

## บทความเชิงข่าว

### “เส้นขอบเขตการขัดขวางแบบคูลอมบ์ของระบบเกาะควอนตัม”

สังเคราะห์และถอดบทเรียนจากงานวิจัยเรื่อง เส้นขอบเขตการขัดขวางแบบคูลอมบ์ของระบบเกาะควอนตัม  
ชื่อทุนอุดหนุน.....ทุนอุดหนุนการวิจัยประเภทส่งเสริมการตีพิมพ์ในวารสารระดับชาติ (Fast Track) ปีงบประมาณ  
2567

ชื่อ.....ผู้ช่วยศาสตราจารย์ประธาน ศรีวิไล... (ผู้เรียบเรียง)

ภาควิชา.....ฟิสิกส์..... คณะ.....วิทยาศาสตร์..... มหาวิทยาลัยมหาสารคาม

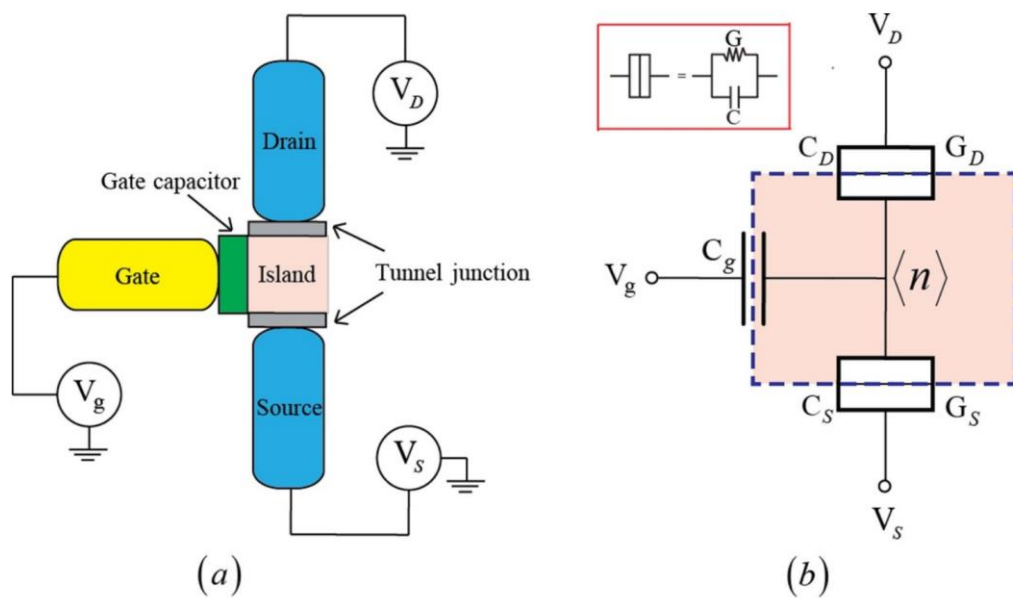
เบอร์โทรศัพท์ 043-754322 ต่อ 1140

Email: prathan.s@msu.ac.th

อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์เดี่ยว (single electron device) เป็นอุปกรณ์ที่สามารถควบคุมให้อิเล็กตรอนเคลื่อนที่เข้าหรือออกจากระบบได้ที่ละหนึ่งตัว สามารถนำไปประยุกต์ใช้งานได้หลากหลาย เช่น อิเล็กโทรมิเตอร์ [1] สิ่งประดิษฐ์เชิงตรรกะ (logic devices) [2] และเซลล์แสงอาทิตย์ (solar cells) [3] เป็นต้น โดยทั่วไปอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์เดี่ยว ประกอบด้วยเกาะโลหะและรอยต่อการทะลุผ่าน (tunneling junction) ในการควบคุมการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนให้ได้ทีละหนึ่งตัวนั้น จำเป็นต้องอาศัยปรากฏการณ์ที่เรียกว่า ปรากฏการณ์ขัดขวางแบบคูลอมบ์ (Coulomb blockade effect) โดยปรากฏการณ์ดังกล่าวเป็นปรากฏการณ์ที่กระแสการทะลุผ่านมีค่าลดต่ำลง เนื่องจากผลของอันตรกิริยาของแรงคูลอมบ์

ในการเกิดปรากฏการณ์ขัดขวางแบบคูลอมบ์ ระบบจำเป็นต้องมีคุณสมบัติที่สำคัญสองประการดังต่อไปนี้ ประการที่หนึ่ง ระบบต้องสามารถกักอิเล็กรอนส่วนเกิน (excess electron) ให้อยู่ภายในเกาะในช่วงเวลาหนึ่ง กล่าวคือ ค่าความต้านทานของระบบต้องมีค่ามากกว่าความต้านทานควอนตัมมาก ๆ ( $R \gg R_0$ ) เมื่อ  $R$  เป็นความต้านทานรวมของระบบ และ  $R_0$  เป็นความต้านทานควอนตัม ประการที่สอง พลังงานจลน์ของอิเล็กตรอนในระบบต้องมีค่าน้อยกว่าพลังงานการเพิ่มประจุ เพื่อไม่ให้อิเล็กตรอนสามารถเคลื่อนที่ผ่านระบบไปได้อย่างต่อเนื่อง กล่าวคือ  $E_K \gg E_C$  เมื่อ  $E_K$  เป็นพลังงานจลน์ของอิเล็กตรอน และ  $E_C$  เป็นพลังงานการเพิ่มประจุ แต่ในทางตรงกันข้าม ถ้าพลังงานจลน์ของอิเล็กตรอนในระบบมีค่ามากกว่าพลังงานการเพิ่มประจุ จะทำให้อิเล็กตรอนสามารถเคลื่อนที่ผ่านระบบไปได้อย่างต่อเนื่อง โดยทั่วไป เมื่อพิจารณาที่อุณหภูมิต่ำของสเกลวิน กล่าวคือไม่พิจารณาผลของการทะลุผ่าน (tunneling effect) ค่าพลังงานการเพิ่มประจุ ( $E_C$ ) สามารถคำนวณได้จากค่าความจุไฟฟ้าของระบบ กล่าวคือ  $E_C = e^2 / 2C_\Sigma$  เมื่อ  $e$  คือจำนวนประจุและ  $C_\Sigma$  คือความจุไฟฟ้ารวมของระบบ แต่ในกรณีอุณหภูมิต่ำ ๆ พลังงานการเพิ่มประจุจะขึ้นอยู่กับค่าอุณหภูมิต่ำและค่าความนำไฟฟ้ารวมของระบบ โดยพลังงานดังกล่าวนี้เรียกว่า พลังงานการเพิ่มประจุยังผล (effective charging energy) กล่าวคือ  $E_C^* = e^2 / 2C_\Sigma^*$  เมื่อ  $C_\Sigma^*$  คือค่าความจุไฟฟ้ายังผล (effective capacitance) ของระบบ

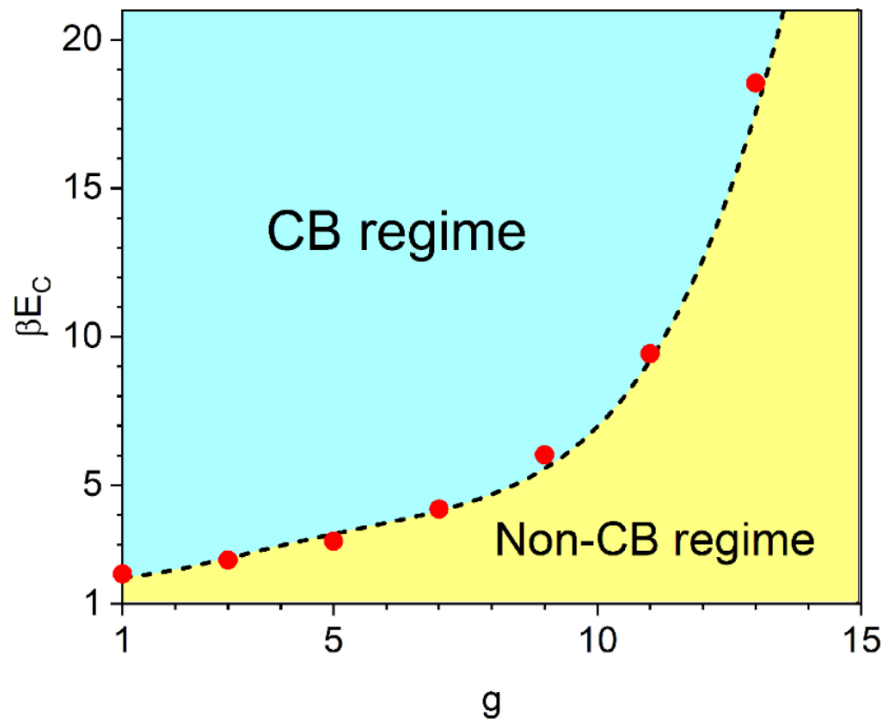
ในอุปกรณ์กล่องอิเล็กตรอนเดี่ยว (single electron box) ซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่ประกอบด้วยเกาะหนึ่งเกาะและมีรอยต่อการทะลุผ่านหนึ่งรอยต่อ ได้มีการศึกษาพลังงานการเพิ่มประจุยังผลอย่างกว้างขวาง [4-5] พบว่า พลังงานการเพิ่มประจุมีค่าลดลงแบบเอ็กซ์โปเนนเชียล เมื่ออุณหภูมิมีค่าเพิ่มสูงขึ้น นอกจากนี้เมื่อพิจารณาที่อุณหภูมิต่ำๆ ค่าพลังงานการเพิ่มประจุมีค่าลดลงแบบเอ็กซ์โปเนนเชียล เมื่อความนำไฟฟ้ามีค่าเพิ่มขึ้น แต่อย่างไรก็ตามกล่องอิเล็กตรอนเดี่ยวเป็นอุปกรณ์อิเล็กตรอนเดี่ยวในแบบง่ายที่สุด ที่อิเล็กตรอนสามารถเคลื่อนที่เข้าไปแต่ไม่สามารถออกจากระบบได้ จึงเกิดคำถามขึ้นมาว่าในกรณีที่อุปกรณ์มีความซับซ้อนเพิ่มสูงขึ้น การเปลี่ยนแปลงของพลังงานการเพิ่มประจุจะเป็นอย่างไร



ภาพประกอบที่ 1 แสดงโครงสร้าง (a) และวงจรสมมูล (b) ของทรานซิสเตอร์อิเล็กตรอนเดี่ยว [8]

ทรานซิสเตอร์อิเล็กตรอนเดี่ยว ดังภาพประกอบที่ 1 เป็นอุปกรณ์อิเล็กตรอนเดี่ยวพื้นฐาน ที่สามารถควบคุมให้อิเล็กตรอนผ่านระบบได้ทีละหนึ่งตัว ซึ่งประกอบด้วย รอยต่อการทะลุผ่านสองรอยต่อ โดยมีรอยต่อการทะลุผ่านคั่นอยู่ระหว่างซิวซอร์ส (source) กับเกาะโลหะ (island) รอยต่อการทะลุผ่านคั่นอยู่ระหว่างเกาะโลหะกับซิวเดรน (drain) โดยมีซิวเกต ทำหน้าที่ควบคุมจำนวนประจุในเกาะโลหะ เนื่องจากระบบมีรอยต่อการทะลุผ่านสองรอยต่อ ทำให้อิเล็กตรอนเคลื่อนที่ผ่านระบบออกไปได้ ในการศึกษาพลังงานการเพิ่มประจุยังผลของเงินและคณะ [6] พบว่าเมื่อค่าความนำไฟฟ้ามีค่าเพิ่มขึ้น พลังงานเพิ่มประจุยังผลจะมีค่าลดลง แต่งานวิจัยดังกล่าวศึกษาเฉพาะในกรณีที่ค่าความนำไฟฟ้ามีค่าน้อยๆ ( $g < 1$ ) ต่อมาปริวิต [7] ได้ศึกษาค่าความนำไฟฟ้าที่มีค่ามากขึ้น กล่าวคือ ความนำไฟฟ้าอยู่ในช่วง 1 ถึง 20 พบว่าพลังงานการเพิ่มประจุมีค่าลดลงแบบเอกโพเนนเชียล เมื่อค่าความนำไฟฟ้ามีค่าเพิ่มขึ้น ดังนั้นในงานวิจัยนี้ต้องการที่จะศึกษาค่าความจุไฟฟ้าเชิงอนุพันธ์ (Differential capacitance) ซึ่งปริมาณดังกล่าวจะเป็น

กรณีทั่วไป กล่าวคือ พิจารณาที่ค่าความต่างศักย์ที่ชั่วเกิดเป็นค่าใดๆ ซึ่งจะแตกต่างจากค่าพลังงานการเพิ่มประจุยังผล ที่พิจารณาเฉพาะที่ค่าความต่างศักย์ที่ชั่วเกิดมีค่าเป็นศูนย์ เมื่อได้ความสัมพันธ์ระหว่างความจุไฟฟ้าเชิงอนุพันธ์กับค่าความนำไฟฟ้าและค่าอนุกรมแล้ว จึงนำผลที่ได้ไปประยุกต์ใช้ในการคำนวณหาเส้นขอบเขตที่ใช้แบ่งระหว่างการเกิดหรือไม่เกิดปรากฏการณ์ขีดขวางแบบคูลอมบ์



ภาพประกอบที่ 2 แผนภาพการเกิดปรากฏการณ์ขีดขวางแบบคูลอมบ์ [8]

แผนภาพการเกิดปรากฏการณ์ขีดขวางแบบคูลอมบ์ที่คำนวณได้ในภาพประกอบที่ 2 นี้จะเป็นประโยชน์อย่างยิ่งยวดสำหรับ การศึกษา ออกแบบการใช้งานทรานซิสเตอร์อิเล็กทรอนิกส์เดี่ยว นอกจากนั้นยังเป็นแนวทางที่สำคัญในการศึกษาระบบเกาะควอนตัมที่มีความซับซ้อนยิ่งขึ้นไป

### เอกสารอ้างอิง

- [1] Katsuhiko Nishiguchi, Yukinori Ono, and Akira Fujiwara, “Operation of Silicon Single-electron Devices at Room Temperature”
- [2] D.B. Tuckerman, “Heat-Transfer Microstructures for Integrated Circuits,” Ph.D. Dissertation, Stanford University, 1984
- [3] P. Waver, J. Bruns, W. Seifert, H. Winnicke, D. Draunig, and H. G. Wagemann, in Proceedings of the 12th European Photovoltaic Solar Energy Conference, edited by R. Hill, W. Palz, and P. Helm (Stephen, Belford, 1994), p. 1489.
- [4] Walliser C, Limbach B, Stein P.V, Schafer R, Theis C, Goppert G, Grabert H. “Conductance of the single-electron transistor a comparison of experimental data with Monte Carlo calculations”. Physical Review B 2002; 66[12]: 125314.
- [5] Werner P, Troyer M. “Effective charging energy of the single-electron box” Journal of Statistical Mechanics: Theory and Experiment; 2005.
- [6] E. Bascones, C. P. Herrero, and F. Guinea, “Nonequilibrium effects in transport through quantum dots”, 2000
- [7] Paweena “Calculation coulomb blockade boundary line for the single electron transistor using average electron number”, 2020
- [8] P. Harata and W. Hongthong and P. Srivilai “Calculating the Coulomb blockade phase diagram in the strong coupling regime of a single-electron transistor: a quantum Monte Carlo study”. Journal of Statistical Mechanics: Theory and Experiment 2024; 3: 033106.

ผู้เรียบเรียง ผู้ช่วยศาสตราจารย์ประธาน ศรีวิไล

ที่อยู่ ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม

เบอร์โทรศัพท์ 043-754322 ต่อ 1140

Email: prathan.s@msu.ac.th