$ เป็นไปตามทฤษฎีของ Landauer[15] ซึ่งการนำไฟฟ้าของเส้นนาโนแตกต่างจาก 3 มิติ ที่มีค่าต่อเนื่อง

ในปี 1997 B.V. Zeghbroech[5] ได้อธิบายถึงความหนาแน่นของสถานะใน 3, 2, 1 และ 0 มิติ ซึ่งในแต่ละมิติมีการกระจายของสถานะในแต่ละช่วงพลังงานที่แตกต่างกันไป[16] โดยในมิติ 2, 1 และ 0 มิติ มีค่าความหนาแน่นสถานะไม่ต่อเนื่องแตกต่างจาก 3 มิติ และในมิติที่ต่ำกว่า 2 มิติ สถานะ

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright © by Chiang Mai University
All rights reserved

ของสารจะมีสถานะที่อิเล็กตรอนครอบครองน้อยลง นั่นก็คืออิเล็กตรอนมีพลังงานซ้ำกันมากขึ้นในมิติที่น้อยลง[17]

ในปี 2001 K. Takayanaki[18] ทำการศึกษาเส้นนาโนของทองที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ2-3เท่าของอะตอม ในความดันที่ต่ำมากๆ พบว่าค่าที่บันทึกได้จากการสั่นของอะตอมของทองมีค่าเป็นจำนวนเท่าของ $2e^2/h$ และได้อธิบายว่าการนำไฟฟ้าของเส้นนาโนนั้นแตกต่างจากการนำไฟฟ้าของเส้นลวดใน 3 มิติ เพราะว่าขนาดของเส้นนาโนเล็กมากจนมีผลต่อการกีดกันการเคลื่อนที่อิเล็กตรอนส่งผ่านพลังงานโดยประพฤติตัวเป็นคลื่นและสะท้อนภายในท่อ ซึ่งทดลองโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (TEM) ในการสังเกตผลการทดลอง

ในปี 2003 P.D. Mukunda และ G. Frederick[19] ได้เสนอทฤษฎีว่า การนำไฟฟ้าของสารโลหะใน 1 มิตินั้นมีค่าไม่ต่อเนื่อง และมองว่าอิเล็กตรอนเมื่ออยู่ในความต่างศักย์ไฟฟ้าจะเคลื่อนที่ผ่านผลึกโดยแบ่งเป็น Elastic scatting และ Inelastic scattering[20] กรณีที่มี Inelastic scattering เข้ามาเกี่ยวข้องด้วย ค่าความนำไฟฟ้ายังมีค่าไม่ต่อเนื่องเหมือนเดิมแต่จะไม่ใช่ $2e^2/h$ อีกต่อไป[21]

สิ่งที่สนใจในงานวิจัยนี้ ก็คือ ความหนาแน่นของสถานะส่งผลต่อสมบัติทางไฟฟ้า เช่น ความหนาแน่นประจุพาหะและความนำไฟฟ้าอย่างไรบ้าง และสารกึ่งตัวนำจะมีค่าความหนาแน่นประจุพาหะและความนำไฟฟ้ามีรูปแบบสมการเป็นอย่างไรในขนาดมิติที่ลดลง อิเล็กตรอนและโฮลในสารกึ่งตัวนำจะมีพฤติกรรมเหมือนหรือแตกต่างกับในโลหะอย่างไร และต้องใช้ข้อสมมุติอะไรบ้างที่จะช่วยให้คำนวณได้ง่ายยิ่งขึ้น ความนำไฟฟ้าเป็นสมบัติทางไฟฟ้าพื้นฐานสำหรับสารทุกประเภท เพราะถ้าเราทราบว่าสารชนิดนี้มีค่าความนำไฟฟ้าขึ้นกับอุณหภูมิมากหรือน้อยเพียงใดและต้องกระตุ้นด้วยศักย์ไฟฟ้าภายนอกมากน้อยแค่ไหนสารจึงจะมีสมบัติที่พิเศษออกมา แม้ว่าเราจะทดลองได้ก็รู้ด้วยความเคยชินแต่ไม่ได้เข้าใจเหตุผลที่มาที่แท้จริงของสารนั้นเราก็นำสารนั้นไปประยุกต์ใช้งานได้น้อย และเมื่อถามว่าคำนวณไปเพื่ออะไร คำตอบก็คือ เมื่อเราเข้าใจสมบัติต่างๆ ในรูปแบบที่แน่นอนก็เหมือนเรารู้จักธรรมชาติของสารมากขึ้น และจะช่วยให้นำไปประยุกต์ใช้ในสิ่งที่ต้องการได้ง่ายขึ้น ทฤษฎีทางฟิสิกส์มุ่งค้นหาคำอธิบายธรรมชาติอย่างเป็นรูปแบบที่ชัดเจน ประโยชน์ที่สำคัญมากก็คือเมื่อเราพบสิ่งแปลกใหม่ที่คล้ายสิ่งที่เคยพบเจอ แล้วเราสามารถอธิบายว่าทำไมสิ่งใหม่จึงมีพฤติกรรมอย่างนั้น โดยอาศัยจากความรู้ที่สะสมมา นี่คือ สิ่งพิเศษของการเรียนรู้ทางทฤษฎี

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright © by Chiang Mai University
All rights reserved

1.2. วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อศึกษาและคำนวณผลของมิติที่มีต่อคุณสมบัติทางไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำ เช่น ความหนาแน่นประจุพาหะในตัว ความนำไฟฟ้า จากความหนาแน่นของสถานะ

2. เพื่อหาแบบจำลองและกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างมิติกับคุณสมบัติทางไฟฟ้า เช่น ความหนาแน่นประจุพาหะในตัว ความนำไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำ

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright © by Chiang Mai University
All rights reserved