การจำลองทรานซิสเตอร์คู่คูเปอร์เดี่ยวสำหรับเป็นเครื่องตรวจจับฟลักซ์แม่แหล็ก

The simulation of single Cooper pair trasistor for megnetic flux detector

จุฑารัตน์ ทานะรมณ์

Jutarat Tanarom

กลุ่มงานมาตรฐานปฐมภูมิไฟฟ้า เวลาและความถี่ ฝ่ายมาตรวิทยาไฟฟ้า สถาบันมาตรวิทยาแห่งชาติ

Primary Electrical, Time and Frequency group, Electrical Metrology Department,

National Institute of Metrology,Thailand

***Corresponding Author E-mail**: jutarat@nimt.or.th

Received: 15/08/24, **Revised**: 2/10/24, **Accepted**: 4/10/24

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการศึกษาเกี่ยวกับลักษณะของทรานซิสเตอร์คู่คูเปอร์เดี่ยว เมื่อถูกนำไปติดตั้งในวงจร Superconducting Quantum Interface Device, SQUID เป็นอุปกรณ์ตรวจจับสนามแม่เหล็กที่มีความไวสูงมาก โดยมีตรวจสอบความสมดุลของเฟสผ่านทรานซิสเตอร์คู่คูเปอร์เดี่ยว เมื่อกระแสโจเซสสันไหล และการสำรวจการปรับแต่งกระแสซุปเปอร์ของทรานซิสเตอร์คู่คูเปอร์เดี่ยวในวงจรที่มีลูปพ่วงกับแรงดันเกต การทราบพฤติกรรมของทรานซิสเตอร์คู่คูเปอร์เดี่ยวในโครงสร้างลูปนี้มีความสำคัญสำหรับการผสมผสานกับวงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่เป็นสารตัวนำยิ่งยวดอื่น ๆ ในงานวิจัยนี้ได้ทำการจำลองทรานซิสเตอร์คู่คูเปอร์เดี่ยวในหนึ่งสาขาของวงจรลูป SQUID ผลการจำลองพบว่าทรานซิสเตอร์คู่คูเปอร์เดี่ยว สามารถนำมาใช้เป็นสวิตช์กระแสซุปเปอร์ได้

คำสำคัญ: ทรานซิสเตอร์คู่คูเปอร์เดี่ยว ปรากฏการณ์การขัดขวางแบบคูลอมป์ ฟลักซ์แม่เหล็ก

Abstract

This article presents a study on the characteristics of single Cooper-pair transistors when integrated into a Superconducting Quantum Interface Device (SQUID) circuit. SQUID is a highly sensitive magnetometer that uses phase balance checks through single Cooper-pair transistors when Josephson currents flow. The study explores the tuning of the supercurrent of the single Cooper-pair transistors in a circuit with a loop coupled to gate voltage. Understanding the behavior of single Cooper-pair transistors in this loop structure is crucial for integrating them with other superconducting electronic circuits. The research includes simulations of the single Cooper-pair transistor in one branch of a SQUID loop circuit. The simulation results indicate that single Cooper-pair transistors can be used as superconducting current switches.

Keywords: single Cooper-pair transistor, Coulomb blockage phenomenon, magnetic flux

1. บทนำ

เทคนิคการผลิตอุปกรณ์ในระดับนาโนทำให้เกิดการควบคุมการเคลื่อนที่ของประจุเดี่ยวในอุปกรณ์ของแข็งเป็นไปได้ โดยเฉพาะอุปกรณ์ประจุเดี่ยว เช่น อุปกรณ์คู่ควบเดี่ยว ได้รับการศึกษามาอย่างเข้มข้นในช่วงปี1990 และ 2000 [1-2] อุปกรณ์ประจุเดี่ยวมีแอปพลิเคชันพื้นฐานที่สำคัญเนื่องจากความสามารถในการจัดการกับอิเล็กตรอนและคู่คูเปอร์เดี่ยวอย่างเฉพาะเจาะจง อุปกรณ์เหล่านี้ได้รับการเสนอเพื่อใช้ในแอปพลิเคชันจริง เช่น หน่วยความจำและอุปกรณ์ตรรกะในวงจรรวมนั้นคือการประดิษฐ์บิตควอนตัมซุปเปอร์คอนดักเตอร์ซึ่งประกอบด้วยรอยต่อโจเซฟสัน [3]

ทรานซิสเตอร์คู่คูเปอร์เดี่ยว (SCPT) เป็นอุปกรณ์พื้นฐานที่มีโครงสร้างคล้ายกับทรานซิสเตอร์ฟิลด์เอฟเฟกต์ (FET) และเป็นอุปกรณ์ซุปเปอร์คอนดักเตอร์สามขั้วที่ประกอบด้วยรอยต่อโจเซฟสันขนาดเล็กสองอนุกรมกันและขั้วเกตที่เชื่อมต่อแบบกักเก็บกับเกาะระหว่างรอยต่อโจเซฟสันทั้งสอง อุปกรณ์ SCPT ทำงานบนกระแสซุปเปอร์ใกล้แรงดันศูนย์ที่สถานะตัวนำยิ่งยวด และสามารถรวมกระบวนการส่งผ่านแบบไฮบริดที่ไม่สอดคล้องกันระหว่างควอซิพาร์ติเคิลและคู่คูเปอร์ควบที่แรงดันสูง ความเป็นไปได้ในการนำ SCPTs มาใช้ในร่วมกับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์อื่นๆ นั้นได้จริง จึงเป็นที่น่าสนใจมาก

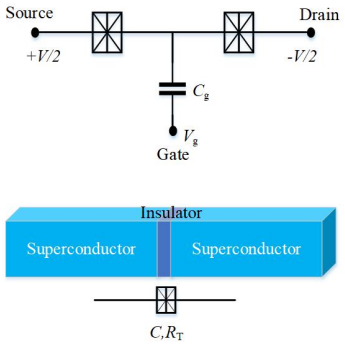
บทความนำเสนอการศึกษาเกี่ยวกับลักษณะของทรานซิสเตอร์คู่คูเปอร์เดี่ยว เมื่อนำไปใส่ในลูปที่มีลักษณะคล้ายอุปกรณ์ควอนตัมการแทรกแซงซูเปอร์คอนดักเตอร์กระแสตรง Superconducting Quantum Interface Device (SQUID) โดยศึกษาการตรวจสอบความสอดคล้องของเฟสผ่าน SCPT เมื่อกระแสโจเซฟสันไหล และการตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงกระแสซุปเปอร์ของ SCPT ในลูปที่มีแรงดันเกตเป็น

พารามิเตอร์ เนื่องจาก SCPT มีความไวในการตรวจจับสูงที่ $10^{-7} e/\sqrt{\text{Hz}}$ [3] จึงสามารถนำมาใช้ร่วมกับวงจรที่เรียกว่า Rapid Single Flux Quantum (RSFQ) และวงจร SQUID ใช้โครงสร้างลูปซุปเปอร์คอนดักเตอร์ได้ การจำลองพฤติกรรมของ SCPT ในโครงสร้างลูปดังกล่าวจึงมีความสำคัญสำหรับการผสมผสานกับวงจรอิเล็กทรอนิกส์ซุปเปอร์คอนดักเตอร์อื่น ๆ โดยฝัง SCPT ไว้ในหนึ่งสาขาของลูป dc-SQUID

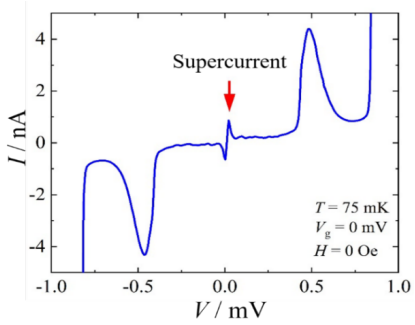
2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 ทรานซิสเตอร์คู่คูเปอร์เดี่ยว

ทรานซิสเตอร์คู่คูเปอร์เดี่ยว (Single Cooper pair transistor, SCPT) เป็นหนึ่งในอุปกรณ์พื้นฐานที่สามารถแสดงปรากฏการณ์การขัดขวางแบบคูลอมป์ (Coulomb blockage phenomenon) [4] ซึ่งเป็นปรากฏการณ์ที่ทำให้ทรานซิสเตอร์คู่คูเปอร์เดี่ยวนี้สามารถควบคุมคู่คูเปอร์อิเล็กตรอนได้ที่ละ 1 คู่ ทรานซิสเตอร์คู่คูเปอร์เดี่ยวมีขั้วตัวนำของสารตัวยิ่งยวดสามขั้ว ประกอบด้วย สองรอยต่อโจเซฟสันขนาดเล็กมากต่ออนุกรม และมีขั้วเกตซึ่งคับปิ้งกับเกาะ (island) โดยขั้วเกต ทำหน้าที่ควบคุมระดับพลังงานของคู่คูเปอร์อิเล็กตรอนภายในเกาะคู่คูเปอร์อิเล็กตรอนจะทะลุผ่านเข้าและออกจากตามแรงดันไฟฟ้าที่ไบอัสที่ขั้วเกต ตามแผนภาพโครงสร้างของทรานซิสเตอร์คู่คูเปอร์เดี่ยวแสดงดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 ทรานซิสเตอร์คู่คูเปอร์เดี่ยว และสัญลักษณ์ของรอยต่อโจเซฟสัน

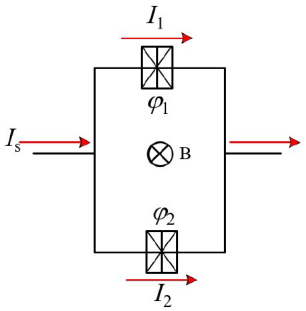


รูปที่ 2 กราฟคุณลักษณะระหว่างกระแสไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้าของทรานซิสเตอร์คู่คูเปอร์ ที่อุณหภูมิ 75 mK, แรงดันไบอัสที่ขั้วเกต 0 mV และสนามแม่เหล็ก 0 Oe, ลูกศรสีแดง คือ พีทของกระแสซุปเปอร์ [5-6]

ทรานซิสเตอร์คู่คูเปอร์เดี่ยวจะทำงานบนพีทของกระแสซุปเปอร์ (supercurrent) ที่ไบอัสแรงดันไฟฟ้ามีค่าใกล้ค่าศูนย์จากกราฟคุณลักษณะของทรานซิสเตอร์คู่คูเปอร์เดี่ยวแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสไฟฟ้ากับค่าแรงดันไฟฟ้า ($I-V$ curve) ดังแสดงในรูปที่ 2 [5-6] เป็นการแสดงความสัมพันธ์การส่งผ่านของคู่คูเปอร์อิเล็กตรอนเท่านั้นและทำงานอยู่ในระบบที่มีอุณหภูมิต่ำกว่า 100 mK ในการทำงานของทรานซิสเตอร์คู่คูเปอร์เดี่ยว เมื่อกระแส supercurrent ของทรานซิสเตอร์ถูกมอดูเลตด้วยแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วเกต (V_g) กระแสซุปเปอร์ที่เกิดขึ้นจะแสดงความสัมพันธ์การส่งผ่านของคู่คูเปอร์อิเล็กตรอนที่เกาะขึ้นอยู่กับจำนวนคู่คูเปอร์อิเล็กตรอนภายในเกาะซึ่งมีช่วงระยะเวลาเท่ากับ $2e/C_g$ เมื่อ C_g คือค่าความจุไฟฟ้าที่ขั้วเกต

2.2 อุปกรณ์ควอนตัมการแทรกแซงซูเปอร์คอนดักเตอร์กระแสตรง

อุปกรณ์ควอนตัมการแทรกแซงซูเปอร์คอนดักเตอร์กระแสตรง (dc-SQUID) ประกอบด้วยลูปซูเปอร์คอนดักเตอร์ที่ถูกขัดจังหวะด้วยรอยต่อโจเซฟสันสองรอยต่อที่เชื่อมต่อกันแบบขนานตามที่แสดงในรูปที่ 3 โดยทั่วไปแล้ว DC-SQUID ใช้เป็นแม่เหล็กเซนเซอร์ที่มีความไวสูงมาก



รูปที่ 3 แผนภาพของ dc-SQUID: กระแสที่นำไปใช้จะแบ่งออกเป็นสองส่วน I_1 และ I_2 ภายใต้สนามแม่เหล็ก ความแตกต่างของเฟสสำหรับจังก์ชันทั้งสอง คือ φ_1 และ φ_2 ตามลำดับ

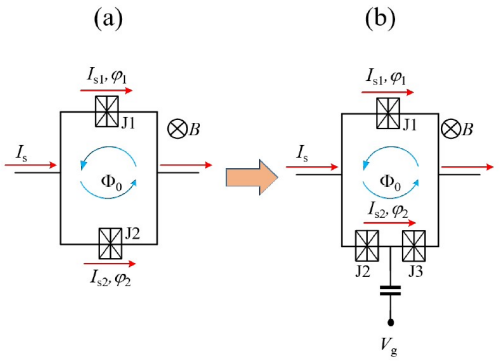
ฟิสิกส์ของ dc-SQUID พิจารณาได้จากกระแสวิกฤต I_c มีค่าเท่ากัน ซึ่งจะแยกออกเป็นกระแส I_1 และ I_2 ผ่านรอยต่อโจเซฟสัน 1 และ 2 ตามลำดับ ความแตกต่างของเฟสรอยต่อโจเซฟสัน 1 และ 2 จะถูกระบุด้วย φ_1 และ φ_2 ตามลำดับ ตามกฎของเคอร์ชอฟฟ์ (Kirchhoff's Law) กระแสไบอัสจะต้องเท่ากับผลรวมของ I_1 และ I_2 ดังนั้น

$$I_s = I_c[\sin\varphi_1 + \sin\varphi_2] \qquad (1)$$

ความแตกต่างของเฟสตกคร่อมรอยต่อโจเซฟสันทั้งสองสามารถแสดงเป็น $\varphi_2 - \varphi_1 = 2\pi n + 2\pi\dfrac{\Phi}{\Phi_0}$, โดยที่ $\Phi_0 = h/2e$ คือ ควอนตัมฟลักซ์ซูเปอร์คอนดักเตอร์ จะได้

$$I_s = 2I_c \cos\left(\pi \frac{\Phi}{\Phi_0}\right) \sin\left(\varphi_2 + \pi \frac{\Phi}{\Phi_0}\right) \quad (2)$$

3. การจำลองทรานซิสเตอร์คู่คูเปอร์เดี่ยวสำหรับตรวจจับฟลักซ์แม่เหล็ก

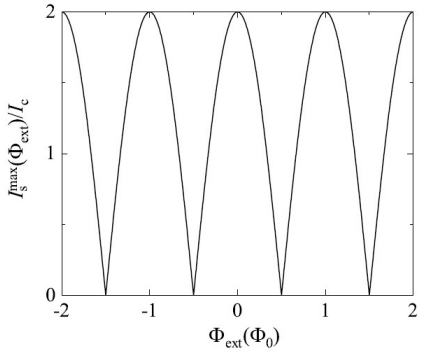


รูปที่ 4 (a) วงจรเทียบเท่าของ dc-SQUID ที่มีโจเซฟสันจังก์ชันสองตัว (b) วงจรเทียบเท่าของลูปแบบ dc-SQUID ที่มีการฝัง SCPT ไว้ในหนึ่งสาขา

เมื่อ SCPT ถูกแทรกเข้าไปในวงจรซุปเปอร์คอนดักเตอร์ เช่น วงจร RSFQ คุณสมบัติความสอดคล้องของกระแสซุปเปอร์ผ่าน SCPT เป็นสิ่งสำคัญ เพื่อทดสอบความสอดคล้องผ่านวงจรซุปเปอร์คอนดักเตอร์ที่มี SCPT ฝังอยู่ จึงจำลองสร้าง SQUID กระแสตรง ซึ่งรอยต่อโจเซฟสันหนึ่งจุดถูกแทนที่ด้วย SCPT ขนาดของกระแสซุปเปอร์สูงสุดผ่านวงจร SQUID ถูกคำนวณโดยการเปลี่ยนแปลงฟลักซ์แม่เหล็กผ่านวงจรและแรงดันเกต กระแสโจเซฟสันรวมทั้งหมดที่ผ่านวงจร dc-SQUID แบบง่ายตามที่แสดงในรูปที่ 3(a) คือ

$$I_s = I_{s1} + I_{s2} = I_{c1} \sin\varphi_1 + I_{c2} \sin\varphi_2 \quad (3)$$

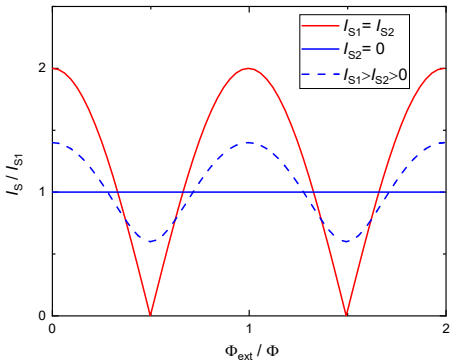
โดยที่ I_{c1} และ I_{c2} คือกระแสวิกฤตของรอยต่อโจเซฟสันที่ 1 และ 2 ตามลำดับ และ φ_1 และ φ_2 คือ ความแตกต่างของเฟสที่ข้ามจังก์ชันที่ 1 และ 2 ตามลำดับ ถ้าฟลักซ์ Φ กำลังไหลผ่านลูปเนื่องจากฟลักซ์ภายนอก Φ_{ext} และ $I_{c1} = I_{c2} = I_c$ กระแสซุปเปอร์สูงสุดจะเป็นดังสมการและแสดงความสัมพันธ์รูปที่ 5 ดังนี้



รูปที่ 5 กระแสวิกฤต I_{s_max} ของ DC SQUID เทียบกับฟลักซ์แม่เหล็กภายนอกในหน่วยของฟลักซ์ควอนตัม

$$I_{s_max} = 2I_c \left|\cos \pi \frac{\Phi_{ext}}{\Phi_0}\right| \quad (4)$$

จากรูปที่ 6 แสดงผลการคำนวณของกระแสซุปเปอร์วิกฤต I_{s_max} ผ่านลูปเป็นฟังก์ชัน Φ_{ext} เส้นโค้งสีแดงแสดงกรณีที่ $I_{S1} = I_{S2}$ และเส้นโค้งสีน้ำเงินประสอดคล้องกับกรณีที่ $I_{S1} > I_{S2} > 0$ เส้นโค้งสีน้ำเงินแสดงกรณีที่อยู่ระหว่างนั้น สำหรับกรณีที่ $I_{S2} = 0$ สามารถถือได้ว่าลูปซุปเปอร์คอนดักเตอร์เปิดอยู่ในสาขาหนึ่งเนื่องจากไม่มีการมอดูเลตสนามแม่เหล็ก



รูปที่ 6 พฤติกรรมที่คำนวณของกระแสซุปเปอร์ในลูปฝัง SCPT ที่สัมพันธ์กับฟังก์ชันของฟลักซ์แม่เหล็กภายนอก

4. ผลการจำลองและการวิเคราะห์

จากการพิจารณากรณีที่ SCPT ถูกฝังอยู่ในหนึ่งในสาขาของ SQUID แทนที่จะเป็นรอยต่อโจเซฟสันเดียวตามที่แสดงในรูปที่ 3(b) ซึ่งเรียกจุดเชื่อมต่อทั้งสองใน SCPT ว่า จุดเชื่อมต่อ 2 และ 3 และสมมติว่าพลังการเชื่อมต่อโจเซฟฟสันของรอยต่อทั้งสองคือ E_{J2} และ E_{J3} ตามลำดับ ความแตกต่างของเฟสข้ามรอยต่อทั้งสองคือ φ_{J2} และ φ_{J3} ตามลำดับ และ $\varphi_{J2} + \varphi_{J3} = \varphi_2$ รอยต่อทั้งสองมีความจุ C_2 และ C_3 และความจุที่ขั้วเกตคือ C_g ผลรวมของพวกเขาคือ $C_\Sigma = C_2 + C_3 + C_g$ เมื่อ $E_{J2,J3} \ll E_c$ จะได้สมการง่ายๆ สำหรับ I_{s2} โดยใช้ทฤษฎี [7-8]

$$I_{s2} = \frac{2e}{\hbar} \frac{E_{J2}E_{J3}\sin\varphi_2}{\sqrt[4]{(eC_g/C_\Sigma)^2 (V_g - V_g^{(n)})^2 + E_J^2(\varphi_2)/4}} \quad (5)$$

เมื่อ $E_J(\varphi_2) = \left[E_{J2}^2 + E_{J3}^2 + 2E_{J2}E_{J3}\cos\varphi_2\right]^{1/2}$

และเมื่อมีการนำฟลักซ์แม่เหล็กภายนอกมาผ่านวงแหวน ความสัมพันธ์ระหว่าง φ_1 และ φ_2 จะเป็น

$$\varphi_2 - \varphi_1 = 2\pi n + 2\pi \frac{\Phi_{ext}}{\Phi_0} \quad (6)$$

โดยที่ $\Phi_0 = h/2e$ คือ ฟลักซ์ควอนตัม กระแสทั้งหมดที่ไหลผ่านลูปคือ

$$I_s = I_{c1}\sin\left(\varphi_2 - \frac{2\pi\Phi_{ext}}{\Phi_0}\right) + I_{c2}\sin\left(\frac{\varphi_2}{2}\right) \quad (7)$$

โดยที่ I_{c2} เท่ากับ $eE_J/2\hbar$ สำหรับ $0 \le \varphi_2 \le \pi$ และ $-eE_J/2\hbar$ เท่ากับ $\pi \le \varphi_2 \le 2\pi$ สำหรับความหนาแน่นของฟลักซ์แม่เหล็กภายนอก B_{ext} ซึ่ง Φ_{ext}/Φ_0 ถูกแสดงเป็น B_{ext}/B_0 โดยที่ $\Phi_0 = B_0 A$ โดยที่ A คือพื้นที่ของวงแหวน ดังนั้นกระแสโจเซฟสันทั้งหมด (รูปที่ 3(b)) จะมีลักษณะเป็นช่วงตามสนามแม่เหล็กที่ใช้ B_{ext} เมื่อไม่มีแรงดัน กระแสซูเปอร์สูงสุด I_{s_max} จะหาได้จากสมการ (5) ตาม φ_2 จากผลการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของกระแสที่ไหลในลูปที่มี SCPT จะมีลักษณะเป็นไปดังรูปที่ 6 การใช้ SCPT ที่มีค่ามอดูเลตสูง ~ ι จึงสามารถเปิดและปิดลูปซุปเปอร์คอนดักเตอร์ด้วยแรงดันเกตได้ ดังนั้น การใช้ SCPT ที่มีความสามารถเปิดและปิดวงจรซูเปอร์คอนดักเตอร์ด้วยแรงดันเกตจากการตรวจสอบฟังก์ชันการสลับกระแสซูเปอร์ของ SCPT ได้

5. สรุป

บทความนี้ได้กล่าวถึงการศึกษาคุณสมบัติของกระแสซุปเปอร์ผ่านวงจรแบบ SQUID ที่มีสาขาหนึ่งเป็นรอยต่อโจเซฟสันจำนวนหนึ่งรอยต่อและอีกสาขาหนึ่งเป็นทรานซิสเตอร์คู่คูเปอร์เดี่ยว จากผลการจำลองพบว่าทรานซิสเตอร์คู่คูเปอร์เดี่ยวสามารถนำมาใช้เป็นสวิตช์กระแสเซียนได้ อย่างไรก็ตาม เมื่อออกแบบวงจรที่ใช้ทรานซิสเตอร์คู่คูเปอร์เดี่ยวในวงจรตัวนำยิ่งยาวจำเป็นต้องพิจารณาการผันผวนของอิเล็กตรอนที่มีผลต่อการตรวจจับ

6. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ ดร.พลอยบุศรา โกมาสังข์ ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม สำหรับคำแนะนำทางด้านวงจรไฟฟ้า และฝ่ายมาตรวิทยาไฟฟ้า สถาบันมาตรวิทยาแห่งชาติที่สนับสนุนให้ศึกษาและทำงานวิจัยเพื่อนำไปพัฒนาตัวมาตรฐานทางการวัดด้านไฟฟ้า

เอกสารอ้างอิง

[1] L. J. Geerligs, V. F. Anderegg, J. Romijn, and J. E. Mooij, “Single cooper-pair tunneling in small-capacitance junctions," *The Journal of Physical Review Letters*, vol. 65, no. 3, Jul., pp. 377 - 380, 1990.

[2] M. T. Tuominen, J. M. Hergenrother, T. S. Tighe, and M. Tinkham, “Experimental evidence for parity-based 2e periodicity in a superconducting single electron tunneling transistor," *The Journal of Physical Review Letters*, vol. 69, no. 13, Jul., pp. 1997 - 2000, 1992.

[3] L. Tosi, D. Vion, and H. le Sueur, “Design of a cooper-pair box electrometer for application to solid-state and astroparticle physics,” *Phys. Rev. Applied 11*, p. 054072, 2019.

[4] Y. Nakamura, Y. Pashkin, and J.-S. Tsai, “Coherent control of macroscopic quantum states in a single-cooper-pair box," *The Journal of Nature*, vol. 398, no. 6730, Apr., pp. 786–788, 1999.

[5] J. Tanarom, T Watanabe, Y. Mizugaki, and H. Shimada, “Sensitive phonon detection using a single Cooper-pair transistor,” *The Journal of Applied Physics Express*, vol. 15, no. 6, May., pp. 064001, 2022.

[6] J. Tanarom, Y. Mizugaki, and H. Shimada, “Detection of phonons with a single Cooper-pair transistor,” In *2021 Proc. International Conference on the Superconducting Electronics group conference of the Institute of Electronics, Information and Communication Engineers*, 2021, pp. 10 – 13 .

[7] V. Ambegaokar and A. Baratoff, “Tunneling between superconductors," *The Journal of Physical Review Letters*, vol. 10, no. 11, Jun., pp. 486, 1963.

[8] L. I. Glazman, F. W. J. Hekking, K. A. Matveev, and R. I. Shekhter, " Charge parity in Josephson tunneling through a superconducting grain," *Journal of Physica B: Condensed Matter*, vol. 203, no. 3-4, Feb., pp. 316-326, 1994.