

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญ

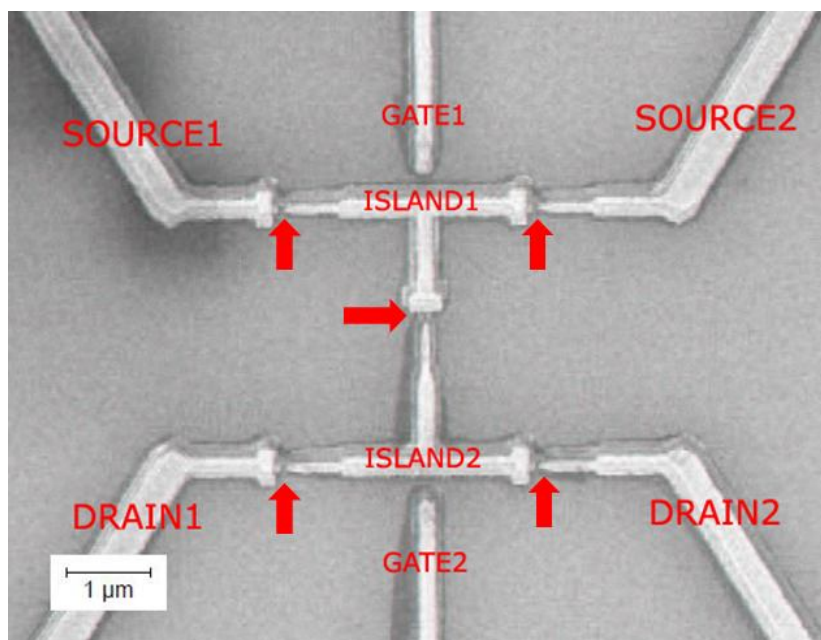
ศตวรรษที่ผ่านมา อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์มีความสำคัญต่อชีวิตประจำวันและการพัฒนาด้านวิทยาศาสตร์เทคโนโลยีเป็นอย่างมาก ปัจจุบันกระบวนการลิโทกราฟีชนิดลำอิเล็กตรอน (e-beam lithography) และกระบวนการซาโดอีวาพอเรชัน (shadow evaporation) สามารถสร้างอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ให้มีขนาดในระดับนาโนเมตร ซึ่งการลดขนาดของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ในระดับดังกล่าวส่งผลให้พฤติกรรมทางไฟฟ้าของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์เปลี่ยนแปลงไป เช่น อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์เดี่ยว (single electron devices) [1-5] ซึ่งเป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่กำลังได้รับความสนใจอย่างกว้างขวาง เนื่องจากสามารถควบคุมให้อิเล็กตรอนเคลื่อนที่ได้ทีละหนึ่งตัว สูญเสียพลังงานน้อยและสามารถประยุกต์ใช้งานได้หลากหลาย [4-5]

ใน ค.ศ. 1909 มิลิกาน (Milikan) ได้ทำการทดลองเพื่อแสดงให้เห็นว่าประจุของอิเล็กตรอนมีค่าไม่ต่อเนื่อง โดยการควบคุมอิเล็กตรอนให้เคลื่อนที่ในระบบสุญญากาศ [6] แต่อีก 78 ปี ต่อมา กล่าวคือ ในปี ค.ศ. 1987 ฟุตอลและคณะ (Futon et al) [2] ได้ประสบความสำเร็จในการควบคุมอิเล็กตรอนในโครงสร้างของสถานะของแข็ง (solid state structure) ให้เคลื่อนที่ได้ทีละหนึ่งตัว ต่อมา ในปี ค.ศ. 1991 ลาฟานและคณะ (Lafarge et al) [3] ได้ประดิษฐ์โครงสร้างอิเล็กทรอนิกส์ที่ทำจากอะลูมิเนียมที่เรียกว่า กล่องอิเล็กตรอนเดี่ยว (single electron box) เพื่อใช้ในการศึกษาปรากฏการณ์การขัดขวางแบบคูลอมบ์ (Coulomb blockade effect) ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญที่ทำให้สามารถควบคุมอิเล็กตรอนได้ทีละหนึ่งตัวในโครงสร้างที่อยู่ในสถานะของแข็ง ในการอธิบายพฤติกรรมทางไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในกล่องอิเล็กตรอนเดี่ยวสามารถอธิบายด้วยวิธีการเชิงวิเคราะห์ (analytical methods) [7-8] ซึ่งวิธีการดังกล่าวสามารถอธิบายได้เฉพาะบางกรณี เช่น ที่อุณหภูมิสูง ซึ่งเป็นช่วงที่ไม่เกิดปรากฏการณ์การขัดขวางแบบคูลอมบ์ ต่อมาในปี ค.ศ. 1997 หวังและคณะ (Wang et al) [9] ได้ประสบความสำเร็จในการอธิบายพฤติกรรมทางไฟฟ้าของกล่องอิเล็กตรอนเดี่ยว โดยเฉพาะอย่างยิ่งที่อุณหภูมิต่ำ ซึ่งเป็นช่วงของการเกิดปรากฏการณ์การขัดขวางแบบคูลอมบ์โดยใช้วิธีควอนตัมมอนติคาร์โล (quantum Monte Carlo method)

ต่อมาในปี ค.ศ. 2002 วอลลิสเซอร์และคณะ (Wallisser et al) [10] ได้ทำการศึกษาระบบที่เรียกว่า ทรานซิสเตอร์อิเล็กตรอนเดี่ยว (single electron transistor) ซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่มีความซับซ้อนมากกว่ากล่องอิเล็กตรอนเดี่ยว กล่าวคือ ประกอบด้วยเกาโลหะและรอยต่อของการทะลุผ่านสองรอยต่อคั่นอยู่ระหว่างเกาโลหะและขั้วไฟฟ้าทั้งสอง นอกจากนั้น ระบบยังประกอบด้วยขั้วเกต (gate electrode) ซึ่งทำหน้าที่ควบคุมจำนวนอิเล็กตรอนภายในเกาโลหะด้วยสนามไฟฟ้าจากแหล่งไฟฟ้าภายนอก ในการอธิบายการส่งผ่านอิเล็กตรอนและปรากฏการณ์การขัดขวางแบบคูลอมบ์ที่เกิดขึ้นใน

ทรานซิสเตอร์อิเล็กทรอนิกส์เดี่ยว วอลลิสเซอร์และคณะได้ใช้การเปลี่ยนแปลงความนำไฟฟ้าในการอธิบายปรากฏการณ์ดังกล่าว พร้อมทั้งได้เปรียบเทียบค่าความนำไฟฟ้าของทรานซิสเตอร์อิเล็กทรอนิกส์เดี่ยวที่ได้จากผลการทดลองกับผลการคำนวณด้วยวิธีการควอนตัมมอนติคาร์โลพบว่า ผลการคำนวณที่ได้จากวิธีการควอนตัมมอนติคาร์โลสามารถอธิบายผลการทดลองได้อย่างถูกต้องทุกช่วงอุณหภูมิ

ในปี ค.ศ.2005 ลิ้มบัชและคณะ (Limbach et al) [11] ได้รายงานผลการทดลองของปั๊มอิเล็กทรอนิกส์เดี่ยว (single electron pump) ซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่มีความซับซ้อนมากยิ่งขึ้น กล่าวคือ ประกอบด้วยเกาะโลหะสองเกาะที่เรียงต่อกันแบบอนุกรม โดยมีรอยต่อการทะลุผ่านคั่นอยู่กึ่งกลางระหว่างเกาะโลหะและคั่นอยู่ระหว่างเกาะโลหะกับขั้วไฟฟ้าทั้งสอง ที่สามารถเชื่อมต่อกับแหล่งจ่ายไฟภายนอกดังภาพประกอบ 1 นอกจากนี้ระบบยังประกอบด้วยขั้วเกต 2 ขั้วทำหน้าที่ควบคุมจำนวนอิเล็กทรอนิกส์ในแต่ละเกาะโลหะ



ภาพประกอบ 1 โครงสร้างของปั๊มอิเล็กทรอนิกส์เดี่ยว ที่ถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด (scanning electron microscope ; SEM) [11]

ลิ้มบัชและคณะได้ทำการวัดค่าความนำไฟฟ้าที่อุณหภูมิต่างๆ เพื่อเปรียบเทียบค่าที่คำนวณจากแบบจำลองซีควนเชียล (sequential model) พบว่าแบบจำลองดังกล่าวนี้ไม่สามารถอธิบายผลการทดลองดังกล่าวได้ถูกต้อง โดยเฉพาะอย่างยิ่งในช่วงของอุณหภูมิที่เกิดปรากฏการณ์การขัดขวางแบบคูลอมบ์ ต่อมาในปี ค.ศ. 2012 ศรีวิไล [12] ได้คำนวณค่าความนำไฟฟ้าด้วยวิธีการควอนตัมมอนติคาร์โลเพื่ออธิบายผลของปรากฏการณ์การขัดขวางแบบคูลอมบ์พบว่า ผลการคำนวณดังกล่าวสามารถอธิบายปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นได้ทุกช่วงอุณหภูมิ

นอกจากนี้การอธิบายการส่งผ่านอิเล็กทรอนิกส์และปรากฏการณ์การขัดขวางแบบคูลอมบ์สามารถอธิบายได้จากการเปลี่ยนแปลงของจำนวนอิเล็กทรอนิกส์เฉลี่ยในเกาะโลหะ เมื่อสนามไฟฟ้าที่ขั้ว

เกิดมีการเปลี่ยนแปลงไป เช่น ในกรณีของกล่องอิเล็กทรอนิกส์เดี่ยว [3] และ ทรานซิสเตอร์แบบอิเล็กทรอนิกส์เดี่ยว [13] จากตัวอย่างการอธิบายการส่งผ่านอิเล็กทรอนิกส์ในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์เดี่ยวด้วยจำนวนอิเล็กทรอนิกส์ในเกาะโลหะ ซึ่งเป็นปริมาณที่มีความหมายทางฟิสิกส์ชัดเจนและสามารถเชื่อมโยงได้โดยตรงกับการเกิดปรากฏการณ์การขัดขวางแบบคูลอมบ์ด้วยแผนภาพเสถียร [14-15] นอกจากนี้ค่าความนำไฟฟ้าไม่สามารถคำนวณได้โดยตรงจากวิธีควอนตัมมอนติคาร์โล แต่จำนวนอิเล็กทรอนิกส์ยังสามารถคำนวณได้โดยตรงจากวิธีดังกล่าว ดังนั้นในงานวิจัยนี้ จึงมีวัตถุประสงค์ที่จะอธิบายการส่งผ่านอิเล็กทรอนิกส์ในปั๊มอิเล็กทรอนิกส์เดี่ยว ด้วยจำนวนอิเล็กทรอนิกส์ที่เปลี่ยนแปลงไปในเกาะโลหะทั้งสอง เมื่อสนามไฟฟ้าที่ชั่วเกิดมีการเปลี่ยนแปลง โดยจำนวนอิเล็กทรอนิกส์ดังกล่าวสามารถคำนวณได้โดยตรงจากวิธีการควอนตัมมอนติคาร์โล ซึ่งเป็นวิธีการที่มาตรฐานใช้ในการอธิบายปรากฏการณ์ควอนตัมในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์เดี่ยว [12,16]

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อคำนวณจำนวนอิเล็กทรอนิกส์ในปั๊มอิเล็กทรอนิกส์เดี่ยวด้วยวิธีการควอนตัมมอนติคาร์โล
2. เพื่อนำผลการคำนวณที่ได้ไปอธิบายการส่งผ่านอิเล็กทรอนิกส์และปรากฏการณ์ขัดขวางแบบคูลอมบ์ในปั๊มอิเล็กทรอนิกส์เดี่ยว

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

คำนวณจำนวนอิเล็กทรอนิกส์ในปั๊มอิเล็กทรอนิกส์เดี่ยวชนิดโลหะ ที่ถูกใช้งานในช่วง $\beta E_C \in \{1, 5, 10, 15, 20\}$ ซึ่งพารามิเตอร์ดังกล่าว เป็นอัตราส่วนของพลังงานการเพิ่มประจุต่อพลังงานจลน์เฉลี่ยของอิเล็กทรอนิกส์ และใช้ค่าแรงดันไฟฟ้าแบบไม่มีหน่วย (dimensionless) ที่อยู่ในช่วง $[0, 1]$

1.4 สถานที่ทำการวิจัย

หน่วยวิจัยฟิสิกส์ทฤษฎีสารควบแน่น (Theoretical Condensed Matter Physics Research Unit) ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม

1.5 ประโยชน์ที่ได้รับ

1. สามารถคำนวณจำนวนอิเล็กทรอนิกส์ในปั๊มอิเล็กทรอนิกส์เดี่ยวได้
2. สามารถอธิบายการส่งผ่านของอิเล็กทรอนิกส์และปรากฏการณ์ขัดขวางแบบคูลอมบ์ที่เกิดขึ้นในปั๊มอิเล็กทรอนิกส์เดี่ยวได้