

ทรานซิสเตอร์อิเล็กทรอนิกส์เดี่ยวและการประยุกต์

สุธีร์ สัมพันธ์ภักย์* และ ศุภชัย ฤทธิเจริญวัตถุ

บทคัดย่อ

ปัจจุบันเทคโนโลยีสามารถสร้างอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ในระดับนาโนเมตร ทำให้พฤติกรรมของอุปกรณ์แตกต่างจากอุปกรณ์แบบดั้งเดิม ในอุปกรณ์ที่มีส่วนประกอบที่เรียกว่า “เกาะ” จะเชื่อมโยงกับภายนอกผ่านรอยต่อการทะลุผ่าน ลักษณะดังกล่าวทำให้เกิดความไม่ต่อเนื่องของระดับพลังงานอิเล็กทรอนิกส์ภายในเกาะ ซึ่งนำไปสู่ปรากฏการณ์การขัดขวางแบบคูลอมบ์ ปรากฏการณ์นี้สามารถใช้ควบคุมอิเล็กทรอนิกส์เดี่ยวในอุปกรณ์ต่างๆ เช่น กล่องอิเล็กทรอนิกส์เดี่ยว และทรานซิสเตอร์อิเล็กทรอนิกส์เดี่ยว

เพื่อให้เกิดปรากฏการณ์การขัดขวางแบบคูลอมบ์ โครงสร้างต้องประกอบด้วย รอยต่อการทะลุผ่าน รอยต่อตัวเก็บประจุ เกาะและขั้วไฟฟ้าที่เชื่อมโยงจากภายนอก โดยขั้วเกตทำหน้าที่ควบคุมระดับพลังงานของอิเล็กทรอนิกส์ภายในเกาะ อิเล็กตรอนเดี่ยวจะทะลุผ่านรอยต่อการทะลุผ่านเข้า/ออกจากเกาะตามแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วเกต แม้กล่องอิเล็กทรอนิกส์เดี่ยวเป็นอุปกรณ์ที่มีโครงสร้างพื้นฐานที่สุด แต่โครงสร้างนี้ไม่สามารถนำไปประยุกต์ใช้งานได้ ในขณะที่โครงสร้างอย่างง่ายของทรานซิสเตอร์อิเล็กทรอนิกส์เดี่ยวมีช่องทางให้อิเล็กตรอนผ่านได้ ทำให้โครงสร้างนี้สามารถใช้งานได้จริง ดังนั้น บทความนี้จะเน้นกลไกการทำงานและการประยุกต์ที่สำคัญของทรานซิสเตอร์อิเล็กทรอนิกส์เดี่ยว โดยอุปกรณ์ชนิดนี้ใช้พลังงานต่ำและมีความไวสูงต่อสนามไฟฟ้า ฉะนั้น ทรานซิสเตอร์อิเล็กทรอนิกส์เดี่ยวจึงสามารถประยุกต์ใช้งานในด้านต่างๆ ได้ เช่น ซุปเปอร์เซนซิทีฟอิเล็กทรอนิกส์และเกตทรานซิสเตอร์เดี่ยว อย่างไรก็ตาม อุปกรณ์นี้ยังต้องได้รับการวิจัยและพัฒนาเพิ่มเติมเพื่อให้สามารถผลิตในเชิงพาณิชย์ได้

คำสำคัญ: กล่องอิเล็กทรอนิกส์เดี่ยว ทรานซิสเตอร์อิเล็กทรอนิกส์เดี่ยว ปรากฏการณ์การขัดขวางแบบคูลอมบ์ มิเตอร์สนามไฟฟ้าความไวสูง เกตทรานซิสเตอร์เดี่ยว

Single-Electron Transistors and Applications

Sutee Sampan-a-pai* and Supachai Ritjareonwattu

ABSTRACT

The state-of-the-art technology can be used to fabricate nanoscale electronic devices. The nanoscale electronic device does not show the same behavior as a traditional electronic device, but exhibits the quantum phenomena. In the nanostructure, an isolated part, so-called “island”, is connected to an external electrode via a tunneling junction. With this nanostructure and connection, the discreteness of electron states leads to the coulomb blockade phenomenon. This quantum phenomenon can be used to control a single electron in various single-electron devices, such as single-electron boxes and single-electron transistors.

To produce the coulomb blockade effect, the structure of single-electron devices must be consisted of tunneling junctions, capacitive junctions, islands and electrodes which are connected to external leads. The voltage is applied to the gate electrode to control the increase or decrease of a single electron in the island. A single-electron box has the simplest structure among these devices. However, the structure of single-electron boxes is impractical for utilization. In contrary to the box, the simple structure of single-electron transistors does not trap the electron inside their island. With its passable structure, the transistor can be used in practice. This article therefore focuses on the mechanism of single-electron transistors, as well as their main applications. The single-electron transistor not only consumes low energy, but also has high sensitivity to the electric field. They are thus used in various applications, such as supersensitive electrometers and single-electron logic gates. However, some further research and development are needed to commercialize these single-electron devices.

Keywords: Single-electron box, Single-electron transistor, Coulomb blockade, Supersensitive electrometer, Single-electron logic gate

บทนำ

อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์จากอดีตถึงปัจจุบัน มีบทบาทสำคัญต่อการพัฒนาทั้งทางด้านวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยีและชีวิตความเป็นอยู่ของมนุษย์ จึงได้รับความสนใจอย่างกว้างขวางในการวิจัยเพื่อพัฒนาประสิทธิภาพตลอดจนความสามารถของอุปกรณ์ต่างๆ ให้เพิ่มขึ้น ซึ่งการพัฒนาในอดีตที่ผ่านมาจะเน้นการลดขนาดทางกายภาพเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพและความเร็วในการทำงานของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ อย่างไรก็ตาม ปัจจุบันแนวทางดังกล่าวถึงขีดจำกัดในการพัฒนา เนื่องจากอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ในปัจจุบันมีขนาดทางกายภาพในระดับนาโนเมตร ดังนั้น การลดขนาดจะส่งผลให้คุณสมบัติทางไฟฟ้าของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ดังกล่าวเปลี่ยนแปลงไปและแสดงพฤติกรรมทางไฟฟ้าที่เป็นผลจากปรากฏการณ์ทางควอนตัมในอดีต การประยุกต์ใช้ปรากฏการณ์ทางควอนตัมในวงจรรีเลย์ทรอนิกส์ประสบปัญหาและอุปสรรคหลายประการ เช่น ความแม่นยำในการสร้างอุปกรณ์ที่มีขนาดในระดับนาโนเมตร และความก้าวหน้าทางด้านวัสดุศาสตร์ที่มีจำกัด แต่ในปัจจุบันปัญหาเหล่านี้ได้รับการพัฒนาและแก้ไข จึงทำให้เทคโนโลยีในปัจจุบันมีศักยภาพและความพร้อมในการประยุกต์ใช้ปรากฏการณ์ทางควอนตัมต่างๆ ในงานทางด้านอิเล็กทรอนิกส์

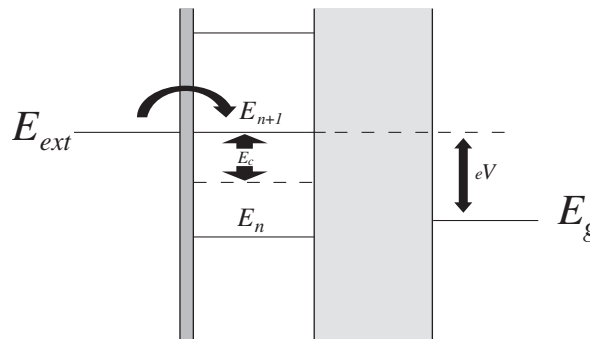
ช่วงต้นศตวรรษที่ 19 มิลลิแกน (Millikan) ได้ค้นพบลักษณะความไม่ต่อเนื่องของประจุ โดยการค้นพบดังกล่าว นับว่าเป็นจุดเริ่มต้นการศึกษาและวิจัยทางด้านการพัฒนาอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ แต่ความรู้และเทคนิคต่างๆ ทางด้านฟิสิกส์ยังไม่ประสบผลสำเร็จในการควบคุมอิเล็กตรอนทีละ 1 ตัว เนื่องจากโดยมากความรู้และเทคนิคเหล่านั้นละเลยการพิจารณาผลของปรากฏการณ์ทางควอนตัม แต่อย่างไรก็ตาม ในปัจจุบันหลักการทางควอนตัมได้ถูกนำมาใช้ศึกษาปรากฏการณ์ต่างๆ ในอุปกรณ์ที่มีขนาดในระดับนาโนเมตร ซึ่งจากความสำเร็จในการอธิบายและทำนายพฤติกรรมต่างๆ ของอิเล็กตรอนในอุปกรณ์ขนาดเล็ก ทำให้เกิดแนวคิดในการพัฒนาอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ให้สามารถควบคุมอิเล็กตรอนได้ที่ละ 1 ตัว โดยเรียกอุปกรณ์เหล่านี้ว่า อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์เดี่ยว (Single-electron devices) [1] ซึ่งอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์เดี่ยวที่สามารถนำมาประยุกต์ใช้งานได้ในปัจจุบัน ได้แก่ ทรานซิสเตอร์อิเล็กทรอนิกส์เดี่ยว (Single-electron transistors) [1, 2] เนื่องจากทรานซิสเตอร์อิเล็กทรอนิกส์เดี่ยวมีโครงสร้างไม่ซับซ้อน สามารถสร้างได้ง่าย แต่ในขณะเดียวกันอุปกรณ์ชนิดนี้มีคุณสมบัติโดดเด่นที่แตกต่างจากทรานซิสเตอร์แบบดั้งเดิม (Traditional transistor) ทำให้ทรานซิสเตอร์อิเล็กทรอนิกส์เดี่ยวสามารถนำไปใช้งานได้หลากหลาย เช่น เซนเซอร์ความไวสูง (Supersensitive sensors) [3-5] สิ่งประดิษฐ์เชิงตรรกะ (Logic devices) [6, 7] และควอนตัมคอมพิวเตอร์ (Quantum computers) [8]

บทความนี้เน้นอธิบายหลักการทำงานและการประยุกต์ใช้ทรานซิสเตอร์อิเล็กทรอนิกส์เดี่ยวชนิดโลหะ (Metallic single-electron transistors) โดยเริ่มจากพื้นฐานในการควบคุมอิเล็กตรอนทีละ 1 ตัว รวมถึงปรากฏการณ์ทางกายภาพที่เกิดขึ้นในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์เดี่ยว จากนั้น จะกล่าวถึงกล่องอิเล็กทรอนิกส์เดี่ยว (Single-electron boxes) ที่มีโครงสร้างอย่างง่ายที่สุด ตลอดจนแนวคิดในการประยุกต์กล่องอิเล็กทรอนิกส์เดี่ยวมาเป็นทรานซิสเตอร์อิเล็กทรอนิกส์เดี่ยว ตอนท้ายจะกล่าวถึงการประยุกต์ใช้ทรานซิสเตอร์อิเล็กทรอนิกส์เดี่ยวที่สำคัญใน 2 ลักษณะ ได้แก่ การประยุกต์ทรานซิสเตอร์อิเล็กทรอนิกส์เดี่ยวในการสร้างมิเตอร์สนามไฟฟ้าความไวสูง (Supersensitive electrometers) และการประยุกต์ทรานซิสเตอร์อิเล็กทรอนิกส์เดี่ยวในการสร้างเกตตรรกะอิเล็กทรอนิกส์เดี่ยว (Single-electron logic gates)

กล่องอิเล็กทรอนิกส์เดี่ยว

ในปัจจุบันอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์เดี่ยวมีหลายชนิดทั้งชนิดโลหะและสารกึ่งตัวนำ [1, 9] แต่อย่างไรก็ตามการศึกษาปรากฏการณ์ทางฟิสิกส์ที่เกิดขึ้นในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์เดี่ยว จำเป็นต้องเข้าใจหลักการพื้นฐานของสิ่งประดิษฐ์ที่มีโครงสร้างอย่างง่าย ได้แก่ กล่องอิเล็กทรอนิกส์เดี่ยว โดยอุปกรณ์นี้สามารถแสดงปรากฏการณ์ที่สำคัญในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์เดี่ยว เรียกว่า ปรากฏการณ์การขัดขวางแบบคูลอมบ์ (Coulomb blockade effect) [10] ซึ่งเป็นปรากฏการณ์ที่ทำให้อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์เดี่ยวสามารถควบคุมอิเล็กตรอนได้ที่ละ 1 ตัว กล่องอิเล็กทรอนิกส์เดี่ยวประกอบด้วยรอยต่อการทะลุผ่าน (Tunneling junction) 1 รอยต่อ [11] เป็นรอยต่อที่อิเล็กตรอนสามารถทะลุผ่านไปยังบริเวณที่กักเก็บอิเล็กตรอนได้ เรียกว่า เกาะ (Island) ถัดจากเกาะจะเป็นรอยต่อตัวเก็บประจุ (Capacitive junction) ซึ่งกันไม่ให้อิเล็กตรอนทะลุผ่านไปได้ นอกจากนี้ รอยต่อการทะลุผ่านจะคั่นอยู่ระหว่างขั้วไฟฟ้ากับเกาะและรอยต่อตัวเก็บประจุจะคั่นอยู่ระหว่างเกาะกับขั้วไฟฟ้าที่เรียกว่า ขั้วเกต (Gate electrode) โดยขั้วเกตทำหน้าที่เหนี่ยวนำประจุอิเล็กตรอนจากขั้วไฟฟ้าฝั่งตรงข้ามเข้ามายังเกาะ โครงสร้างลักษณะนี้จะมีทางเข้า/ออกของอิเล็กตรอนเพียง 1 ช่องทางผ่านรอยต่อการทะลุผ่านเท่านั้น จึงถูกเรียกว่า กล่องอิเล็กทรอนิกส์เดี่ยว

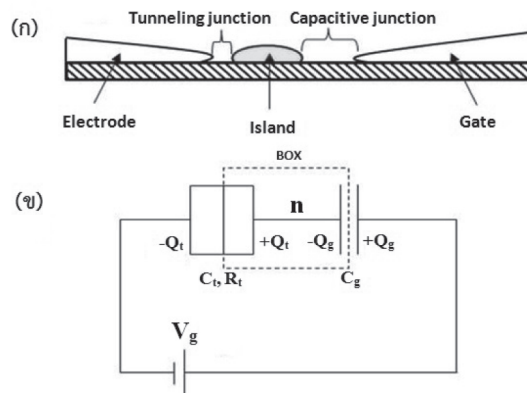
การควบคุมอิเล็กตรอนให้เข้ามาภายในเกาะ สามารถทำได้โดยจ่ายแรงดันไฟฟ้าเข้าที่ขั้วเกตของกล่องอิเล็กทรอนิกส์เดี่ยว ซึ่งได้อธิบายดังรูปที่ 1 จากรูปเมื่อให้แรงดันไฟฟ้าที่ขั้วเกต อิเล็กตรอนจะถูกเหนี่ยวนำให้ทะลุผ่านรอยต่อการทะลุผ่านเข้าไปยังเกาะ กล่าวคือ จำนวนอิเล็กตรอนในเกาะจะเพิ่มขึ้นจาก n เป็น $n + 1$ และจำนวนอิเล็กตรอนจะเพิ่มขึ้นอีกเป็น $n + 2$ เมื่อแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วเกตมีค่าเพิ่มขึ้น



รูปที่ 1 แผนภาพการควบคุมอิเล็กตรอนของกล่องอิเล็กทรอนิกส์เดี่ยวขณะที่จ่ายแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วเกต เมื่อ E_g คือ ระดับพลังงานของอิเล็กตรอนที่ขั้วเกต E_{ext} คือ ระดับพลังงานของอิเล็กตรอนที่อยู่ภายนอกเกาะ และ E_n, E_{n+1} คือ ระดับพลังงานของอิเล็กตรอนที่อยู่ภายในเกาะ

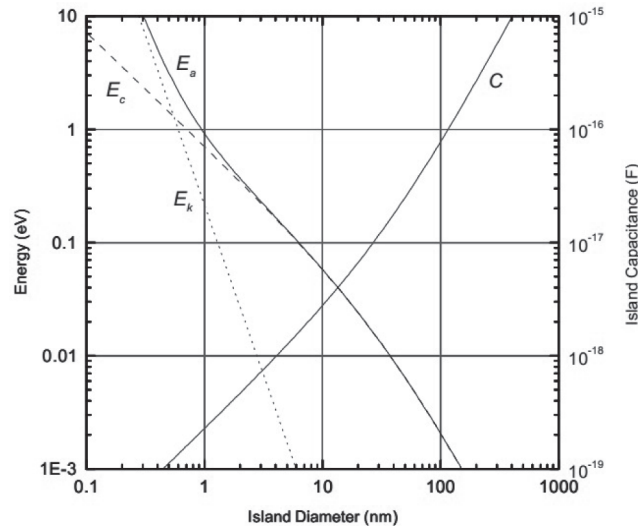
จากรูปที่ 1 การเพิ่มอิเล็กตรอนเข้าไปภายในเกาะต้องให้พลังงานค่าหนึ่งซึ่งเรียกว่า พลังงานการเพิ่มประจุ (Charging energy, E_C) [2] โดยเป็นพลังงานที่มีค่าน้อยที่สุดในการเพิ่มอิเล็กตรอน 1 ตัวเข้าไปในเกาะ โดยที่พลังงานการเพิ่มประจุสามารถอธิบายได้จากทฤษฎีแม่เหล็กไฟฟ้า ซึ่งเป็นไปตามสมการ $E_C = e^2/2C_\Sigma$ เมื่อ $C_\Sigma = C_t + C_g$ คือความจุรวมของกล่องอิเล็กตรอนเดี่ยว ในการเพิ่มอิเล็กตรอนเข้าไปในเกาะจะทำให้พลังงานรวมของระบบเกิดการเปลี่ยนแปลง โดยสามารถคำนวณการเปลี่ยนแปลงพลังงานรวมได้จากสมการ $\Delta E = E_C(n - C_g V_g/e)^2$ เมื่อ $n = (Q_t - Q_g)/(-e)$ [1] คือ จำนวนอิเล็กตรอนส่วนเกิน (Excess electrons) ภายในเกาะ การสร้างอุปกรณ์ให้มีลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าเหมือนกับแผนภาพในรูปที่ 1 จำเป็นต้องมีโครงสร้างตัวเก็บประจุสองโครงสร้างคือ รอยต่อขนาดเล็ก (รอยต่อการทะลุผ่าน, C_t) และรอยต่อขนาดใหญ่ (ตัวเก็บประจุ, C_g) มาต่ออนุกรมกันดังแสดงในรูปที่ 2 (ก) โดยภายในโครงสร้างของกล่องอิเล็กตรอนเดี่ยวลักษณะนี้ เกาะจะถูกแยกออกจากขั้วไฟฟ้าด้วยรอยต่อทั้งสอง ซึ่งองค์ประกอบทั้งหมดถูกวางอยู่บนแผ่นฉนวนเพื่อไม่ให้เกิดการรั่วของอิเล็กตรอนจากเกาะไปยังขั้วไฟฟ้า

จากลักษณะทางกายภาพ ทำให้โครงสร้างของรอยต่อ C_t และ C_g มีสมบัติเป็นตัวเก็บประจุ ซึ่งโครงสร้างดังกล่าวของกล่องอิเล็กตรอนเดี่ยวในรูปที่ 2 (ก) สามารถเขียนวงจรสมมูลได้ดังรูปที่ 2 (ข) แต่อย่างไรก็ตาม รอยต่อการทะลุผ่าน C_t จะเป็นตัวเก็บประจุที่อิเล็กตรอนสามารถทะลุผ่านได้ ในขณะที่รอยต่อ C_g เป็นรอยต่อที่มีความกว้างเพียงพอที่จะกั้นไม่ให้อิเล็กตรอนสามารถทะลุผ่านได้ ดังนั้น เมื่อเกาะถูกวางอยู่ตรงกลางระหว่างรอยต่อ C_t และ C_g จึงทำให้สามารถเก็บอิเล็กตรอนไว้ภายในเกาะได้ ซึ่งอิเล็กตรอนจะสามารถทะลุผ่านเข้ามาที่เกาะได้โดยผ่านรอยต่อ C_t แต่จะไม่สามารถออกจากเกาะได้ ในการเพิ่มหรือลดจำนวนอิเล็กตรอนภายในเกาะ จะสามารถทำได้โดยการให้พลังงานศักย์ผ่านการเชื่อมโยง (Coupling) จากภายนอกเกาะด้วยสนามไฟฟ้าที่เกิดจากแรงดันไฟฟ้า V_g ดังในรูปที่ 2 (ข) การเพิ่มหรือลดอิเล็กตรอนตัวแรกภายในเกาะทำได้โดยการเพิ่มหรือลดแรงดันไฟฟ้า V_g ด้วยขนาด $\Delta V_g = e/2C_g$ ในขณะที่การเพิ่มหรือลดอิเล็กตรอนตัวต่อไปต้องเพิ่มหรือลดแรงดันไฟฟ้าด้วยขนาด $\Delta V_g = e/C_g$



รูปที่ 2 (ก) โครงสร้างของกล่องอิเล็กตรอนเดี่ยวประกอบด้วยรอยต่อการทะลุผ่าน รอยต่อตัวเก็บประจุ เกาะและขั้วไฟฟ้า (ข) วงจรสมมูลของกล่องอิเล็กตรอนเดี่ยว

โดยปกติ ปัจจัยหลักในการควบคุมอิเล็กตรอนภายในเกาะของกล่องอิเล็กตรอนเดี่ยว คือ สนามไฟฟ้าจากภายนอก ซึ่งจะควบคุมพลังงานศักย์ของอิเล็กตรอนภายในระบบ แต่อย่างไรก็ตาม ในบางสภาวะ พลังงานจลน์ของอิเล็กตรอนจะมีอิทธิพลต่อการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอน ทำให้ในสภาวะดังกล่าว การพิจารณาพลังงานศักย์ของอิเล็กตรอนเพียงอย่างเดียวไม่สามารถอธิบายพฤติกรรมเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนในกล่องอิเล็กตรอนเดี่ยวได้อย่างถูกต้อง ดังนั้น จึงต้องพิจารณาพลังงานรวมของอิเล็กตรอน ซึ่งเป็นผลรวมของพลังงานจลน์ (E_k) และพลังงานการเพิ่มประจุ (E_C) ซึ่งเป็นพลังงานศักย์ที่ถูกควบคุมโดยแรงดันไฟฟ้าที่ให้จากขั้วเกต ($E_C \propto V_g$) ในขณะที่พลังงานจลน์ของอิเล็กตรอนแปรผันตรงกับอุณหภูมิ ($E_k \propto k_B T$) แต่แปรผกผันกับขนาดของเกาะ d ดังเส้นจุดในรูปที่ 3 ($E_k \propto d^{-1}$) สภาวะที่พลังงานจลน์มีอิทธิพลต่อพฤติกรรมของกล่องอิเล็กตรอนเดี่ยว แบ่งได้ 2 กรณีคือ



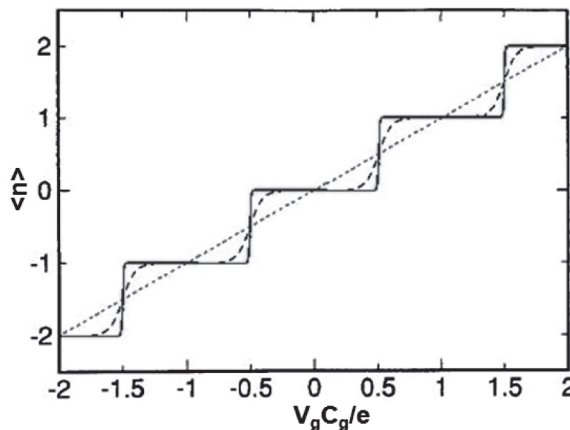
รูปที่ 3 การเปรียบเทียบพลังงานการเพิ่มอิเล็กตรอนเข้าไปในเกาะที่มีขนาดต่างๆ เมื่อพลังงานการเพิ่มประจุถูกแทนด้วย E_C (เส้นประ) พลังงานจลน์ของอิเล็กตรอนในเกาะแทนด้วย E_k (เส้นจุด) ดังนั้น พลังงานรวมสุทธิของอิเล็กตรอนที่ถูกเพิ่มเข้าไปในระบบ (เส้นทึบ) $E_a = E_C + E_k$ [1]

1. กรณีที่ระบบมีอุณหภูมิต่ำ ในสภาวะนี้พลังงานความร้อนจะทำให้พลังงานจลน์ของอิเล็กตรอนมีค่ามากกว่าพลังงานการเพิ่มประจุ ($E_k = k_B T > E_C$) ในกรณีนี้แรงดันไฟฟ้าภายนอกจะไม่สามารถควบคุมการเพิ่ม/ลดจำนวนอิเล็กตรอนภายในเกาะได้ เนื่องจากพลังงานรวมของอิเล็กตรอนจะมีค่ามากกว่าพลังงานการเพิ่มประจุ ทำให้อิเล็กตรอนมีพลังงานมากพอที่จะเคลื่อนที่เข้า/ออกจากเกาะได้อย่างอิสระ ในสภาวะนี้จึงไม่สามารถสังเกตพบปรากฏการณ์การขัดขวางแบบคูลอมบ์ได้ [11] ลักษณะกราฟอิเล็กตรอนเฉลี่ย $\langle n \rangle$ มีลักษณะเป็นกราฟที่ต่อเนื่องเหมือนตัวต้านทานแบบปกติ (common resistors) แต่ในสภาวะที่ระบบมีอุณหภูมิต่ำ พลังงานจลน์จะมีค่าน้อย พลังงานความร้อนที่เกิดขึ้นจึงไม่เพียงพอที่จะทำให้พลังงานรวมของอิเล็กตรอนมีค่ามากกว่าพลังงานการเพิ่มประจุ พฤติกรรมของกล่องอิเล็กตรอนเดี่ยวจึงสามารถถูกควบคุมด้วยแรงดันไฟฟ้าภายนอก โดยการเพิ่ม/ลดแรงดันไฟฟ้าง่ายๆ จะทำให้ค่าประจุไฟฟ้าของ

เกาะเพิ่ม / ลดเป็นจำนวนเท่าของอิเล็กตรอน ปรากฏการณ์การขัดขวางแบบคูลอมบ์ที่เกิดขึ้นในสภาวะเช่นนี้ ทำให้กราฟอิเล็กตรอนเฉลี่ยจะมีลักษณะเป็นขั้นบันได (ไม่ต่อเนื่อง)

รูปที่ 4 เป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วเกตกับค่าเฉลี่ยของจำนวนอิเล็กตรอนส่วนเกินในเกาะ โดยเส้นทึบซึ่งเป็นกราฟที่อุณหภูมิภายในระบบต่ำ ดังนั้น เมื่อต้องการให้อิเล็กตรอนเข้าไปที่เกาะจะต้องให้พลังงานกับอิเล็กตรอนอย่างน้อยเท่ากับพลังงานการเพิ่มประจุ อิเล็กตรอนจึงจะสามารถทะลุผ่านรอยต่อการทะลุผ่านเข้าไปยังเกาะได้ แต่อย่างไรก็ตาม เมื่ออิเล็กตรอนตัวที่ 1 เข้าไปในเกาะ อิเล็กตรอนตัวที่ 2 จะไม่สามารถเข้าไปในเกาะได้ เนื่องจากอิเล็กตรอนที่เข้าไปในเกาะจะมีอันตรกิริยาทางไฟฟ้ากับอิเล็กตรอนที่อยู่ภายนอกเกาะ ทำให้เกิดการขัดขวางอิเล็กตรอนที่อยู่ภายนอกเนื่องจากแรงคูลอมบ์ (Coulomb force) [12] ในสภาวะที่แรงดันไฟฟ้าที่ขั้วเกตเป็นบวกจะทำให้ระดับพลังงานของอิเล็กตรอนภายในเกาะลดลง อิเล็กตรอนจากภายนอกจึงสามารถทะลุผ่านเข้ามาภายในเกาะทำให้จำนวนอิเล็กตรอนส่วนเกินเป็นบวก ในขณะที่เมื่อแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วเกตเป็นลบจะทำให้ระดับพลังงานของอิเล็กตรอนในเกาะเพิ่มขึ้น อิเล็กตรอนภายในเกาะจึงทะลุผ่านรอยต่อการทะลุผ่านออกไปนอกเกาะทำให้จำนวนอิเล็กตรอนส่วนเกินภายในเกาะเป็นลบ

กรณีเส้นประเป็นกรณีที่ระบบมีอุณหภูมิเพิ่มขึ้น ทำให้พลังงานจลน์ของอิเล็กตรอนเกิดการกวัดแกว่งเพิ่มขึ้นจากการกวัดแกว่งทางความร้อน (Thermal fluctuation) ดังนั้น พลังงานรวมของอิเล็กตรอนภายในระบบจึงมีความแปรปรวนสูง ทำให้ได้กราฟที่มีลักษณะเป็นขั้นบันไดที่ไม่คมเหมือนกราฟที่สภาวะอุณหภูมิต่ำ หากอุณหภูมิของระบบเพิ่มขึ้นจนกระทั่งพลังงานจลน์ของอิเล็กตรอนมีค่ามากกว่าพลังงานการเพิ่มประจุ จะทำให้กราฟมีลักษณะเป็นเส้นตรง



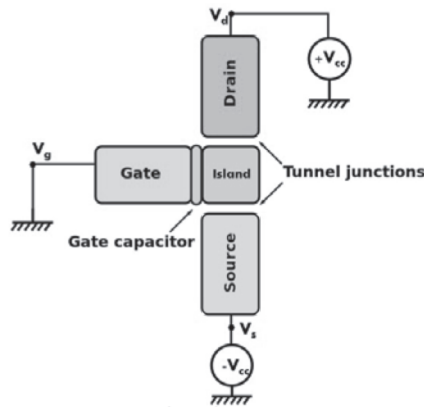
รูปที่ 4 ความสัมพันธ์แบบขั้นบันไดของแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วเกต $V_g = Q/C_g$ กับจำนวนอิเล็กตรอนเฉลี่ยของกล่องอิเล็กตรอนเดี่ยว เมื่อ (เส้นจุด) $T = 27.5$ K, (เส้นประ) $T = 2.75$ K และ (เส้นทึบ) $T = 2.75$ K [5]

2. กรณีที่เกาะมีขนาดเล็ก ประกอบกับกล่องอิเล็กตรอนเดี่ยวทำงานในย่านอุณหภูมิต่ำ ทำให้ระยะเฉลี่ยเสรีปลดการชน (Mean free path, λ) มีค่ามาก ดังนั้น เมื่อเกาะมีขนาดในระดับเดียวกับระยะดังกล่าว อิเล็กตรอนบางส่วนจะสามารถเคลื่อนที่ไปยังรอยต่อการทะลุผ่านได้โดยปราศจากการชน อย่างไรก็ตาม อิเล็กตรอนจะได้รับพลังงานความร้อนเป็นไปตามฟังก์ชันการกระจายตัวของแมกเวล (Maxwell distribution function) [13] โดยอิเล็กตรอนจะได้รับพลังงานในช่วง 0 eV ถึง อนันต์ ภายใต้สภาวะที่อิเล็กตรอนสามารถเคลื่อนที่ไปยังรอยต่อการทะลุผ่านได้โดยปราศจากการชน จึงทำให้ไม่เกิดการแลกเปลี่ยนพลังงานระหว่างการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนภายในเกาะ อิเล็กตรอนแต่ละตัวจึงครอบครองพลังงานจลน์ที่แตกต่างกัน ในสภาวะนี้ อิเล็กตรอนภายในเกาะจึงมีพลังงานจลน์ไม่ต่อเนื่อง [14] โดยฟังก์ชันการกระจายตัวของแมกเวลแสดงให้เห็นว่า อิเล็กตรอนบางส่วนจะมีค่าพลังงานจลน์สูงกว่าค่าพลังงานการเพิ่มประจุ ($k_B T \gg E_C$) (แม้ว่าค่าพลังงานความร้อนเฉลี่ยจะมีค่าต่ำกว่าค่าพลังงานการเพิ่มประจุมาก) ดังนั้น เมื่ออิเล็กตรอนที่มีพลังงานสูงเหล่านี้เคลื่อนที่ถึงรอยต่อการทะลุผ่าน จะสามารถทะลุผ่านรอยต่อดังกล่าวออกจากเกาะไปได้โดยไม่ต้องอาศัยพลังงานจากแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าภายนอก ในสภาวะนี้ อิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่เข้า/ออกจากเกาะแบบสุ่ม จึงทำให้ไม่สามารถควบคุมให้อิเล็กตรอนเคลื่อนที่เข้า/ออกจากเกาะได้ กล่องอิเล็กตรอนเดี่ยวจึงสูญเสียความสามารถในการควบคุมอิเล็กตรอนทีละ 1 ตัว

ในกรณีที่เกาะมีขนาดใหญ่ อิเล็กตรอนภายในเกาะจะเกิดการชนแบบยืดหยุ่น (Elastic collision) [15] หลายครั้งในระหว่างการเคลื่อนที่ไปยังรอยต่อการทะลุผ่าน อิเล็กตรอนในสภาวะนี้จึงเกิดการแลกเปลี่ยนพลังงานในระหว่างการเคลื่อนที่และทำให้มีค่าพลังงานจลน์แบบต่อเนื่องเท่ากับค่าเฉลี่ยของพลังงานความร้อนเฉลี่ย ($k_B T$) ดังนั้น อิเล็กตรอนที่ไปถึงรอยต่อการทะลุผ่านจึงมีค่าพลังงานรวมไม่เพียงพอที่จะทะลุผ่านรอยต่อ ในการเคลื่อนที่เข้า/ออกจากเกาะของอิเล็กตรอนจึงจำเป็นต้องได้รับพลังงานจากแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าภายนอก ในสภาวะนี้ จึงสามารถควบคุมอิเล็กตรอนให้เคลื่อนที่ได้ทีละ 1 ตัว จากกราฟในรูปที่ 3 ขนาดของเกาะที่เล็กที่สุดที่ทำให้พลังงานจลน์ของอิเล็กตรอนไม่ส่งผลต่อปรากฏการณ์ขีดขวางแบบคูลอมบ์มีขนาดประมาณ 10 nm

ทรานซิสเตอร์อิเล็กตรอนเดี่ยว

จากโครงสร้างของกล่องอิเล็กตรอนเดี่ยวในหัวข้อที่ผ่านมา แสดงให้เห็นถึงความเป็นไปได้ในการควบคุมการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนทีละ 1 ตัว แต่อย่างไรก็ตาม โครงสร้างดังกล่าวยังมีข้อจำกัดในการนำเอาอิเล็กตรอนที่เก็บไว้ภายในกล่องอิเล็กตรอนเดี่ยวไปใช้งานจริง เนื่องจากใช้รอยต่อการทะลุผ่านเพียงรอยต่อเดียวเป็นทางเข้าและทางออกของอิเล็กตรอน ดังนั้น จึงเกิดแนวคิดที่จะปรับโครงสร้างทางกายภาพของกล่องอิเล็กตรอนเดี่ยวให้สามารถควบคุมการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนให้ผ่านเกาะทีละ 1 ตัว ซึ่งสามารถทำได้โดยการเพิ่มรอยต่อการทะลุผ่านอีก 1 รอยต่อ ทำให้ได้โครงสร้างของเกาะที่มีทางเข้าและทางออกของอิเล็กตรอนแยกจากกันดังรูปที่ 5 โครงสร้างที่ได้ประกอบด้วยเกาะ 1 เกาะ ที่ถูกเชื่อมโยงกับภายนอกผ่านทางซอร์ส (Source) ซัวร์ (Drain) และซัวร์เกต โดยรอยต่อระหว่างเกาะกับซอร์สและซัวร์เป็นรอยต่อการทะลุผ่าน ในขณะที่รอยต่อระหว่างเกาะกับซัวร์เกตเป็นรอยต่อตัวเก็บประจุ ซึ่งมีกำแพงศักย์สูงและหนาพอที่จะกักอิเล็กตรอนไม่ให้รั่วผ่านซัวร์เกตออกจากเกาะ อุปกรณ์อิเล็กตรอนเดี่ยวที่มีโครงสร้างลักษณะนี้ เรียกว่า ทรานซิสเตอร์อิเล็กตรอนเดี่ยว [16]



รูปที่ 5 ตัวอย่างวงจรของทรานซิสเตอร์อิเล็กตรอนเดี่ยวที่ประกอบด้วยรอยต่อการทะลุผ่าน 2 รอยต่อ รอยต่อตัวเก็บประจุ เกต ั้วซอร์ส ั้วเดรนและั้วเกต

รอยต่อการทะลุผ่านทั้ง 2 รอยต่อ ภายในโครงสร้างทรานซิสเตอร์อิเล็กตรอนเดี่ยวไม่สามารถกักอิเล็กตรอนที่จะทะลุผ่านได้ ดังนั้น ในการควบคุมให้อิเล็กตรอนไหลผ่านเกตที่ละ 1 ตัว จึงต้องอาศัยการใส่แรงดันไฟฟ้าจากภายนอกเข้าที่ั้วเกต ั้วเดรนและั้วซอร์ส จากนั้นในการควบคุมการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนให้ผ่านจากั้วซอร์สไปยังเกต และออกจากเกตไปยังั้วเดรนที่ละ 1 ตัว จำเป็นต้องใส่แรงดันไฟฟ้าที่ั้วเกตและั้วเดรนให้มีขนาดและจังหวะที่เหมาะสม เพื่อให้เกิดปรากฏการณ์การขัดขวางแบบคูลอมบ์ขึ้นภายในเกตซึ่งจะทำให้สามารถควบคุมการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนผ่านเกตได้ทีละ 1 ตัว โดยลักษณะการเคลื่อนที่ที่เกิดขึ้น อิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่ออกจากั้วซอร์สไปยังเกต ในขณะที่ั้วเดรนจะทำหน้าที่รับอิเล็กตรอนจากเกต และใช้การเชื่อมโยงด้วยสนามไฟฟ้าจากั้วเกตในการควบคุมจังหวะการไหลของอิเล็กตรอน ทำให้อุปกรณ์ที่ได้มีลักษณะการทำงานคล้ายกับทรานซิสเตอร์แบบดั้งเดิมที่ใช้สนามไฟฟ้าในการควบคุมการไหลของอิเล็กตรอนจากั้วซอร์สไปยังั้วเดรน อย่างไรก็ตาม ข้อแตกต่างสำคัญ คือ ทรานซิสเตอร์อิเล็กตรอนเดี่ยวสามารถควบคุมอิเล็กตรอนได้ทีละ 1 ตัว ทำให้ทรานซิสเตอร์อิเล็กตรอนเดี่ยวใช้พลังงานต่ำกว่าทรานซิสเตอร์แบบดั้งเดิมมาก นอกจากนี้ ความสามารถในการควบคุมอิเล็กตรอนทีละ 1 ตัว ทำให้ทรานซิสเตอร์อิเล็กตรอนเดี่ยวมีความไวในการตอบสนองต่อปริมาณทางกายภาพต่างๆ สูงกว่าทรานซิสเตอร์แบบดั้งเดิมมาก

ทรานซิสเตอร์อิเล็กตรอนเดี่ยวโดยทั่วไปกำหนดการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนให้เคลื่อนที่จากั้วซอร์สไปยังั้วเดรน โดยการใส่แรงดันไฟฟ้าที่ั้วไฟฟ้าทั้ง 3 ั้ว คือ ั้วเกต ั้วซอร์สและั้วเดรน ทำให้อิเล็กตรอนที่ส่วนต่างๆ ของทรานซิสเตอร์อิเล็กตรอนเดี่ยวมีระดับพลังงานแตกต่างกัน จากโครงสร้างดังกล่าวไว้ข้างต้นในรูปที่ 5 รอยต่อที่ั้วเกตเป็นรอยต่อที่มีความกว้างที่อิเล็กตรอนไม่สามารถทะลุผ่านได้ แต่ระดับพลังงานของอิเล็กตรอนภายในเกตสามารถถูกปรับค่าได้โดยการเชื่อมโยงด้วยสนามไฟฟ้าจากั้วเกต ดังนั้น ั้วเกตจึงทำหน้าที่เสมือนเป็นประตูเปิด / ปิดให้อิเล็กตรอนไหลผ่านเกตจากั้วซอร์สไปยังั้วเดรนได้ โดยการจ่ายแรงดันไฟฟ้าที่ั้วต่างๆ ดังรูปที่ 5 จะทำให้ศักย์ไฟฟ้าที่ั้วเดรนเป็นศักย์บวกและศักย์ไฟฟ้าที่ั้วซอร์สเป็นศักย์ลบเมื่อเทียบกับศักย์ไฟฟ้าอ้างอิง (Ground) ที่ั้วเกต เมื่อวัดลักษณะสมบัติจะได้แผนภาพที่แสดงการควบคุมอิเล็กตรอนดังรูปที่ 6 ซึ่งเป็นกราฟลักษณะสมบัติของทรานซิสเตอร์อิเล็กตรอน

เดี่ยวที่อุณหภูมิต่ำ ($k_B T = 0.1 E_C$) และเกาะมีขนาดใหญ่เพียงพอที่จะละลายผลของความไม่ต่อเนื่องของพลังงานจลน์ ดังนั้น พลังงานรวมของอิเล็กตรอนจึงประมาณเท่ากับค่าพลังงานการเพิ่มประจุ จากกราฟลักษณะสมบัติในรูปที่ 6 สามารถแบ่งการทำงานของทรานซิสเตอร์อิเล็กตรอนเดี่ยวออกเป็น 4 ช่วงการทำงาน [16] คือ

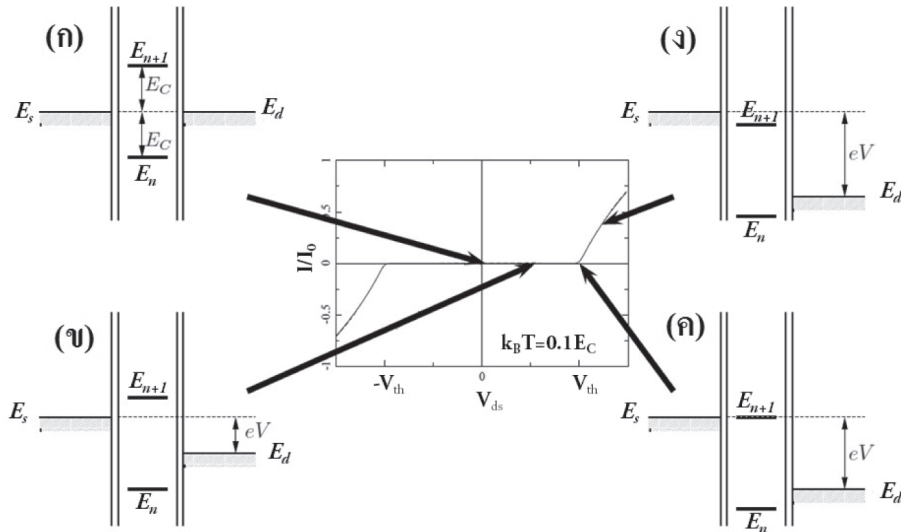
1. ในสถานะที่แรงดันไฟฟ้าทั้ง 3 ขั้ว มีค่าเท่ากัน ($V_s = V_d = V_g = 0$) แม้ว่ารอยต่อการทะลุผ่านทั้ง 2 รอยต่อระหว่างขั้วซอร์สและขั้วเดรนจะไม่สามารถหยุดการไหลของอิเล็กตรอนได้ แต่ในโครงสร้างที่มีเกาะคั่นกลางระหว่างขั้วทั้งสองจะทำให้อิเล็กตรอนไม่สามารถทะลุผ่านรอยต่อได้ เนื่องจากขั้วทั้งสองมีระยะห่างมาก ทำให้อิเล็กตรอนไม่สามารถทะลุผ่านจากขั้วซอร์สไปยังขั้วเดรนได้โดยตรง จึงจำเป็นต้องเกิดการทะลุผ่านจากขั้วซอร์สไปยังเกาะและจากเกาะไปยังขั้วเดรน แต่อย่างไรก็ตาม ในสถานะนี้ไม่มีระดับพลังงานว่างภายในเกาะที่อิเล็กตรอนจากภายนอกจะสามารถครอบครองได้ เพราะระดับพลังงานว่าง E_{n+1} ที่มีภายในเกาะมีพลังงานสูงกว่าอิเล็กตรอนที่อยู่นอกเกาะประมาณ E_C ดังนั้น อิเล็กตรอนภายนอกเกาะจึงมีพลังงานไม่เพียงพอที่จะทะลุผ่านรอยต่อไปยังเกาะได้ ทำให้ไม่เกิดกระแสไหลในระบบ ดังรูปที่ 6 (ก)

2. ในสถานะที่แรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมขั้วเดรนและขั้วซอร์สเพิ่มขึ้นแต่น้อยกว่าแรงดันไฟฟ้าขีดเริ่ม (Threshold voltage) ($0 < V_{ds} < V_{th}$) ซึ่งแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมขั้วเกตและขั้วซอร์ส (V_{gs}) จะเพิ่มขึ้น ทำให้ระดับพลังงานของอิเล็กตรอนที่ขั้วซอร์สเพิ่มขึ้น แต่พลังงานของอิเล็กตรอนภายในเกาะและที่ขั้วเดรนลดลง แต่อิเล็กตรอนที่ขั้วซอร์สมีพลังงานรวมน้อยกว่าระดับพลังงานว่างภายในเกาะ ($E < E_{n+1}$) เนื่องจากพลังงานที่ให้อิเล็กตรอนที่ขั้วซอร์สน้อยกว่าพลังงานที่ต้องใช้ในการเพิ่มประจุ (E_C) อิเล็กตรอนที่ขั้วซอร์สจึงมีพลังงานรวมไม่เพียงพอที่จะทะลุผ่านไปยังเกาะได้ดังแผนภาพในรูปที่ 6 (ข) ซึ่งในช่วงการทำงานนี้กระแสจะไม่สามารถไหลผ่านทรานซิสเตอร์อิเล็กตรอนเดี่ยวได้ ($I/I_0 = 0$) เมื่อค่า I_0 คือกระแสของอิเล็กตรอน 1 ตัวที่ไหลผ่านรอยต่อการทะลุผ่านมีค่าเท่ากับ $e/R_T C_T$ [17]

3. ในสถานะที่แรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมขั้วเดรนและขั้วซอร์สเท่ากับแรงดันไฟฟ้าขีดเริ่ม ($V_{ds} = V_{th}$) จะทำให้ $V_{gs} = e/2C_\Sigma$ พลังงานของอิเล็กตรอนที่ขั้วซอร์สจึงมีพลังงานเท่ากับระดับพลังงานว่างของเกาะ ($E_s = E_{n+1}$) ดังรูปที่ 6 (ค) ในสถานะนี้ อิเล็กตรอนที่ขั้วซอร์สจะสามารถทะลุผ่านรอยต่อไปครอบครองระดับพลังงานว่างของเกาะได้ การจ่ายแรงดันไฟฟ้าลักษณะนี้จะทำให้ระดับพลังงานของอิเล็กตรอนที่ขั้วเดรนต่ำกว่าที่ขั้วซอร์สและเกาะ อย่างไรก็ตาม อิเล็กตรอนจากเกาะจะยังไม่สามารถทะลุมาขั้วเดรนได้ เนื่องจากเมื่ออิเล็กตรอนเข้าไปยังเกาะ ทำให้อิเล็กตรอนในระดับพลังงาน E_{n+1} จะมีพลังงานเพิ่มขึ้น ในขณะที่ระดับพลังงานที่ขั้วซอร์สคงที่ อิเล็กตรอนดังกล่าวจึงไม่สามารถเคลื่อนที่ผ่านไปยังรอยต่อการทะลุผ่านระหว่างเกาะกับขั้วเดรนได้ แต่จะทะลุกลับไปมาระหว่างขั้วซอร์สกับเกาะ ดังนั้น การจ่ายแรงดันไฟฟ้าในลักษณะนี้จะทำให้กระแสไฟฟ้าเฉลี่ยของอิเล็กตรอนที่ไหลผ่านทรานซิสเตอร์อิเล็กตรอนเดี่ยวเป็นศูนย์

4. ในสถานะที่ แรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมขั้วเดรนและขั้วซอร์สมากกว่าแรงดันไฟฟ้าขีดเริ่ม ($V_{ds} > V_{th}$) จะทำให้ $V_{gs} > e/2C_\Sigma$ อิเล็กตรอนที่ขั้วซอร์สจึงมีพลังงานมากกว่าระดับพลังงานว่างภายในเกาะ ($E_s > E_{n+1}$) ส่งผลให้อิเล็กตรอนสามารถทะลุผ่านรอยต่อจากขั้วซอร์สไปยังเกาะและจากเกาะทะลุไปยังขั้วเดรนได้ ทำให้เกิดกระแสไหลผ่านทรานซิสเตอร์อิเล็กตรอนเดี่ยวได้ ($I/I_0 \neq 0$) ซึ่งกระแสที่เกิดขึ้นเป็นผลจากปรากฏการณ์การทะลุผ่าน ประกอบกับภายในเกาะมีระดับพลังงานว่างที่สามารถให้อิเล็กตรอนจากภายนอกเข้าไปครอบครองได้เพียง 1 ตัวเท่านั้น ทำให้การไหลของกระแสในทรานซิสเตอร์อิเล็กตรอนเดี่ยวนี้นี้เป็นกระแสของ

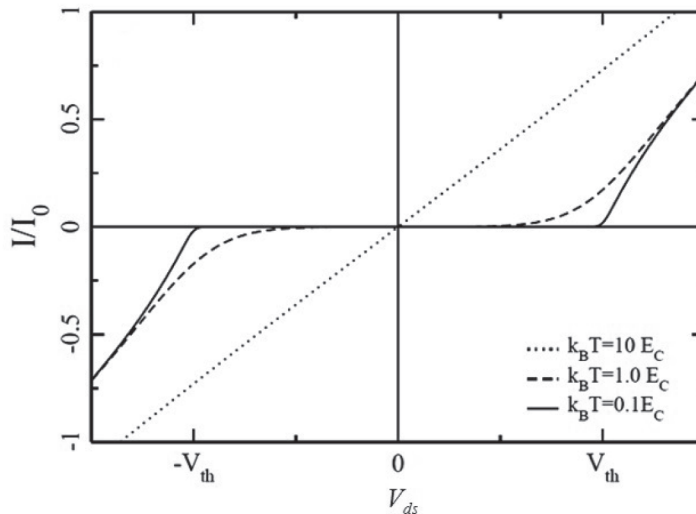
อิเล็กตรอนเพียง 1 ตัว เมื่ออิเล็กตรอนตัวที่ 1 เข้าไปในเกาะ อิเล็กตรอนตัวที่ 2 จะยังไม่สามารถเข้าไปภายในเกาะได้จนกว่าอิเล็กตรอนตัวที่ 1 จะทะลุผ่านไปยังขั้วเดรน อิเล็กตรอนตัวที่ 2 จึงจะสามารถเข้าไปภายในเกาะได้ ซึ่งเป็นผลจากปรากฏการณ์การขัดขวางแบบคูลอมบ์ ลักษณะการทำงานดังกล่าวทำให้ทรานซิสเตอร์อิเล็กตรอนเดี่ยวสามารถควบคุมการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนภายในระบบได้ที่ละ 1 ตัว ดังรูปที่ 6 (ง)



รูปที่ 6 แผนภาพการควบคุมอิเล็กตรอนของทรานซิสเตอร์อิเล็กตรอนเดี่ยวเมื่อมีการปรับค่าแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมระหว่างขั้วซอร์สและขั้วเดรน (ก) สภาวะที่ไม่มีกระแสแรงดันไฟฟ้า ($V_s = V_d = V_g = 0$) (ข) สภาวะที่จ่ายแรงดันไฟฟ้าน้อยกว่าแรงดันไฟฟ้าขีดเริ่ม ($0 < V_{ds} < V_{ts}$) (ค) สภาวะที่จ่ายแรงดันไฟฟ้าที่เท่ากับแรงดันไฟฟ้าขีดเริ่ม ($V_{ds} = V_{th}$) (ง) สภาวะที่จ่ายแรงดันไฟฟ้ามากกว่าแรงดันไฟฟ้าขีดเริ่ม ($V_{ds} > V_{th}$) ซึ่งทำให้เกิดกระแสไหลผ่านทรานซิสเตอร์อิเล็กตรอนเดี่ยว [16]

จากหลักการทำงานของทรานซิสเตอร์อิเล็กตรอนเดี่ยวที่ได้กล่าวมา แสดงให้เห็นถึงการประยุกต์ใช้ปรากฏการณ์การขัดขวางแบบคูลอมบ์ในการควบคุมการไหลของอิเล็กตรอนที่ละ 1 ตัว ภายในทรานซิสเตอร์อิเล็กตรอนเดี่ยว กระแสที่วัดได้จากทรานซิสเตอร์อิเล็กตรอนเดี่ยวจึงแตกต่างจากกระแสที่ไหลผ่านทรานซิสเตอร์แบบดั้งเดิม และไม่เป็นไปตามกฎของโอห์ม (Ohm's law) กล่าวคือ กระแสที่เกิดขึ้นมีลักษณะเป็นขั้นบันไดที่ไม่ต่อเนื่อง แต่อย่างไรก็ตามปรากฏการณ์การขัดขวางแบบคูลอมบ์จะถูกทำลายลงด้วยผลจากการกวดแกว่งทางความร้อน กล่าวคือ เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ความแตกต่างระหว่างพลังงานรวมของอิเล็กตรอนภายนอกเกาะและระดับพลังงานว่างภายในเกาะจะลดลง ทำให้โอกาสของการทะลุผ่านจากขั้วซอร์สไปยังเกาะเพิ่มสูงขึ้น จึงทำให้เกิดกระแสรั่วในสภาวะที่ $V_{ds} < V_{th}$ ดังรูปที่ 7 เมื่อ $k_B T = 1.0 E_C$ กระแสจะสามารถไหลผ่านทรานซิสเตอร์อิเล็กตรอนเดี่ยวได้ เมื่อ $V_{ds} = V_{th}/2$ และกระแสเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเมื่อ $V_{ds} > V_{th}$ อย่างไรก็ตาม เมื่อระบบทำงานที่อุณหภูมิสูง ($k_B T \gg E_C$) พลังงานรวมของอิเล็กตรอนภายใน

ทรานซิสเตอร์อิเล็กทรอนิกส์เดี่ยวจะมีค่ามาก ทำให้อิเล็กทรอนิกส์ภายในเกาะไม่สามารถแสดงปรากฏการณ์การขัดขวางแบบคูลอมบ์ได้ กราฟลักษณะสมบัติของทรานซิสเตอร์อิเล็กทรอนิกส์เดี่ยวจึงมีลักษณะเหมือนกับของทรานซิสเตอร์แบบปกติ โดยกราฟลักษณะสมบัติของทรานซิสเตอร์อิเล็กทรอนิกส์เดี่ยวในรูปที่ 7 จะดูเข้าและกลายเป็นกราฟเส้นตรง เมื่อ $k_B T = 10 E_C$



รูปที่ 7 ผลของอุณหภูมิต่อปรากฏการณ์การขัดขวางแบบคูลอมบ์ที่เกิดขึ้นในทรานซิสเตอร์อิเล็กทรอนิกส์เดี่ยว โดยแสดงได้จากค่ากระแสที่ไหลระหว่างขั้วเดรนและขั้วซอร์ส [16]

จากลักษณะสมบัติของทรานซิสเตอร์อิเล็กทรอนิกส์เดี่ยวที่กล่าวมาข้างต้น กระแสจะสามารถไหลผ่านจากขั้วเดรนไปยังขั้วซอร์สได้ เมื่อแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วเกตมีค่ามากกว่าแรงดันไฟฟ้าขีดเริ่ม ซึ่งในสภาวะนี้ ทรานซิสเตอร์อิเล็กทรอนิกส์เดี่ยวจะอยู่ในโหมดการทำงานแบบสวิตช์ออน (Switch on) ในขณะที่กระแสไฟฟ้าจะไม่สามารถไหลผ่านทรานซิสเตอร์ได้ เมื่อแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วเกตมีค่าน้อยกว่าแรงดันไฟฟ้าขีดเริ่ม เรียกโหมดการทำงานนี้ว่า สวิตช์ออฟ (Switch off) ดังนั้น อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์เดี่ยวลักษณะนี้จึงมีโหมดการทำงานคล้ายกับทรานซิสเตอร์สนามไฟฟ้าชนิดเอ็น (n-type MOSFET) ซึ่งใช้แรงดันไฟฟ้าที่ขั้วเกตในการควบคุมการไหลของกระแสจากขั้วเดรนไปขั้วซอร์ส

การประยุกต์ทรานซิสเตอร์อิเล็กทรอนิกส์เดี่ยว

อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์เดี่ยวที่สามารถนำมาประยุกต์ใช้ได้จริงต้องมีรอยต่อสำหรับอิเล็กทรอนิกส์เข้าและออกแยกจากกัน ดังนั้น จึงต้องประกอบด้วยรอยต่อการทะลุผ่านอย่างน้อย 2 รอยต่อ ซึ่งจะทำให้สามารถวัดการตอบสนองทางไฟฟ้าของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์เดี่ยวต่อปริมาณต่างๆ ได้ โครงสร้างที่ง่ายที่สุดของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์เดี่ยวที่สามารถวัดปริมาณทางไฟฟ้าได้ประกอบด้วยรอยต่อการทะลุผ่าน 2 รอยต่อ ได้แก่ ทรานซิสเตอร์อิเล็กทรอนิกส์เดี่ยว ในยุคแรก การสร้างทรานซิสเตอร์อิเล็กทรอนิกส์เดี่ยวจะประสบปัญหาใน

การปลูกเกาะและชั้นฉนวนในระดับนาโนเมตร แต่เทคโนโลยีปัจจุบันได้รับการพัฒนาให้สามารถปลูกฟิล์มคุณภาพสูงในระดับนาโนเมตรได้ ดังนั้น ทรานซิสเตอร์อิเล็กทรอนิกส์เดี่ยว ตลอดจนการประยุกต์ใช้งานต่างๆ ได้ถูกศึกษา พัฒนา และวิจัยอย่างกว้างขวาง อย่างไรก็ตาม ในปัจจุบันอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์เดี่ยวที่มีรอยต่อการทะลุผ่าน 3 รอยต่อ ขึ้นไป แม้จะสามารถสร้างได้หลายโครงสร้าง โดยแต่ละโครงสร้างต่างมีจุดเด่นที่น่าสนใจแตกต่างกัน แต่อุปกรณ์เหล่านั้นยังประสบปัญหาในการสร้างซ้ำให้อุปกรณ์ทุกตัวมีคุณสมบัติเหมือนกัน (Reproducible fabrication) [18] ซึ่งเป็นอุปสรรคสำคัญในการผลิตในเชิงพาณิชย์ ทำให้ไม่ได้รับความนิยมในการศึกษาวิจัย

ในปัจจุบัน อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์เดี่ยวต่างๆ รวมถึงทรานซิสเตอร์อิเล็กทรอนิกส์เดี่ยวแม้ไม่มีการผลิตในเชิงพาณิชย์ แต่มีการวิจัยและพัฒนาแนวทางการประยุกต์ใช้งานของอุปกรณ์เหล่านี้อย่างแพร่หลาย เนื่องจากเป็นอุปกรณ์ที่ถูกคาดหวังว่าจะสามารถแก้ไขขีดจำกัดต่างๆ ของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์เดี่ยวที่ใช้งานในปัจจุบัน ประกอบกับทรานซิสเตอร์อิเล็กทรอนิกส์เดี่ยวเป็นอุปกรณ์ที่มีศักยภาพสูงในการผลิตขายในเชิงพาณิชย์ ฉะนั้นในบทความนี้จะเน้นการนำทรานซิสเตอร์อิเล็กทรอนิกส์เดี่ยวไปประยุกต์ใช้งานในด้านต่างๆ โดยลักษณะเด่นของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์เดี่ยวชนิดนี้ คือ การใช้พลังงานในการทำงานต่ำ นอกจากนี้ ยังสามารถนำไปสร้างอุปกรณ์ที่มีความไวสูงในการตอบสนองต่อปริมาณทางกายภาพต่างๆ รวมถึงศักยภาพในการประยุกต์ใช้สร้างวงจรตรรกะ (Logic circuits) ต่างๆ แต่ทรานซิสเตอร์อิเล็กทรอนิกส์เดี่ยวมีข้อจำกัดสำคัญ คือ ต้องทำงานในช่วงอุณหภูมิต่ำ [19, 20] เพื่อให้อุปกรณ์นี้สามารถแสดงปรากฏการณ์การขัดขวางแบบคูลอมบ์ได้

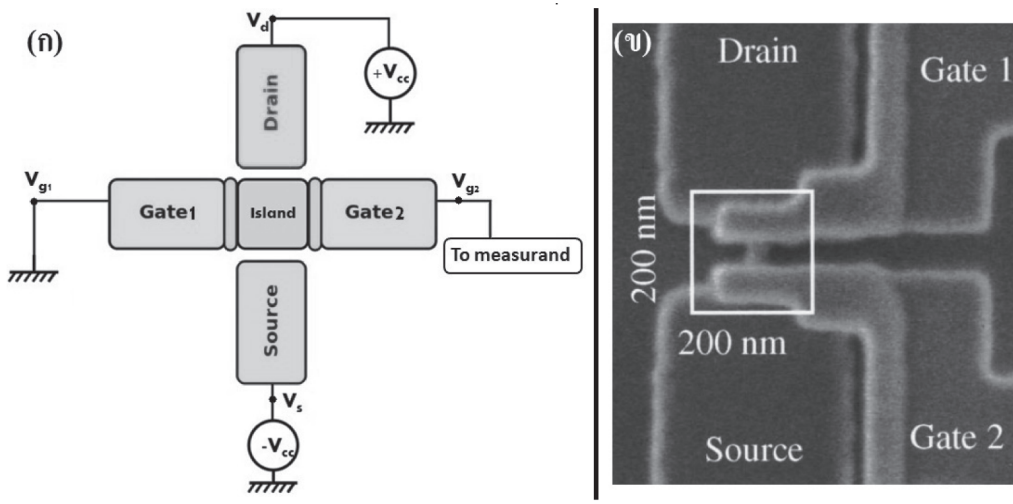
1. เซนเซอร์ความไวสูง

จากโครงสร้างและหลักการทำงานของทรานซิสเตอร์อิเล็กทรอนิกส์เดี่ยวในรูปที่ 6 แสดงให้เห็นว่า อุปกรณ์ชนิดนี้มีความไวต่อการเปลี่ยนแปลงค่าสนามไฟฟ้าที่ขั้วเกต การเปลี่ยนแปลงของสนามไฟฟ้าที่เกิดจากประจุในระดับที่น้อยกว่า 1 ประจุอิเล็กตรอน [1] ($e = 1.6 \times 10^{-19}$ C) จะส่งผลอย่างมีนัยสำคัญต่อปริมาณการไหลของกระแสที่ไหลระหว่างขั้วซอร์สและขั้วเดรน ทำให้เกิดแนวคิดที่จะประยุกต์ใช้ทรานซิสเตอร์อิเล็กทรอนิกส์เดี่ยวในการวัดสนามไฟฟ้าขนาดเล็ก รวมถึงการวัดประจุในระดับ 1 ประจุอิเล็กตรอน อุปกรณ์ที่ใช้โครงสร้างทรานซิสเตอร์อิเล็กทรอนิกส์เดี่ยวในการวัดลักษณะนี้ เรียกว่า ซุปเปอร์เซนซิทีฟอิเล็กทรอมิเตอร์ [1]

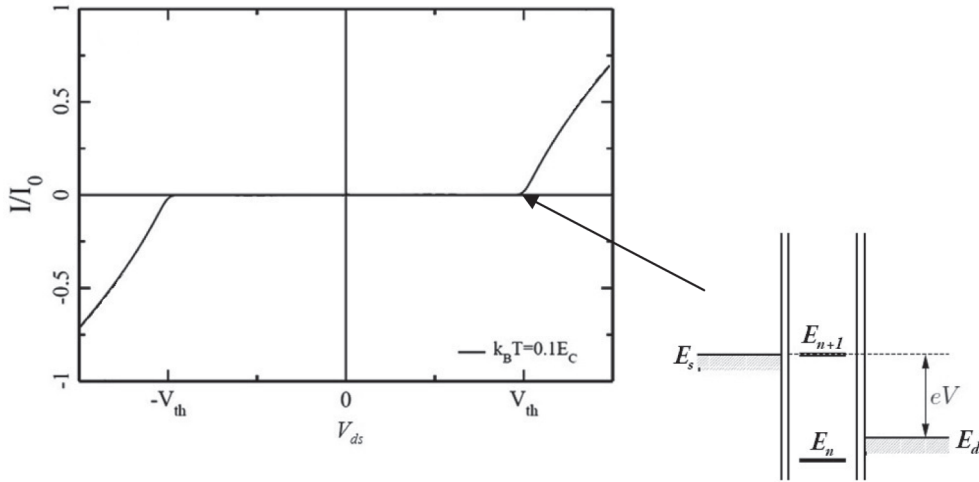
การประยุกต์ใช้งานทรานซิสเตอร์อิเล็กทรอนิกส์เดี่ยวให้มีความไวในการตอบสนองต่อสนามไฟฟ้าหรือประจุไฟฟ้าจากภายนอก สามารถทำได้โดยการเพิ่มขั้วเกตของทรานซิสเตอร์อิเล็กทรอนิกส์เดี่ยวเป็น 2 ขั้ว โดยทั้ง 2 ขั้วจะเชื่อมโยงเข้ากับเกาะผ่านรอยต่อตัวเก็บประจุ [21] เพื่อไม่ให้ประจุภายในเกาะรั่วออกจากเกาะผ่านไปยังขั้วเกตทั้ง 2 ขั้วได้ดังรูปที่ 8 (ก) ขั้วเกตที่ 1 จะต่อเข้ากับแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าจากภายนอกเพื่อทำหน้าที่กำหนดจุดทำงานของทรานซิสเตอร์อิเล็กทรอนิกส์เดี่ยว ในขณะที่ขั้วเกตที่ 2 จะเชื่อมต่อเข้ากับอุปกรณ์หรือบริเวณที่ต้องการวัดค่าสนามไฟฟ้าหรือประจุไฟฟ้า

การทำงานของทรานซิสเตอร์อิเล็กทรอนิกส์เดี่ยวที่มีโครงสร้างลักษณะดังกล่าว มีลักษณะการทำงานที่คล้ายคลึงกับทรานซิสเตอร์อิเล็กทรอนิกส์เดี่ยวทั่วไป อิเล็กตรอนที่ไหลผ่านจากขั้วซอร์สไปยังขั้วเดรน จะถูกควบคุมด้วยสนามไฟฟ้าที่เชื่อมโยงมาจากขั้วเกตทั้ง 2 ขั้ว โดยปกติ แรงดันไฟฟ้าที่ขั้วเกตที่ 1 จะถูกใช้กำหนดค่าระดับพลังงานว่างของอิเล็กตรอนภายในเกาะ ซึ่งจะถูกกำหนดให้มีค่าคงที่ (V_{g1}) ในขณะที่แรงดัน

ไฟฟ้าที่ตกคร่อมขั้วซอร์สและขั้วเดรนจะถูกกำหนดให้มีค่าประมาณแรงดันไฟฟ้าขีดเริ่ม ($V_{ds} \approx V_{th}$) ในสภาวะนี้ อิเล็กตรอนที่ขั้วซอร์สของทรานซิสเตอร์อิเล็กตรอนเดี่ยวจะอยู่ในสภาวะที่พร้อมจะทะลุผ่านเกาะไปยังขั้วเดรน เนื่องจากระดับพลังงานรวมของอิเล็กตรอนที่ขั้วซอร์สมีค่าเท่ากับระดับพลังงานว่างภายในเกาะ ($E_s = E_{n+1}$) ดังรูปที่ 9 ซึ่งการควบคุมทรานซิสเตอร์อิเล็กตรอนเดี่ยวในลักษณะดังกล่าว ทำให้ทรานซิสเตอร์อิเล็กตรอนเดี่ยวมีความไวต่อการเปลี่ยนแปลงสนามไฟฟ้าจากภายนอกที่ขั้วเกตที่ 2 (V_{g2}) อย่างมาก เมื่อสนามไฟฟ้าที่ขั้วเกตที่ 2 มีการเปลี่ยนแปลง กล่าวคือ เมื่อสนามไฟฟ้าที่ขั้วเกตที่ 2 ทำให้ระดับพลังงานว่างภายในเกาะมีค่าลดลง อิเล็กตรอนจากขั้วซอร์สจะสามารถทะลุเข้าไปในเกาะและทะลุจากเกาะไปยังขั้วเดรนได้ ทำให้เกิดการไหลของกระแส แต่เมื่อสนามไฟฟ้าที่ขั้วเกตที่ 2 ทำให้ระดับพลังงานว่างภายในเกาะมีค่าเพิ่มขึ้น อิเล็กตรอนจากขั้วซอร์สจะไม่สามารถทะลุเข้าไปยังเกาะและออกไปยังขั้วเดรนได้ ทำให้ไม่เกิดการไหลของกระแส การเปลี่ยนแปลงสนามไฟฟ้าที่ส่งผลต่อระดับพลังงานว่างภายในเกาะให้สูงขึ้นหรือต่ำลงจะทำให้เกิดการไหลหรือหยุดไหลของกระแสที่ผ่านทรานซิสเตอร์อิเล็กตรอนเดี่ยวตามจังหวะการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้น โดยการไหลของกระแสดังกล่าวถูกนำไปคำนวณเป็นขนาดของสนามไฟฟ้าของอุปกรณ์หรือบริเวณที่ต่อเข้ากับขั้วเกต

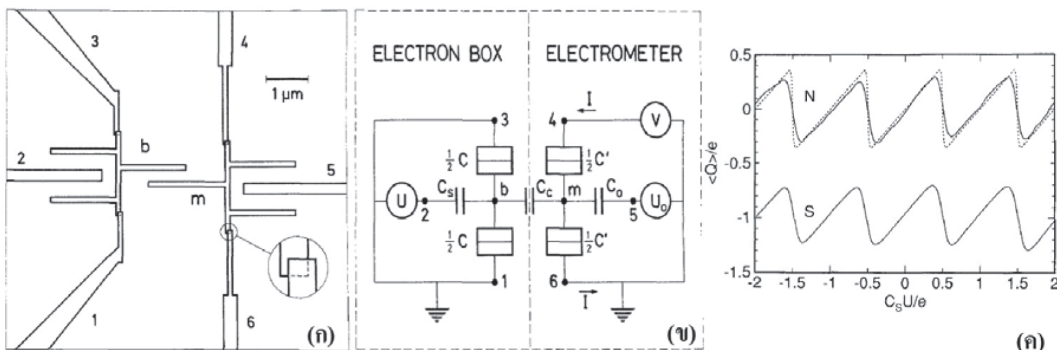


รูปที่ 8 (ก) รูปเปอร์เซนซิทีฟอิเล็กตรอนมิเตอร์ประกอบด้วยรอยต่อการทะลุผ่าน 2 รอยต่อ รอยต่อตัวเก็บประจุ เกาะ ขั้วซอร์ส ขั้วเดรนและขั้วเกต 2 ขั้ว (ข) ภาพถ่ายด้วยกล้องอิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ของโครงสร้างรูปเปอร์เซนซิทีฟอิเล็กตรอนมิเตอร์ [21]



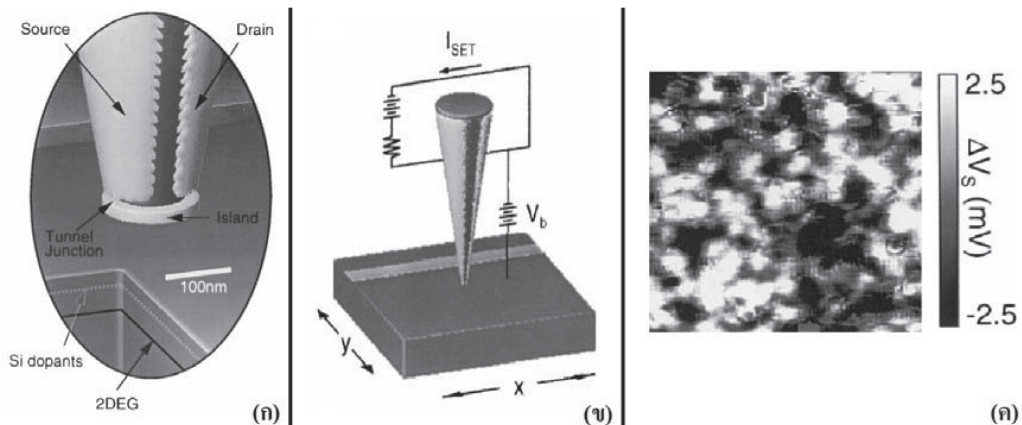
รูปที่ 9 แผนภาพการควบคุมแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมขั้วซอร์สและขั้วเดรนของซูปเปอร์เซนซิทีฟอิเล็กทรอ- มิเตอร์ เพื่อให้อยู่ในสถานะที่พร้อมใช้งาน (ดัดแปลงจากเอกสารอ้างอิง [16])

จากโครงสร้างและหลักการทำงานของซูปเปอร์เซนซิทีฟอิเล็กทรอ มิเตอร์ ทำให้เกิดข้อจำกัดในการประยุกต์ใช้งาน เนื่องจากอุปกรณ์ชนิดนี้มีโครงสร้างในระดับนาโนเมตร ทำให้สามารถวัดสนามไฟฟ้าได้จากพื้นที่ขนาดเล็กเท่านั้น จึงไม่สามารถเชื่อมต่อกับอุปกรณ์ขนาดใหญ่ได้ ประกอบกับการตอบสนองที่ไวต่อสนามไฟฟ้า ทำให้อุปกรณ์ชนิดนี้สามารถวัดสนามไฟฟ้าที่เกิดจากประจุขนาดเล็ก แต่ไม่สามารถวัดสนามขนาดใหญ่ได้ การประยุกต์ใช้งานโดยมากจะเป็นการเชื่อมต่อเข้ากับอุปกรณ์หรือเครื่องมือวัดแบบจุลภาค (Microscopic) เช่น การประยุกต์ใช้ในการวัดปรากฏการณ์การขีดขวางแบบคูลอมบ์ในกล่องอิเล็กตรอนเดี่ยว [5] และการประยุกต์ใช้งานร่วมกับหัววัดของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด [3, 4]



รูปที่ 10 การประยุกต์ใช้ทรานซิสเตอร์อิเล็กตรอนเดี่ยวเป็นซูปเปอร์เซนซิทีฟอิเล็กทรอ มิเตอร์ (ก) โครงสร้างของซูปเปอร์เซนซิทีฟอิเล็กทรอ มิเตอร์ (ข) วงจรสมมูลของโครงสร้างซูปเปอร์เซนซิทีฟอิเล็กทรอ มิเตอร์และ (ค) ผลการวัดประจุในเกาะของกล่องอิเล็กตรอนเดี่ยวด้วยซูปเปอร์เซนซิทีฟอิเล็กทรอ มิเตอร์ [5]

รูปที่ 10 (ก) แสดงตัวอย่างการประยุกต์ใช้ทรานซิสเตอร์อิเล็กทรอนิกส์เดี่ยวเป็นซูเปอร์เซนซิทีฟอิเล็กทริคมิเตอร์สำหรับวัดประจุที่เปลี่ยนแปลงภายในเกาะของกล่องอิเล็กทรอนิกส์เดี่ยวเวลาฟาร์กและคณะ (Lafarge et al) [5] ประยุกต์ใช้เทคนิคนาโนลิโทกราฟีด้วยลำอิเล็กตรอน (E-beam nanolithography) [22] ร่วมกับซาโดว์อีวาพอเรชัน (Shadow evaporation) [23] ในการสร้างอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์เดี่ยวดังรูปที่ 10 (ก) โดยสามารถเขียนวงจรมูลของโครงสร้างดังกล่าวได้ดังรูปที่ 10 (ข) อุปกรณ์ที่ถูกสร้างขึ้นนี้ประกอบด้วยทรานซิสเตอร์อิเล็กทรอนิกส์เดี่ยวที่เหมือนกัน 2 ตัวมาเชื่อมโยงกันผ่านขั้วเกตของเกาะ b และเกาะ m ทำให้เกิดรอยต่อตัวเก็บประจุ (C_c) ระหว่างขั้วเกตดังกล่าว ดังนั้น เมื่ออิเล็กตรอนทะลุผ่านออกไปจากเกาะ b จะทำให้เกิดสนามไฟฟ้าเชื่อมโยงไปยังเกาะ m แล้วส่งผลให้ระดับพลังงานว่างภายในเกาะ m ลดลง ทำให้กระแสของซูเปอร์เซนซิทีฟอิเล็กทริคมิเตอร์ไหลจากขั้วเดรนไปยังขั้วซอร์ส กระแสที่เกิดขึ้นจะขึ้นอยู่กับจำนวนประจุภายในเกาะ b ทำให้สามารถคำนวณจำนวนประจุภายในกล่องอิเล็กทรอนิกส์เดี่ยวจากกระแสที่ไหลผ่านซูเปอร์เซนซิทีฟอิเล็กทริคมิเตอร์ ดังผลที่แสดงในรูปที่ 10 (ค)



รูปที่ 11 ตัวอย่างการประยุกต์ใช้ทรานซิสเตอร์อิเล็กทรอนิกส์เดี่ยวร่วมกับกล่องจุลทรรศน์อิเล็กทรอนิกส์แบบส่องกราด [3]

- (ก) หัววัดของกล่องจุลทรรศน์อิเล็กทรอนิกส์ที่มีโครงสร้างของทรานซิสเตอร์อิเล็กทรอนิกส์เดี่ยวบนปลายหัววัด
- (ข) ลักษณะการจ่ายแรงดันไฟฟ้าจากภายนอกเพื่อควบคุมทรานซิสเตอร์อิเล็กทรอนิกส์เดี่ยวบนปลายหัววัด
- (ค) ตัวอย่างภาพถ่ายการกระจายตัวของประจุบนชิ้นตัวอย่างสารกึ่งตัวนำที่ถูกเจือโดยใช้กล่องจุลทรรศน์อิเล็กทรอนิกส์เดี่ยวบนปลายหัววัด จุดมืดแสดงประจุลบ ในขณะที่จุดสว่างแทนประจุบวก

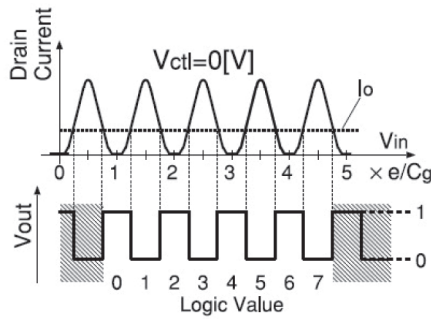
ตัวอย่างการประยุกต์ใช้ทรานซิสเตอร์อิเล็กทรอนิกส์เดี่ยวร่วมกับกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดแสดงดังรูปที่ 11 โดยเป็นการสร้างทรานซิสเตอร์อิเล็กทรอนิกส์เดี่ยวบนปลายหัววัด (Probe) เพื่อเพิ่มศักยภาพในการวัดของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน เนื่องจากโครงสร้างทางกายภาพของทรานซิสเตอร์อิเล็กทรอนิกส์เดี่ยวไม่ซับซ้อน ยู และคณะ (Yoo et al) [3] จึงประยุกต์ใช้เทคนิคการอิวาพอเรชันในการสร้างชั้นฟิล์มบางอลูมิเนียมลงบนปลายใยแก้ว (Glass fiber) ทั้งสองข้างเพื่อใช้เป็นขั้วซอร์สและขั้วเดรนดังรูปที่ 11 (ก) จากนั้นเคลือบชั้นฉนวนรูปร่างแผ่นงานลงบนปลายใยแก้ว แล้วเคลือบชั้นฟิล์มบางอลูมิเนียมลงบนชั้นฉนวนดังกล่าว ทำให้ได้โครงสร้างของทรานซิสเตอร์อิเล็กทรอนิกส์เดี่ยวบนปลายหัววัดสำหรับกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน

หัววัดที่สร้างขึ้นมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 100 นาโนเมตร จึงทำให้สามารถถ่ายภาพพื้นผิวของชิ้นสารตัวอย่างได้ด้วยความละเอียดสูง นอกจากนี้ลักษณะสมบัติของทรานซิสเตอร์อิเล็กทรอนิกส์เดี่ยวที่ตอบสนองต่อสนามไฟฟ้าจากภายนอก ทำให้สามารถวัดสนามไฟฟ้าจากประจุที่ผิวและใต้ผิวของชิ้นสารตัวอย่างได้ ในขณะที่ใช้งาน ขั้วเดรนและขั้วซอร์สจะเชื่อมโยงเข้ากับแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าจากภายนอก พร้อมทั้งจ่ายแรงดันไฟฟ้าให้กับชิ้นสารตัวอย่างดังรูปที่ 11 (ข) เพื่อให้หัววัดที่สร้างขึ้นจะอยู่ในสภาวะพร้อมใช้งาน เนื่องจากหัววัดอยู่ใกล้กับพื้นผิวของชิ้นสารตัวอย่าง กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนที่ใช้หัววัดลักษณะนี้จึงสามารถถ่ายภาพการกระจายตัวของประจุของสารเจือปนผิวของสารกึ่งตัวนำได้ดังรูปที่ 11 (ค) จุดสว่างในรูปคือตำแหน่งของประจุบวก ในขณะที่จุดมืดคือ ตำแหน่งของประจุลบ

2. เกตตรรกะอิเล็กทรอนิกส์เดี่ยว

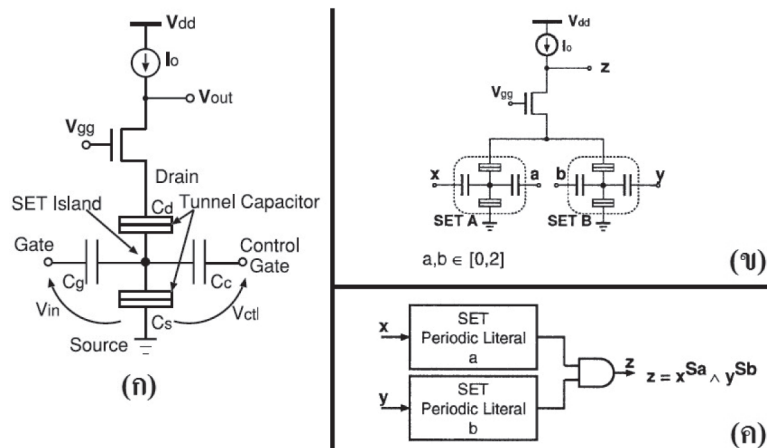
เกตตรรกะอิเล็กทรอนิกส์เดี่ยวเป็นเกตตรรกะแบบหลายระดับ (Multi-value logic gates) [6] ซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่สามารถเพิ่มความเร็วในการทำงานของอุปกรณ์ดิจิทัล (Digital) ในปัจจุบัน เนื่องจาก 1 บิตข้อมูลของเกตตรรกะแบบหลายระดับจะเท่ากับข้อมูลแบบไบนารี (Binary) หลายบิต [12] การใช้เกตชนิดนี้จึงทำให้สามารถประมวลผลข้อมูลแบบไบนารีได้หลายบิตพร้อมกัน ความเร็วในการทำงานจึงเพิ่มขึ้น ทำให้สามารถจัดการข้อมูลปริมาณมากด้วยความเร็วประมวลผลสูง นับเป็นแนวทางการแก้ปัญหาความเร็วในการตอบสนองของเกตตรรกะแบบไบนารีที่ถูกสร้างจากมอสเฟต (MOSFET) ซึ่งแนวทางการพัฒนาที่ผ่านมาทำได้โดยลดขนาดทางกายภาพของมอสเฟตเพื่อเพิ่มความเร็วในการตอบสนองต่อสัญญาณของเกตตรรกะแบบไบนารี แต่วิธีการเพิ่มความเร็วดังกล่าวนี้ได้ถึงขีดจำกัด เนื่องจากการลดขนาดของมอสเฟตให้เล็กลงกว่าขนาดในปัจจุบันจะทำให้อุปกรณ์แสดงพฤติกรรมทางวงจรแตกต่างจากมอสเฟตปกติ อันเป็นผลจากปรากฏการณ์ทางควอนตัม

ทรานซิสเตอร์อิเล็กทรอนิกส์เดี่ยวมีลักษณะความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วเกตและกระแสเดรนแบบคาบดังรูปที่ 12 ลักษณะสมบัติการส่งผ่าน (Transfer characteristics) ที่เป็นคาบนี้ ทำให้เกิดจุดแบ่งที่มีเสถียรภาพ (Stability points) [7] หลายจุด จึงสามารถแบ่งกราฟลักษณะสมบัติของทรานซิสเตอร์อิเล็กทรอนิกส์เดี่ยวออกได้หลายช่วง ซึ่งในแต่ละช่วงจะถูกกำหนดให้เป็นระดับตรรกะที่แตกต่างกัน อุปกรณ์ที่สร้างขึ้นจึงมีระดับตรรกะตั้งแต่ 2 ระดับ ถึง อนันต์ จำนวนระดับตรรกะจะขึ้นกับช่วงของแรงดันไฟฟ้าขาเข้าที่จ่ายให้ขั้วเกตของทรานซิสเตอร์อิเล็กทรอนิกส์เดี่ยว



รูปที่ 12 กราฟลักษณะสมบัติการส่งผ่านของความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วเกตและกระแสเดรนที่เกิดขึ้นในเกตตรรกะอิเล็กทรอนิกส์ทรานซิสเตอร์เดี่ยวแบบทั่วไป [6]

ลักษณะรายคาบในกราฟลักษณะสมบัติของทรานซิสเตอร์อิเล็กทรอนิกส์ทรานซิสเตอร์เดี่ยวเกิดจากการทะลุผ่านของอิเล็กตรอนเดี่ยวจากขั้วซอร์สไปเกาะและจากเกาะไปขั้วเดรน แรงดันไฟฟ้าขาออกที่ขั้วเดรนของทรานซิสเตอร์อิเล็กทรอนิกส์ทรานซิสเตอร์เดี่ยวถูกจำกัดให้มีขนาดเล็กเพื่อให้เกิดปรากฏการณ์การขัดขวางแบบคูลอมบ์ ซึ่งจะส่งผลให้กระแสเดรนมีลักษณะเป็นคาบ อย่างไรก็ตาม แรงดันขาออกขนาดเล็กที่ขั้วเดรนไม่เหมาะกับการใช้งานจริง ทำให้ต้องต่อมอสเฟตแบบคาสโคด (Cascode) เพื่อเพิ่มความต้านทานขาออกและแรงดันไฟฟ้าขาออกให้มีค่าสูงในระดับที่สามารถใช้งานร่วมกับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ต่างๆ ได้ ลักษณะการต่อมอสเฟตกับขั้วเดรนของทรานซิสเตอร์อิเล็กทรอนิกส์ทรานซิสเตอร์เดี่ยวแสดงดังรูปที่ 13 (ก) ซึ่งเป็นหน่วยวงจรพื้นฐานสำหรับการสร้างเกตตรรกะอิเล็กทรอนิกส์ทรานซิสเตอร์เดี่ยวแบบต่างๆ



รูปที่ 13 การประยุกต์ใช้ทรานซิสเตอร์อิเล็กทรอนิกส์ทรานซิสเตอร์เดี่ยวเป็นเกตตรรกะอิเล็กทรอนิกส์ทรานซิสเตอร์เดี่ยว (ก) วงสมมูลของเกตตรรกะอิเล็กทรอนิกส์ทรานซิสเตอร์เดี่ยวแบบทั่วไป (ข) วงจรสมมูลของเกตตรรกะอิเล็กทรอนิกส์ทรานซิสเตอร์เดี่ยวชนิดแอนด์ (ค) วงจรสมมูลเชิงตรรกะของเกตตรรกะอิเล็กทรอนิกส์ทรานซิสเตอร์เดี่ยวชนิดแอนด์ [6]

ตัวอย่างเกตตรรกะอิเล็กทรอนิกส์ชนิดแอนด์ (AND single-electron logic gates) แสดงดังรูปที่ 13 (ข) เกตตรรกะดังกล่าวสร้างจากทรานซิสเตอร์อิเล็กทรอนิกส์เดี่ยว 2 ตัว ต่อขนานกันเพื่อสร้างขั้วขาเข้า 2 ขั้ว สำหรับใช้ดำเนินการทางตรรกะแบบแอนด์ ซึ่งแผนภาพวงจรสมมูลเชิงตรรกะแสดงดังรูปที่ 13 (ค) เกตชนิดนี้จะช่วยลดความซับซ้อนของวงจรถรกะ เนื่องจากการทำงาน 1 บิต ของเกตชนิดนี้จะเสมือนเป็นการทำงานของเกตแบบไบนารีหลายบิตพร้อมกัน จึงทำให้จำนวนอุปกรณ์ที่จำเป็นในการสร้างวงจรถดลง

เกตตรรกะอิเล็กทรอนิกส์เดี่ยวสามารถลดกำลังงานไฟฟ้าและความซับซ้อนของวงจร ในขณะที่ความเร็วในการทำงานของวงจรเพิ่มขึ้นอย่างมาก แต่อย่างไรก็ตาม การสร้างให้ทรานซิสเตอร์อิเล็กทรอนิกส์เดี่ยวทำงานที่อุณหภูมิห้อง (Room temperature) ยังพบอุปสรรคที่ต้องได้รับการศึกษา ประกอบกับปัญหาการสร้างทรานซิสเตอร์อิเล็กทรอนิกส์เดี่ยวซ้ำให้มีลักษณะสมบัติเหมือนกันยังคงเป็นความท้าทายของการพัฒนาเทคโนโลยีนาโนลิโทกราฟี ดังนั้น การศึกษาวิจัยทางด้านเกตตรรกะอิเล็กทรอนิกส์เดี่ยวในปัจจุบันจึงยังเป็นการพัฒนาเชิงหลักการและแนวคิดโดยใช้วงจรถสมมูลของทรานซิสเตอร์อิเล็กทรอนิกส์เดี่ยวในการออกแบบและจำลองผลตอบสนองและสัญญาณขาออกของวงจรเท่านั้น

สรุป

อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์เดี่ยวเป็นอุปกรณ์ที่อาศัยปรากฏการณ์ความไม่ต่อเนื่องของประจุอิเล็กทรอนิกส์ ซึ่งลักษณะดังกล่าวจะสามารถพบในปรากฏการณ์การทะลุผ่านกำแพงศักย์ของอิเล็กทรอนิกส์ ดังนั้น ในการประยุกต์ใช้งานปรากฏการณ์ลักษณะนี้จำเป็นต้องให้อิเล็กตรอนเคลื่อนที่ผ่านรอยต่อการทะลุผ่านภายใต้การควบคุมจากภายนอก กล่องอิเล็กทรอนิกส์เดี่ยวจึงเป็นโครงสร้างพื้นฐานที่สามารถแสดงพฤติกรรมของอิเล็กทรอนิกส์เดี่ยวได้ โดยมีเกาะขนาดเล็กที่ถูกตัดขาดจากสิ่งแวดล้อม แต่เชื่อมต่อกับภายนอกด้วยรอยต่อการทะลุผ่านและรอยต่อตัวเก็บประจุ โครงสร้างลักษณะนี้จะทำให้เกิดระดับพลังงานของอิเล็กทรอนิกส์ที่ไม่ต่อเนื่องภายในเกาะ ส่งผลให้เกิดปรากฏการณ์การซัดขวางแบบคูลอมบ์ ภายใต้เงื่อนไขที่เหมาะสม อิเล็กตรอนจะถูกควบคุมให้เคลื่อนที่เข้า/ออกทีละ 1 ตัว อย่างไรก็ตาม กล่องอิเล็กทรอนิกส์เดี่ยวไม่สามารถนำไปใช้งานได้จริง เพราะอิเล็กทรอนิกส์จะถูกกักอยู่ภายในเกาะของกล่องอิเล็กทรอนิกส์เดี่ยว เพื่อให้สามารถใช้งานอิเล็กทรอนิกส์ที่ถูกกักอยู่ภายในเกาะ จึงต้องเพิ่มรอยต่อการทะลุผ่านสำหรับเป็นทางออกของอิเล็กทรอนิกส์ โครงสร้างที่ได้เรียกว่า ทรานซิสเตอร์อิเล็กทรอนิกส์เดี่ยว ซึ่งประกอบด้วยรอยต่อการทะลุผ่าน 2 รอยต่อ และรอยต่อตัวเก็บประจุ 1 รอยต่อ

การควบคุมการไหลของอิเล็กตรอนภายในทรานซิสเตอร์อิเล็กทรอนิกส์เดี่ยวทำได้โดยการจ่ายแรงดันไฟฟ้าจากภายนอกผ่านขั้วเกต เพื่อควบคุมระดับพลังงานว่างภายในเกาะ การเพิ่มหรือลดระดับพลังงานดังกล่าวอย่างน้อยเท่ากับพลังงานการเพิ่มประจุ จะเป็นการควบคุมให้อิเล็กตรอนสามารถเคลื่อนที่ผ่านรอยต่อการทะลุผ่านของทรานซิสเตอร์อิเล็กทรอนิกส์เดี่ยว การเปลี่ยนแปลงระดับพลังงานอิเล็กทรอนิกส์ภายในเกาะเพียงเล็กน้อยจะส่งผลต่อกระแสที่เกิดจากการทะลุผ่านของอิเล็กทรอนิกส์เดี่ยวอย่างมีนัยสำคัญ ดังนั้น ทรานซิสเตอร์อิเล็กทรอนิกส์เดี่ยวจึงถูกประยุกต์ใช้เป็นมิเตอร์วัดสนามไฟฟ้าที่มีความไวสูงหรือซูเปอร์เซ็นซิทีฟ อิเล็กทรอนิกส์ทรานซิสเตอร์ นอกจากนี้ ลักษณะสมบัติแรงดันกระแส ($V_g - I_d$) ที่เป็นรอยคาบทำให้การทำงานของทรานซิสเตอร์อิเล็กทรอนิกส์เดี่ยวมีย่านเสถียรหลายช่วง ดังนั้น อุปกรณ์ชนิดนี้จึงเหมาะกับการประยุกต์ใช้สร้างเกตตรรกะชนิดหลายระดับ ซึ่งเกตตรรกะที่ได้สามารถบรรจุข้อมูลได้มากกว่าเกตตรรกะแบบไบนารีที่ใช้งานโดยทั่วไป [12] ดังนั้น จึงมีประสิทธิภาพการทำงานสูงและรวดเร็ว

ทรานซิสเตอร์อิเล็กทรอนิกส์เดี่ยวเป็นอุปกรณ์ที่มีศักยภาพในการใช้งานที่หลากหลายและใช้พลังงานต่ำ แม้ว่างานทางด้านวัสดุศาสตร์จะก้าวหน้าไปมาก แต่อย่างไรก็ตาม เทคโนโลยีในปัจจุบันยังไม่สามารถผลิตทรานซิสเตอร์อิเล็กทรอนิกส์เดี่ยวในเชิงพาณิชย์ได้ เนื่องจากโครงสร้างของทรานซิสเตอร์อิเล็กทรอนิกส์เดี่ยวมีขนาดเล็ก ทำให้ยังประสบปัญหาการสร้างทรานซิสเตอร์อิเล็กทรอนิกส์เดี่ยวซ้ำให้มีคุณสมบัติเหมือนกันทุกประการ ประกอบกับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์เดี่ยวเหล่านี้ยังไม่สามารถใช้งานที่อุณหภูมิห้องได้อย่างมีประสิทธิภาพ [18-20] ซึ่งปัญหาเหล่านี้ยังต้องได้รับการศึกษาวิจัยต่อไป

เอกสารอ้างอิง

1. Likharev, K. K. 1999. Single-Electron Devices and Their Applications. *Proceedings of the IEEE* 87(4): 606-632.
2. Goldhaber-Gordon, D., Shtrikman, H., Mahalu, D., Abusch-Magder, D., Meirav, U., and Kastner, M. A. 1998. Kondo Effect in a Single-Electron Transistor. *Nature* 391(6663), 156-159.
3. Yoo, M. J., Fulton, T. A., Hess, H. F., Willett, R. L., Dunkleberger, L. N., Chichester, R. J., Pfeiffer, L. N., and West, K. W. 1998. Scanning Single-Electron Transistor Microscopy: Imaging Individual Charges. *Physica E: Low-dimensional Systems and Nanostructures* 3(1), 8-14.
4. Hess, H. F., Fulton, T. A., Yoo, M. J., and Yacoby, A. 1998. Microscopy with a Single Electron Transistor Probe. *Solid State Communications* 107(11), 657-661.
5. Lafarge, P., Pothier, H., Williams, E. R., Esteve, D., Urbina, C., and Devoret, M. H. 1991. Direct Observation of Macroscopic Charge Quantization. *Zeitschrift für Physik B Condensed Matter* 85(3), 327-332.
6. Degawa, K., Higuchi, T., Inokawa, H., and Takahashi, Y. 2004. A Single-Electron-Transistor Logic Gate Family for Binary, Multiple-Valued and Mixed-Mode Logic. *IEICE Transactions on Electronics* 87(11), 1827-1836.
7. Inokawa, H., Fujiwara, A., and Takahashi, Y. 2003. A Multiple-Valued Logic and Memory with Combined Single-Electron and Metal-Oxide-Semiconductor Transistors. *IEEE Transactions on Electron Devices* 50(2), 462-470.
8. Vrijen, R., Yablonovitch, E., Wang, K., Jiang, H. W., Balandin, A., Roychowdhury, V., Mol, T., and DiVincenzo, D. 2000. Electron-Spin-Resonance Transistors for Quantum Computing in Silicon-Germanium Heterostructures. *Physical Review A* 62(1), 012306.
9. Takahashi, Y., Nagase, M., Namatsu, H., Kurihara, K., Iwdate, K., Nakajima, Y., Horiguchi, S., Murase, K., and Tabe, M. 1995. Fabrication Technique for Si Single-Electron Transistor Operating at Room Temperature. *Electronics Letters* 31(2), 136-137.

10. Averin, D. V., and Likharev, K. K. 1986. Coulomb Blockade of Single-electron Tunneling, and Coherent Oscillations in Small Tunnel Junctions. *Journal of Low Temperature Physics* 62(3-4), 345-373.
11. Devoret, M. H., Esteve, D., and Urbina, C. 1992. Single-Electron Transfer in Metallic Nanostructures. *Nature* 360(6404), 547-553.
12. Yano, K., Ishii, T., Sano, T., Mine, T., Murai, F., Hashimoto, T., Kobayashi, T., Kure, T., and Seki, K. 1999. Single-Electron Memory for Giga-to-Tera Bit Storage. *Proceedings of the IEEE* 87(4), 633-651.
13. Agarwal, B. K., and Eisner, M. 1998. Statistical Mechanics. 2nd Edition. New Delhi. New Age International Publishers Ltd. p. 69-70.
14. Kasfner, M. A. 1993. Artificial Atoms. *Physics Today* 46, 24-31.
15. Imry, Y., and Landauer, R. 1999. Conductance Viewed as Transmission. *Reviews of Modern Physics* 71(2), S306-S312.
16. Theis, C. 2004. Conductance of Single Electron Devices from Imaginary-Time Path Integrals. Doctoral Dissertation, Universitätsbibliothek Freiburg. p. 1-13.
17. Feldheim, D. L., and Keating, C. D. 1998. Self-Assembly of Single Electron Transistors and Related Devices. *Chemical Society Reviews* 27(1), 1-12.
18. Li, P. W., Liao, W. M., Kuo, D., Lin, S. W., Chen, P. S., Lu, S. C., and Tsai, M. J. 2004. Fabrication of a Germanium Quantum-Dot Single-Electron Transistor with Large Coulomb-Blockade Oscillations at Room Temperature. *Applied Physics Letters* 85(9), 1532-1534.
19. De-Picciotto, R., Reznikov, M., Heiblum, M., Umansky, V., Bunin, G., and Mahalu, D. 1997. Direct Observation of a Fractional Charge. *Nature* 389(6647), 162-164.
20. Tans, S. J., Verschueren, A. R., and Dekker, C. 1998. Room-Temperature Transistor Based on a Single Carbon Nanotube. *Nature* 393(6680), 49-52.
21. Takahashi, Y., Fujiwara, A., Yamazaki, K., Namatsu, H., Kurihara, K., and Murase, K. 2000. Multigate Single-Electron Transistors and Their Application to an Exclusive-OR gate. *Applied Physics Letters* 76(5), 637-639.
22. Matsui, S. 1997. Nanostructure Fabrication using Electron Beam and Its Application to Nanometer Devices. *Proceedings of the IEEE* 85(4), 629-643.
23. Kosiorek, A., Kandulski, W., Glaczynska, H., and Giersig, M. 2005. Fabrication of Nanoscale Rings, Dots, and Rods by Combining Shadow Nanosphere Lithography and Annealed Polystyrene Nanosphere Masks. *Small* 1(4), 439-444.

ได้รับบทความวันที่ 8 เมษายน 2557

ยอมรับตีพิมพ์วันที่ 10 มิถุนายน 2557

