

แรงดันไฟฟ้ามาตรฐานโจเซฟสัน (Josephson Voltage Standard, JVS)

ต่อจากฉบับที่แล้ว

สิริศักดิ์ พิมพ์สุริย์*

อนุกรมของรอยต่อโจเซฟสัน

ในช่วงต้นทศวรรษที่ 1970 ปรากฏการณ์โจเซฟสันได้นำมาใช้กับรอยต่อโจเซฟสันเพียงรอยต่อเดียวที่ให้นิยามค่าแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงประมาณ 1-10 mV เท่านั้น ซึ่งเป็นค่าแรงดันไฟฟ้าที่ต่ำมาก จึงนำไปใช้ประโยชน์ได้ในวงจำกัด ต่อมาในปี ค.ศ.1984 รอยต่อโจเซฟสันจึงถูกพัฒนาเป็นอนุกรมของรอยต่อโดยนำแต่ละรอยต่อมาต่ออนุกรมกันเพื่อเพิ่มแรงดันไฟฟ้าให้สูงขึ้น แต่เนื่องจากรอยต่อเหล่านั้นต้องการไบอัสของกระแสไฟฟ้าที่เป็นอิสระต่อกันจึงทำให้เกิดความยุ่งยากในทางปฏิบัติในเบื้องต้นนั้นอนุกรมของรอยต่อโจเซฟสันจึงมีเพียง 20 รอยต่อเท่านั้น

หลังจากความพยายามเบื้องต้นผ่านไป ภายใต้ความร่วมมือระหว่าง National Bureau of Standard ของประเทศสหรัฐอเมริกาและ Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB) ของประเทศสหพันธ์สาธารณรัฐเยอรมนีได้ร่วมมือกันแก้ปัญหาต่างๆ ที่เกิดขึ้นจากอนุกรมของรอยต่อโจเซฟสัน จนสามารถสร้างอนุกรมของรอยต่อที่สามารถให้แรงดันไฟฟ้าได้สูงถึง 1V ในปี ค.ศ.1985 ต่อมาเทคโนโลยีวงจรรวม (integrated circuit) ได้นำมาพัฒนาใช้กับตัวนำยิ่งยวดจึงสามารถออกแบบอนุกรมของรอยต่อที่มีจำนวนมากถึง 14,484 รอยต่อ อยู่บน ground plane เดียวกัน ในการออกแบบอนุกรมของรอยต่อนั้นสิ่งที่ต้องคำนึงถึงคือความต้านทานความจุ (capacitive impedance) ของรอยต่อที่จะต้องมีความต่ำ ซึ่งจะทำให้คลื่นความถี่ไมโครเวฟมีการสูญเสียของกำลังต่ำและสามารถแพร่กระจายผ่านไปยังทุกๆ รอยต่อที่ต่ออนุกรมกัน ดังนั้น การออกแบบที่ดีของรอยต่อจำนวนมากๆ จึงจำเป็นต้องออกแบบให้เป็นการต่อแบบอนุกรมในส่วนของรอยต่อและต่อแบบขนานในส่วนของกระแสการเคลื่อนที่ไมโครเวฟ โดยใช้ตัวเก็บประจุ (capacitor) เป็นตัว coupling คลื่นไมโครเวฟ จำนวนรอยต่อทั้งหมดจะบรรจุลงในแผ่นวงจรรวม (chip) ที่มีขนาดประมาณ 3X2 เซนติเมตร ซึ่งเรียกว่า Josephson Junction Array Chip (JJAC) ปัจจุบันมี 2 ขนาด ได้แก่ ขนาด 1V และ 10V

หลักการทำงานเบื้องต้น

ส่วนประกอบที่สำคัญของระบบ JVS ได้แก่ รอยต่อโจเซฟสัน แหล่งจ่ายคลื่นความถี่ไมโครเวฟ (microwave source) และการไบอัสของกระแสไฟฟ้า (DC bias current) โดยที่รอยต่อโจเซฟสันจะต้องอยู่ในสภาวะของอุณหภูมิที่ต่ำกว่าอุณหภูมิวิกฤติ (critical temperature) ของสารตัวนำยิ่งยวดนั้นๆ ปกติแล้วรอยต่อโจเซฟสันจะถูกจุ่มอยู่ที่ฮีเลียมเหลว (liquid helium) ที่มีอุณหภูมิประมาณ 4 เคลวิน ในสภาวะเช่นนี้ ของที่ไม่มีการจ่ายแรงดันไฟฟ้าให้กับรอยต่อ จะมีกระแสไฟฟ้ากระแสตรงไหลผ่านรอยต่อซึ่งจะมีค่ามากที่สุดเท่ากับกระแสไฟฟ้าวิกฤติของรอยต่อ หลังจากนั้นจะอาศัยคลื่นความถี่ไมโครเวฟแพร่กระจายไปยังรอยต่อ ซึ่งจะทำให้เกิดแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงตกคร่อมรอยต่อที่มีค่าสอดคล้องกับคลื่นความถี่นั้น นั่นคือรอยต่อโจเซฟสันจะประพฤติตัวคล้ายกับเป็นตัวแปลงความถี่ไปสู่แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่มีค่าความถูกต้องสูงมากๆ ในขณะที่ DC bias current จะเป็นตัวกำหนดจำนวนสเต็ป n เพื่อปรับแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมรอยต่อ เช่น ถ้าผ่านคลื่นความถี่ 75Ghz ให้กับรอยต่อแล้ว จะได้ว่าเกิดแรงดันไฟฟ้าที่มีค่าประมาณ $155\mu\text{V}$ ในแต่ละสเต็ป ดังนั้น ถ้าต้องการแรงดันไฟฟ้า 1.55 v จะต้องปรับ DC bias current ให้ได้ค่า $n = 10,000$ เป็นต้น ซึ่งหลักการทำงานและส่วนประกอบของระบบที่สมบูรณ์ตลอดจนการถ่ายค่าไปยังมาตรฐานอ้างอิงห้องปฏิบัติการนั้นจะได้กล่าวถึงในโอกาสต่อไป

บทสรุป

แรงดันไฟฟ้าที่ได้จากระบบแรงดันไฟฟ้ามาตรฐานโจเซฟสันเป็นแรงดันไฟฟ้าที่ได้จากค่าคงที่และค่าคงที่มาตรฐาน (fundamental constant) ของอัตราส่วนระหว่างค่าประจุของอิเล็กตรอนกับค่าคงที่ของพลังค์ ซึ่งค่าความถูกต้องของค่าคงที่นี้อยู่ที่ระดับ 10^{-12} และสามารถพิสูจน์โดยการทดลองว่าค่าคงที่โจเซฟเป็นอิสระจากสมบัติของสารและสิ่งแวดล้อมที่ระดับหนึ่งในร้อยล้าน (1:10²⁰) ดังนั้นแรงดันไฟฟ้าที่ได้จึงมีความถูกต้องและความเสถียรดีกว่า Zener และเซลล์ไฟฟ้าเคมีมาตรฐานมากๆ ด้วยเหตุนี้เองที่ระบบแรงดันไฟฟ้ามาตรฐานโจเซฟสันได้ถูกนำมาใช้เป็นมาตรฐานระดับปฐมภูมิของแรงดันไฟฟ้า (primary voltage standard) ในปัจจุบันมีระบบแรงดันไฟฟ้ามาตรฐานโจเซฟสันมากกว่า 45 ประเทศ ทั้งห้องปฏิบัติการของสถาบันมาตรวิทยาแห่งชาติ ห้องปฏิบัติการทางอุตสาหกรรมและทางทหาร รวมทั้งสถาบันมาตรวิทยาแห่งชาติของประเทศไทยด้วย

* นักมาตรวิทยา ฝ่ายมาตรวิทยาไฟฟ้า
(จากหนังสือ METROLOGY INFO, Vol. 10, No.42
สถาบันมาตรวิทยาแห่งชาติ กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี)

