

การประยุกต์ใช้อุปกรณ์ประจุเดี่ยวสำหรับมาตรฐานปฐมภูมิทางด้านกระแสไฟฟ้า

Application of Single Charge Device for the Current Primary Standard

จุฬารัตน์ ทานธรรมณ์* และ มณฑล หอมกลิ่นเทียน

กลุ่มงานมาตรฐานปฐมภูมิไฟฟ้า เวลา
และความถี่ ฝ่ายมาตรวิทยาไฟฟ้า
สถาบันมาตรวิทยาแห่งชาติ
* ผู้รับผิดชอบบทความ
jutarat@nimt.or.th

Received: 24 May 2022

Revised: 14 Aug 2022

Accepted: 23 Aug 2022

บทคัดย่อ

บทความนี้อธิบายคุณสมบัติของทรานซิสเตอร์คู่คูเปอร์เดี่ยว ซึ่งเป็นอุปกรณ์พื้นฐานของอุปกรณ์ประจุเดี่ยว โดยใช้ปรากฏการณ์การขัดขวางแบบคูลอมป์ในการควบคุมอิเล็กตรอนเดี่ยว หรือ คู่คูเปอร์อิเล็กตรอน ด้วยคุณสมบัตินี้ ทรานซิสเตอร์คู่คูเปอร์เดี่ยวสามารถประยุกต์ใช้เป็นอุปกรณ์มาตรฐานควอนตัมทางด้านมาตรวิทยาได้ งานวิจัยนี้ได้ศึกษาและสร้างทรานซิสเตอร์คู่คูเปอร์เดี่ยว ด้วยเทคนิค electron beam lithography และ electron gun evaporation ทรานซิสเตอร์คู่คูเปอร์เดี่ยวถูกวัดที่อุณหภูมิต่ำกว่า 100 mK ด้วย dilution refrigerator พบว่า ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าที่ชั่วเกิดและกระแสที่พีทของกระแส supercurrent แสดงความสัมพันธ์การส่งผ่านของคู่คูเปอร์อิเล็กตรอนเท่านั้น ทำให้ชี้ให้เห็นได้ว่าทรานซิสเตอร์คู่คูเปอร์เดี่ยว มีคุณสมบัติของการส่งผ่านคู่คูเปอร์อิเล็กตรอนที่สัมพันธ์กับความถี่ในระดับ 16 จิกะเฮิรตซ์ จึงมีความเป็นไปได้ที่สามารถนำมาประยุกต์ใช้งานเป็นตัวตรวจนับอิเล็กตรอนรวมกับอุปกรณ์อื่น ๆ ได้

คำสำคัญ: ทรานซิสเตอร์คู่คูเปอร์เดี่ยว ปรากฏการณ์การขัดขวางแบบคูลอมป์ มาตรวิทยา

Abstract

This article describes the properties of single Cooper pair transistors, a basic device of a single charge device by using the Coulomb blockade phenomenon to control single electrons or Cooper-pairs. Single Cooper pair transistors can be applied as a quantum standard in metrology. Single Cooper pair transistor is studied and fabricated by using electron beam lithography and electron gun evaporation techniques. Single Cooper pair transistor is measured at temperatures below 100 mK with a dilution refrigerator. The coulomb oscillation characteristic at the supercurrent peak shows the coherent Cooper-pair transport regime. It is possible to point out that the Cooper-pair tunnel with the frequency of coherent oscillation in order 16 gigahertz. Therefore, it is possible that it can be applied as an electron detector with other superconducting devices.

Keywords: Single Cooper-pair transistor, Coulomb blockage phenomenon, Metrology

1. บทนำ

การประชุมใหญ่ว่าด้วยการชั่งตวงวัด (The General Conference on Weights and Measures, CGPM) ครั้งที่ 26 ปี ค.ศ. 2019 ได้มีมติการกำหนดค่านิยามใหม่ของหน่วยฐานเอสไอ (International system of Units, SI units) ในเทอมของค่าคงที่ธรรมชาติทางฟิสิกส์ หนึ่งหน่วย

ฐานเอสไอทางไฟฟ้าที่สำคัญคือ แอมแปร์ (A) ซึ่งเป็นหน่วยของกระแสไฟฟ้าที่มีความสัมพันธ์กับค่าคงที่ประจุมูลฐาน (elementary charge, e) มีค่าเท่ากับ $1.602\ 176\ 634 \times 10^{-19}$ แอมแปร์·วินาที (A·s) [1] ความสำคัญของการนิยามใหม่ของแอมแปร์สำหรับทางด้านมาตรวิทยาเป็นการเชื่อมโยงความสัมพันธ์ของกระแสไฟฟ้ากับประจุมูลฐาน ในความสัมพันธ์ของการส่งผ่านประจุเดียวกับความถี่ (f) ให้ผลลัพธ์ปริมาณของกระแสไฟฟ้าได้ตาม $I = nef$ ซึ่ง n คือ จำนวนประจุมูลฐานที่ส่งผ่านต่อรอบ ในแง่การประยุกต์ใช้อุปกรณ์ประจุเดี่ยว (single charge device) เพื่อหาค่าปริมาณกระแสไฟฟ้ามาตรฐานสำหรับตัวมาตรฐานควอนตัมกระแสไฟฟ้า (Quantum current standard) ได้นั้นตรงกับนิยามใหม่ของกระแสไฟฟ้า

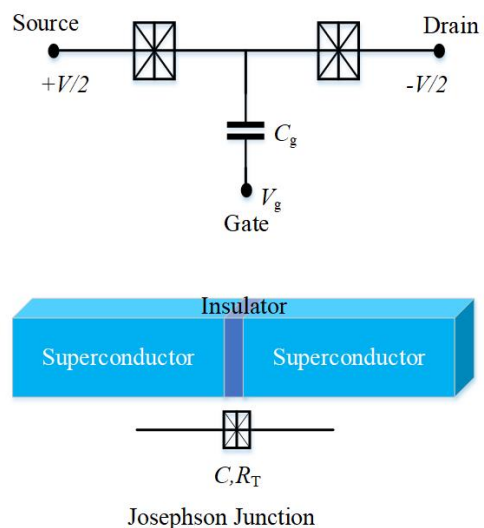
อุปกรณ์ประจุเดี่ยวมีทั้งอุปกรณ์ที่สร้างจากสารกึ่งตัวนำ (semiconductor) และสารตัวนำยิ่งยวด (superconductor) หนึ่งในอุปกรณ์ที่สำคัญที่สามารถนำมาประยุกต์ใช้ในงานด้านมาตรวิทยาได้คือ ทรานซิสเตอร์คู่คูเปอร์เดี่ยว (single Cooper-pair transistor) เช่นนำมาประยุกต์ใช้เป็น sensitive electrometer และเครื่องตรวจจับโฟนอน [2-3] ในการประยุกต์ใช้อุปกรณ์ประจุเดี่ยว มีบทความนำเสนอการประยุกต์ใช้ทรานซิสเตอร์อิเล็กตรอนเดี่ยว (single electron transistor) มาสร้างมาตรฐานของกระแสไฟฟ้า เรียกว่า self-referenced single-electron quantized source [4] ประกอบด้วยปั๊มอิเล็กตรอนเดี่ยว (single electron pump) และตัวตรวจนับอิเล็กตรอนเดี่ยว (single electron detector) กับความไม่แน่นอนของแหล่งจ่ายกระแสไฟฟ้ามาตรฐานในระดับ 10^{-21} A ด้วยค่ากระแสไฟฟ้าในระดับอัตโตแอมแปร์ (aA) ซึ่งไม่อยู่ในช่วงของการนำไปใช้งานจริงของเครื่องมือวัดทางไฟฟ้าในปัจจุบัน โดยทั่วไปค่ากระแสไฟฟ้าอยู่ในระดับนาโนแอมแปร์ (nA) ขึ้นไป ขนาดของกระแสไฟฟ้าที่ได้จากตัวมาตรฐานนี้ถูกจำกัดด้วยค่าความไว (sensitivity) และแบนด์วิดท์ (bandwidth) ของตัวตรวจนับอิเล็กตรอน ซึ่งเป็นส่วนสำคัญของการได้มาของค่าไม่แน่นอนของตัวมาตรฐานกระแสไฟฟ้ามาตรฐานนี้

บทความนี้นำเสนอความเป็นไปได้ของทรานซิสเตอร์คู่คูเปอร์เดี่ยวที่สามารถนำมาประยุกต์ใช้งานทางมาตรวิทยาในการทำตัวมาตรฐานควอนตัมกระแสไฟฟ้า บทความอธิบายถึงคุณสมบัติและการทำงานของทรานซิสเตอร์คู่คูเปอร์ รวมถึง

เทคนิคมาตรฐานในการสร้างอุปกรณ์ประจุเดี่ยว และระบบที่ใช้วัด นอกจากนี้ได้อธิบายถึงข้อจำกัดของการใช้งานทรานซิสเตอร์คู่คูเปอร์เดี่ยว และความเป็นไปได้ของการสถาปนาตัวมาตรฐานควอนตัมของกระแสไฟฟ้าที่สามารถหาความสัมพันธ์กับค่าคงที่ประจุมูลฐานได้ตามนิยามของหน่วยแอมแปร์ได้

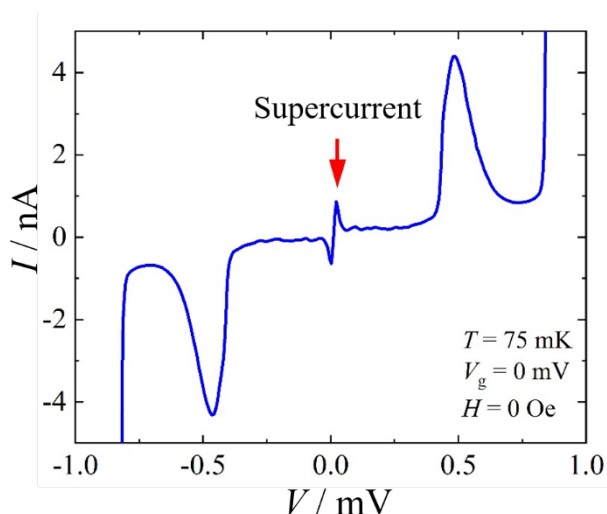
2. ทรานซิสเตอร์คู่คูเปอร์เดี่ยว

ทรานซิสเตอร์คู่คูเปอร์เดี่ยวเป็นหนึ่งในอุปกรณ์พื้นฐานที่สามารถแสดงปรากฏการณ์การขัดขวางแบบคูลอมป์ (Coulomb blockage phenomenon) [5] ซึ่งเป็นปรากฏการณ์ที่ทำให้ทรานซิสเตอร์คู่คูเปอร์เดี่ยวนี้สามารถควบคุมคู่คูเปอร์อิเล็กตรอนได้ดีที่สุด 1 คู่ ทรานซิสเตอร์คู่คูเปอร์เดี่ยวมีลักษณะโครงสร้างคล้ายกับทรานซิสเตอร์สนามไฟฟ้า (Field Effect Transistor, FET) อุปกรณ์ทรานซิสเตอร์คู่คูเปอร์เดี่ยวมีขั้วตัวนำของสารตัวนำยิ่งยวดสามขั้ว ประกอบด้วยสองรอยต่อโจเซฟสันขนาดเล็กมากต่ออนุกรม และมีขั้วเกตซึ่งคัปปลิงกับเกาะ (island) โดยขั้วเกตทำหน้าที่ควบคุมระดับพลังงานของคู่คูเปอร์อิเล็กตรอนภายในเกาะ คู่คูเปอร์อิเล็กตรอนจะทะลุผ่านเข้าและออกจากตามแรงดันไฟฟ้าที่ไบอัสที่ขั้วเกต ตามแผนภาพโครงสร้างของทรานซิสเตอร์คู่คูเปอร์เดี่ยวแสดงดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 ทรานซิสเตอร์คู่คูเปอร์เดี่ยว และสัญลักษณ์ของรอยต่อโจเซฟสัน

ทรานซิสเตอร์คู่คูเปอร์เดี่ยวจะทำงานบนพีทของกระแส supercurrent ที่ไบอัสแรงดันไฟฟ้ามีค่าใกล้เคียงศูนย์จากกราฟคุณลักษณะของทรานซิสเตอร์คู่คูเปอร์เดี่ยวแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสไฟฟ้ากับค่าแรงดันไฟฟ้า ($I - V$ curve) ดังแสดงในรูปที่ 2 [6] เป็นการแสดงความสัมพันธ์การส่งผ่านของคู่คูเปอร์อิเล็กตรอนเท่านั้นและทำงานอยู่ในระบบที่มีอุณหภูมิต่ำกว่า 100 mK ในการทำงานของทรานซิสเตอร์คู่คูเปอร์เดี่ยว เมื่อกระแส supercurrent ของทรานซิสเตอร์ถูกมอดูเลตด้วยแรงดันไฟฟ้าที่ชั่วเกิด (V_g) กระแส supercurrent ที่เกิดขึ้นจะแสดงความสัมพันธ์การส่งผ่านของคู่คูเปอร์อิเล็กตรอนที่เกาะขึ้นอยู่กับการจำนวนคู่คูเปอร์อิเล็กตรอนภายในเกาะ ซึ่งมีช่วงระยะเวลาเท่ากับ $2e/C_g$ เมื่อ C_g คือค่าความจุไฟฟ้าที่ชั่วเกิด



รูปที่ 2 กราฟคุณลักษณะระหว่างกระแสไฟฟ้ากับแรงดัน

ไฟฟ้าของทรานซิสเตอร์คู่คูเปอร์ ที่อุณหภูมิ 75 mK, แรงดันไบอัสที่ชั่วเกิด (V_g) 0 mV และสนามแม่เหล็ก 0 Oe, ลูกศรสีแดง คือ พีทของกระแส supercurrent [6]

3. การสร้างทรานซิสเตอร์คู่คูเปอร์เดี่ยวและระบบวัด

3.1 วิธีการสร้างทรานซิสเตอร์คู่คูเปอร์เดี่ยว

จากโครงสร้างของทรานซิสเตอร์คู่คูเปอร์เดี่ยวประกอบด้วยสองรอยต่อโจเซฟสัน แต่ละรอยต่อถูกคั่นด้วยเกาะและคัปปลิงด้วยชั่วเกิด ในการทดลองนี้ได้ออกแบบรอยต่อโจเซฟสันมีขนาดพื้นที่เท่ากับกว้าง 100 นาโนเมตร (nm) x ยาว 100 นาโนเมตร (nm)

และขนาดพื้นที่ของเกาะ เท่ากับกว้าง 200 นาโนเมตร (nm) x ยาว 2 ไมโครเมตร (nm) ชั่วเกิดที่คัปปลิงกับเกาะนั้นมีระยะห่าง 500 นาโนเมตร (nm) และชั่วเกิดมีขนาดกว้าง 300 นาโนเมตร (nm)

วิธีมาตรฐานที่ใช้สำหรับสร้างอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ในระดับนาโนเมตร คือเทคนิค Electron Beam Lithography (EBL) และเทคนิค Electron Gun evaporation วัสดุที่ใช้เป็นสารตัวนำยิ่งยวดในตัวอย่างทรานซิสเตอร์นี้ คือ อะลูมิเนียม (Al) จะได้รอยต่อโจเซฟสันประกอบด้วยรอยต่อของ Al/AlOx/Al ใช้เทคนิคที่เรียกว่า two-angle shadow evaporation ซึ่งมีความจำเป็นในการทำชั้น undercut โดยใช้ bi-layer resists ในขั้นตอนของการขึ้นรูปของการปลูกฟิล์มบางรอยต่อโจเซฟสันพร้อมกันด้วยสารละลาย isopropanol และน้ำ DI (deionized water) เป็นอัตราส่วน 10:1 เพื่อให้สามารถคำนวณมุมการปลูกและขนาดของฟิล์มบางได้อย่างแม่นยำขึ้น โดยความหนาของฟิล์มบาง Al ชั้นแรกและชั้นที่สอง เท่ากับ 25 นาโนเมตร และ 40 นาโนเมตร ตามลำดับ สำหรับชั้นออกไซด์ถูกขึ้นรูปหลังจากปลูกฟิล์มบางแรก โดยวิธีออกซิไดซ์ที่ผิวด้วยความกดอากาศ 3 ปาสกาล (Pa) ใช้เวลา 1 นาที และขั้นตอนสุดท้ายของการทำตัวอย่างที่ใช้ทดลองคือ กระบวนการ lift-off เพื่อขจัดส่วนอื่นที่ไม่เกี่ยวข้องกับวงจรออก ซึ่งขั้นตอนนี้ทำโดยจุ่มตัวอย่างใน acetone เป็นระยะเวลาโดยประมาณ 1 ชั่วโมง จากนั้นตรวจสอบวงจรในชิปตัวอย่างด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง การขึ้นรูปรอยต่อของ Al/AlOx/Al ด้วยเทคนิคนี้มีความเสถียรภาพที่สูง

3.2 ระบบวัด

ทรานซิสเตอร์คู่คูเปอร์เดี่ยวถูกวัดโดยใช้ระบบ compact dilution refrigerator [8] ซึ่งรักษาอุณหภูมิต่ำโดยประมาณ 80 มิลลิเคลวิน (mK) ถูกเชื่อมต่อกับอุปกรณ์และเครื่องมือวัดสัญญาณแอนะล็อกในห้องชิลล์ป้องกันสนามแม่เหล็กไฟฟ้าภายนอก ส่วนระบบปั๊มและระบบหมุนเวียนสำหรับ ^3He และ ^4He นั้นถูกเชื่อมต่อต่อซึ่งเป็นฉนวนทางไฟฟ้า การวัดสัญญาณทางไฟฟ้าของตัวอย่างด้วยเครื่องมือวัดทางแอนะล็อกไปสู่เครื่องมือวัดดิจิทัลที่ติดตั้งอยู่นอกห้องชิลล์ใช้สายแบบ low pass filters สำหรับผลการวัดของตัวอย่างจากเครื่องมือวัดดิจิทัล

เชื่อมต่อด้วยสาย optical fiber ถูกบันทึกโดยโปรแกรมวัดที่พัฒนาเองด้วยโปรแกรม LabVIEW

สำหรับการวัดทางไฟฟ้าของทรานซิสเตอร์ ทำการวัดโดยจ่ายแรงดันไฟฟ้าไบอัสสมมาตรเทียบกับกราวด์ และใช้วิธีการวัดแบบสี่สายระหว่างขั้วซอสและขั้วเดรนของทรานซิสเตอร์สำหรับการวัดความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าของตัวอย่าง สำหรับการวัดลักษณะสมบัติการส่งผ่านของคูคูเปอร์อิเล็กตรอนที่เกาะ ซึ่งเป็นความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าที่ชั่วเกิด ($I-V_g$) โดยจ่ายแรงดันไบอัสที่ชั่วเกิดในขณะที่ไบอัสแรงดันไฟฟ้าที่พืทของกระแส supercurrent

4. วิธีดำเนินการ

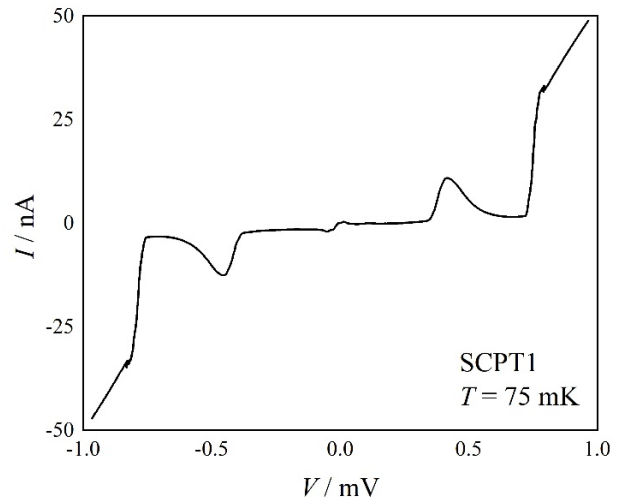
ค่าตัวแปรที่สำคัญของทรานซิสเตอร์คูคูเปอร์เดี่ยวแสดงในตารางที่ 1 ค่าความต้านทานรอยต่อโจเซฟสัน R_T และค่าความจุของรอยต่อโจเซฟสัน C ได้มาจากการวัดเส้นกราฟกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าของทรานซิสเตอร์คูคูเปอร์ที่ไบอัสของแรงดันไฟฟ้าที่สูงขึ้น ค่าพลังงานโจเซฟสันคัปปีง E_J ถูกคำนวณโดยใช้สมการ Ambegaokar-Baratoff [7] กับค่าพลังงาน superconducting gap ของตัวอย่างฟิล์ม Al ประมาณ 150 – 170 ไมโครอิเล็กตรอนโวลต์ (μeV) สำหรับค่าความเก็บประจุที่ชั่วเกิด C_g นั้นสามารถคำนวณจากการวัดลักษณะสมบัติการส่งผ่านคูคูเปอร์อิเล็กตรอนด้วยความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าที่ชั่วเกิด สำหรับค่าพลังงานอัดประจุ (charging energy, E_C) มีค่าเท่ากับ $E_C = e^2/2C_\Sigma$ โดยที่ $C_\Sigma = 2C + C_g$

ตารางที่ 1 คุณสมบัติคอมพิวเตอร์แม่ข่าย

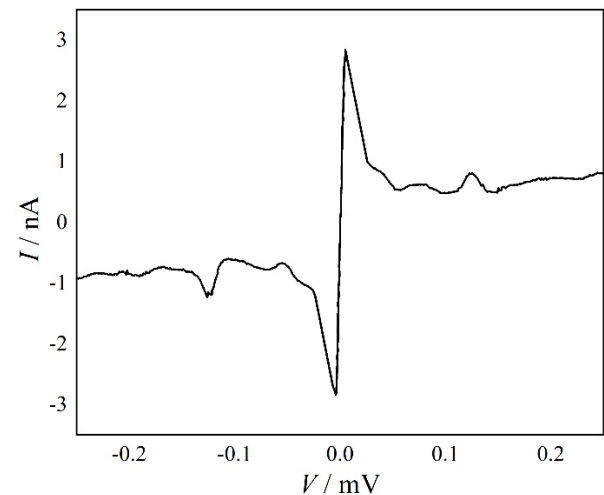
Device	$R_T/k\Omega$	C/fF	C_g/fF	$E_J/\mu\text{eV}$	$E_C/\mu\text{eV}$
SCPT1	7.3	0.8	0.42	66	40

ผลการวัดความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้าของตัวอย่างทรานซิสเตอร์คูคูเปอร์ที่ไบอัสด้วยแรงดันไฟฟ้าถึง 1 มิลลิโวลต์ (mV) และที่ไบอัสด้วยแรงดันไฟฟ้าช่วงใกล้ค่าศูนย์ แสดงถึงพืทของกระแส supercurrent ที่มีความสัมพันธ์กับการส่งผ่านของคูคูเปอร์อิเล็กตรอน ดังแสดงรูปที่ 3 และ 4 ตามลำดับ และความสัมพันธ์ระหว่างกระแสที่พืทของ

กระแส supercurrent และแรงดันไฟฟ้าที่ชั่วเกิด ดังแสดงรูปที่ 5 และ 6 ตามลำดับ



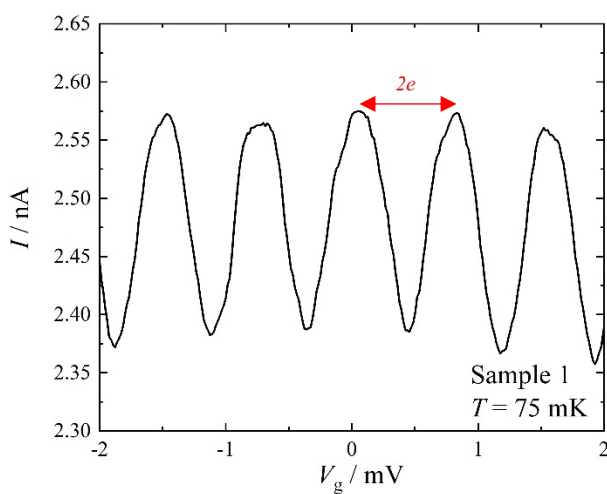
รูปที่ 3 กราฟผลการวัดระหว่างกระแสไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้าของ SCPT1 และวงกลมแสดงพืทของกระแส supercurrent



รูปที่ 4 กราฟผลการวัดระหว่างกระแสไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้าของ SCPT1 แสดงพืทของกระแส supercurrent

จากผลความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้าของ SCPT1 แสดงกระแส supercurrent ที่ไบอัสแรงดันไฟฟ้าใกล้ศูนย์ จากตัวอย่างที่ใช้ทดลองมีค่าเท่ากับ 3 นาโนแอมแปร์ (nA) และที่ไบอัสแรงดันไฟฟ้าที่ 0.48 โวลต์ แสดงพืทของโจเซฟสันควอซิพาร์ติเคิล (Josephson quasiparticle, JQP) ซึ่งเป็นการความสัมพันธ์ของการส่งผ่านของคูคูเปอร์อิเล็กตรอนและ

อิเล็กตรอน เมื่อแรงดันไฟฟ้าที่สูงขึ้นกระแสไหลเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วและสัมพันธ์กับแรงดันไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้น เป็นไปตามความสัมพันธ์ของกฎของโอห์ม (Ohm's law) ผลการวัดความสัมพันธ์ระหว่างกระแสที่พืทของกระแส supercurrent ของ SCPT1 และแรงดันไฟฟ้าที่ชั่วเกิด แสดงความสัมพันธ์การส่งผ่านของคูเปอร์อิเล็กตรอน มีช่วงคาบการสั้นเท่ากับช่วงของการส่งผ่าน $2e$ ซึ่งคูเปอร์อิเล็กตรอนผ่านรอยต่อด้วยความถี่เท่ากับ 16 จิกะเฮิรตซ์

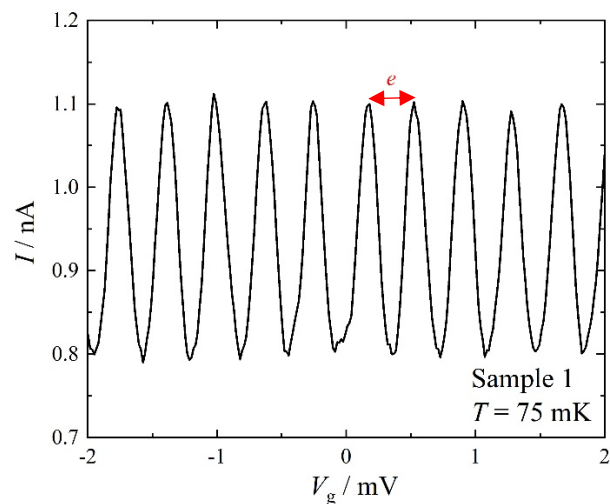


รูปที่ 5 กราฟผลการวัดระหว่างกระแสที่พืทของกระแส supercurrent และแรงดันไฟฟ้าที่ชั่วเกิดของ SCPT1 ที่มีช่วงคาบเท่ากับ $2e$ แสดงให้เห็นของการเกิดปรากฏการณ์การขัดขวางแบบคูลอมป์

รูปที่ 5 แสดงผลการวัดความสัมพันธ์ระหว่างกระแสที่ไบอัสแรงดันไฟฟ้าที่ 0.13 มิลลิโวลต์ (mV) และแรงดันไฟฟ้าที่ชั่วเกิดของกราฟระหว่างกระแสไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้าของ SCPT1 แสดงให้เห็นความสัมพันธ์การส่งผ่านของอิเล็กตรอน ช่วงคาบการสั้นแสดงว่าช่วงของการส่งผ่าน e ซึ่งช่วงคาบมีค่าเป็นครึ่งหนึ่งของที่ไบอัสที่ชั่วเกิดที่พืทกระแส supercurrent

จากผลการทดลองของตัวอย่างอุปกรณ์ SCPT1 ค่าของกระแส supercurrent มีค่าน้อยเมื่อเทียบวงจรของตัวนำยิ่งยวดอื่นๆ และเพื่อที่ให้งานสามารถทำงานร่วมกันได้กับวงจรของตัวนำยิ่งยวดอื่นๆนั้น การเพิ่มขนาดของกระแส supercurrent สามารถทำได้จากการออกแบบวงจรทรานซิสเตอร์คูเปอร์เดี่ยว

โดยการปรับเพิ่ม/ลดของค่าพารามิเตอร์ของคุณสมบัติของรอยต่อโจเซฟสันได้ หรือนำทรานซิสเตอร์คูเปอร์เดี่ยวมาต่อขนานกันก็สามารถที่เพิ่มค่ากระแส supercurrent ได้ที่มีคุณสมบัติของรอยต่อโจเซฟสันเดียวกัน สามารถเพิ่มขนาดของกระแส supercurrent เพิ่มขึ้นเป็นเท่าของจำนวนทรานซิสเตอร์ที่นำมาต่อขนานกันเทียบกับหนึ่งทรานซิสเตอร์ [9]



รูปที่ 6 กราฟผลการวัดระหว่างกระแสที่แรงดันไฟฟ้าไบอัส 0.13 mV และแรงดันไฟฟ้าที่ชั่วเกิดของ SCPT1 มีช่วงคาบเท่ากับ e

5. สรุป

อุปกรณ์ประจุเดี่ยวเป็นอุปกรณ์ที่อาศัยความไม่ต่อเนื่องของประจุอิเล็กตรอน ลักษณะดังกล่าวจะสามารถค้นพบในปรากฏการณ์การขัดขวางแบบคูลอมป์ ทรานซิสเตอร์คูเปอร์เดี่ยวเป็นอุปกรณ์พื้นฐานหนึ่งที่สามารถแสดงควบคุมการส่งผ่านของคูเปอร์อิเล็กตรอนที่ละคู่ได้ ซึ่งเป็นการใช้งานของความเป็นอิสระของประจุไปในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ตัวนำยิ่งยวดได้ การควบคุมให้คูเปอร์อิเล็กตรอนแต่ละคู่ให้สามารถเคลื่อนที่ผ่านรอยต่อการทะลุผ่านของทรานซิสเตอร์คูเปอร์เดี่ยวทำได้โดยไบอัสแรงดันไฟฟ้าที่ชั่วเกิด เพื่อควบคุมระดับพลังงานภายในเกาะ การเพิ่มหรือลดพลังงานเท่ากับพลังงานการเพิ่มประจุที่เกาะ การเปลี่ยนแปลงระดับพลังงานคูเปอร์อิเล็กตรอนแต่ละคู่ในเกาะจะส่งผลต่อกระแสที่เกิดจากการทะลุผ่านของคูเปอร์อิเล็กตรอนแต่ละคู่อย่างมีนัยสำคัญ

ดังนั้นทรานซิสเตอร์คู่คูเปอร์เดี่ยวจึงมีความเป็นไปได้ที่สามารถนำมาประยุกต์ใช้ในงานมาตรวิทยาในการนำมาใช้เป็นอุปกรณ์มาตรฐานการวัดทางด้านกระแสไฟฟ้าในหน่วยวัดแอมแปร์ ซึ่งเป็นหน่วยหลักของหน่วยมูลฐาน SI ที่มีความแม่นยำสูงในระดับ 10^{-9} ได้ นอกจากนั้นยังสามารถที่ยังประยุกต์ใช้งานทางด้านตัวมาตรฐานการวัดทางด้านอุณหภูมิได้อีกด้วย [10]

6. กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอขอบคุณ UEC Research Facilities, The University of Electro-Communications, UEC, Tokyo สำหรับอุปกรณ์สำคัญในการขึ้นรูปออกแบบของทรานซิสเตอร์คู่คูเปอร์เดี่ยว และ Experimental Mesoscopic Physics Group, Department of Engineering Science, UEC ของศาสตราจารย์อิโรชิ ชิมาดะ สำหรับวัสดุที่ใช้สร้างทรานซิสเตอร์และระบบวัดที่อุณหภูมิต่ำ compact dilution refrigerator และขอขอบคุณฝ่ายมาตรวิทยาไฟฟ้า สถาบันมาตรวิทยาแห่งชาติ ที่สนับสนุนให้ศึกษาและทำงานวิจัยเพื่อนำไปพัฒนาตัวมาตรฐานทางการวัดด้านไฟฟ้า

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] D. B. Newell, F. Cabiati, J. Fischer, K. Fujii, S. G. Karshenboim, H. S. Margolis, E. de Mirandes, P. J. Mohr, F. Nez, K. Pachucki, T. J. Quinn, B. N. Taylor, M. Wang, B. M. Wood, and Z. Zhang, "The CODATA 2017 Values of h , e , k and NA for the Revision of the SI," *Metrologia*, vol. 55, pp. L13, 2018.
- [2] L. Tosi, D. Vion, and H. le Sueur, "Design of a Cooper-pair box electrometer for application to solid-state and astroparticle physics," *Physical Review Applied*, vol. 11, pp. 054072, 2019.
- [3] J. Tanarom, T. Watanabe, Y. Mizugaki, and H. Shimada, "Sensitive phonon detection using a single Cooper-pair transistor," *Applied Physics Express*, Vol 15, pp. 064001, 2022.
- [4] L. Fricke, M. Wulf, B. kaestnes, F. Hohls, P. Mirovsky, B. Mackrodt, R. Dolata, T. Weimann, K. Pierz, U. Siegner, and H. W. Schumacher, "Self-Referenced Single-Electron Quantized Current Source," *Physical Review Letters*, vol. 112, pp. 226803, 2014.
- [5] H. Grabert, and M. H. Devoret, "Single Charge Tunneling: Coulomb Blockade Phenomena in Nanostructures," Springer Science + Business Media, LLC, 1992.
- [6] J. Tanarom, Y. Mizugaki, and H. Shimada, "Detection of phonons with a single Cooper-pair transistor," The Superconducting Electronics group conference of the Institute of Electronics, Information and Communication Engineers, IEICE-SCE 2021, August 2021.
- [7] V. Ambegaokar and A. Baratoff, "Tunneling between superconductors," *Physical Review Letters*, vol.10, [Errata 11, p.104 (1963)], pp. 486, 1963.
- [8] Y. Ootuka, T. Uchiyama, and H. Shimada, "One-day dilution refrigerator," *Cryogenics*, 33, p.923, 1993.
- [9] J. Tanarom, Y. Mizugaki, and H. Shimada, "Scalability of supercurrent modulable with single Cooper-pair transistors connected in parallel," *Japanese Journal of Applied Physics*, vol. 60, pp. 074003, 2021.
- [10] W. Nawrocki, Introduction to Quantum Metrology: Quantum Standards and Instrumentation, in book chapter, Single Electron Tunneling, Springer, pp. 173-185, 2007.