

公益財団法人矢崎科学技術振興記念財団
一般研究助成 成果報告書

公益財団法人矢崎科学技術振興記念財団
理事長 殿

研究助成期間終了にあたり、下記の通り成果を報告します。

2025 年 4 月 29 日

氏名 川上 恵里加

所属 理化学研究所

職位 理研白眉研究チームリーダー

1. 申請研究の題目

量子コンピューター大規模化のための低温マイクロ波測定機器の開発

2. 研究の目的

大規模量子コンピューターは私達の生活を豊かにする可能性を秘めている新しい情報技術である。量子コンピューターの情報の最小単位である量子ビットは極低温下に置かれ、マイクロ波で制御・読み出しされる。現在実現している小規模な量子コンピューターでは、室温に置かれているマイクロ波測定機器と極低温下の量子ビットを繋ぐための太い電線が設置されている。多数の量子ビットが集積化された量子コンピューターを実現するために必要な数の太い電線を設置することは難しい。この問題を解決するために、トンネルダイオードと呼ばれる電子素子を活用して、極低温下で動作する測定機器を開発することを目標とする。

3. 研究の内容

トンネルダイオードを用いて、極低温(-273°C 程度)で動作するマイクロ波発振器を開発した。実際に作成した発振器を図1に示す。LC 共振器に負性抵抗($-R$ で表される)を持つトンネルダイオードをつなぎ、トンネルダイオードに DC 電圧を与えることによって、マイクロ波が出力できる。

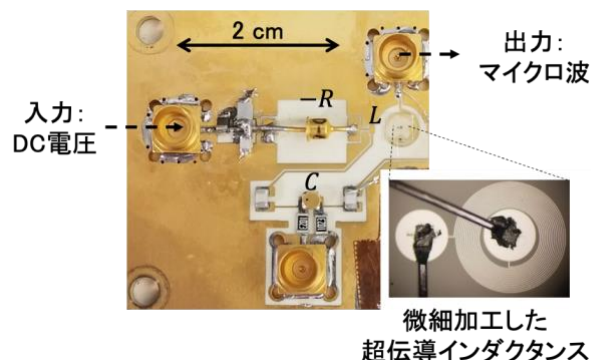


図1: 作成したマイクロ波発振器。これを極低温(-273°C 程度)下で動作することを確認した。図中の $-R$ はトンネルダイオードを示す。 C は 10MHz 程の周波数可変のために可変容量ダイオードを、 L は抵抗損失を低減するために微細加工された超伝導インダクタンスを用いている。

4. 研究の成果と結論、今後の課題

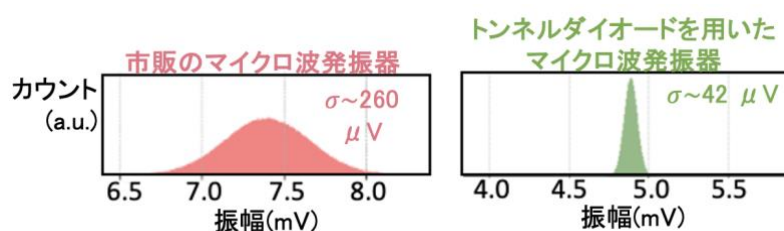


図2: 市販のマイクロ波発振器と今回開発した極低温で動作するマイクロ波発振器の振幅安定性の比較。

図1に示したように今回開発したマイクロ波発振器は、大きさ $2 \text{ cm} \times 2 \text{ cm}$ 程と市販のマイクロ波発振器に比べかなり小さい。この発振器を極低温下置き、出力されたマイクロ波を測定した。その結果、振幅のばらつきは市販のマイクロ波発振器と比較して小さく、優れた安定性が得られた(図2)。量子ビットの読み出しでは、振幅の大きさに基づいて状態(0 または 1)を識別するため、振幅の安定性は読み出し精度の向上に直結する。このことから、本発振器を用いることで、市販のマイクロ波発振器よりも高精度な読み出しが可能になると期待される。

一方で、位相雑音は市販の発振器と同程度、あるいはそれ以上に大きく、さらなる改善の余地がある。位相雑音が大きい場合、量子ビットの制御精度が低下するため、その抑制は今後の課題である。この成果は J Low Temp Phys (2025). <https://doi.org/10.1007/s10909-025-03293-4> に報告した。

また、これと同時に独立して LC 共振器を用いて量子ビットを読み出す実験も並行しておこなっており、この実験と今回開発した極低温で動作する低温マイクロ波発振器を組み合わせることも今後の課題の1つである。

5. 成果の価値

5-1. 学術的価値

現在、量子コンピュータの研究では、100 個程度の量子ビットを使った実験が行われている。ここからさらに 10^7 乗個以上の量子ビットを動かすためには、量子ビットそのものの改良に加え、それを制御するための電子回路の開発が不可欠である。

量子ビットは極めて繊細であり、ほぼ絶対零度(マイナス 273 度近く)の極低温環境下でしか安定して動作しない。このため、同様の極低温でも確実に動作する測定機器の開発は、研究を次の段階へ進めるための鍵となる。今回開発した低温マイクロ波発振器は、そのための重要な第一歩である。

5-2. 社会的価値

実用的な量子コンピュータを実現するためには、 10^7 乗個以上の量子ビットが必要である。 10^7 乗個以上の量子ビットを備えた量子コンピュータは、汎用誤り耐性量子コンピュータと呼ばれ、これが実現すれば、現在のコンピュータでは困難または不可能な計算を高速に実行できるようになる。これにより、新しい材料の設計、創薬、最適化問題の解決、量子化学計算、暗号解析など、さまざまな分野で革新的な進展がもたらされる。

6. 研究成果

※研究の成果として発表した「研究論文」(査読付きの学会原著論文のみ)、「国際会議発表」、「特許」、「受賞」、「マスコミ報道」等を、ご記載下さい。

・「研究論文(原著)」

①. Characterization of Tunnel Diode Oscillator for Qubit Readout Applications.

I. Grytsenko, S. van Haagen, O. Rybalko, A. Jennings, R. Mohan, Y. Tian, E. Kawakami,
J Low Temp Phys (2025). <https://doi.org/10.1007/s10909-025-03293-4>

2. A. Jennings, X. Zhou, I. Grytsenko, E. Kawakami, “Quantum computing using floating electrons on cryogenic substrates: Potential and Challenges,” *Applied Physics Letters*, **124**, 120501 (2024).

3. E. Kawakami, J. Chen, M. Benito, D. Konstantinov, “Blueprint for quantum computing using electrons on helium,” *Physical Review Applied*, **20**, 054022 (2023).

・「国際会議発表」

1. [招待] 2024 年 9 月 E. Kawakami, “Towards Quantum Computing Using Floating Electrons on Cryogenic Substrates,” CQD 2024, Okinawa, Japan.

2. [招待] 2024 年 9 月 E. Kawakami, “Coupling Floating Electrons on Liquid Helium to an LC Resonator,” The 14th Japan-US Joint Seminar on Quantum Electronics and Laser Spectroscopy, Stanford, USA.

3. [招待] 2024 年 9 月 E. Kawakami, “Coupling Floating Electrons to Resonators,” RIKEN – LBNL Workshop on Quantum Information Science, Berkeley, USA.

4. 2024 年 7 月 A. Jennings, H. Ikegami, I. Grytsenko, Y. Tian, O. Rybalko, E. Kawakami, “Plasmon-photon coupling using electrons on helium,” QFS 2024, Florida, USA.

5. [招待] 2024 年 5 月 E. Kawakami, “Coupling an Ensemble of Electrons on Liquid Helium to an RF Circuit,” Quantum Technologies with Floating Charged Particles, Okinawa, Japan.

6. [招待]2024 年 5 月 A. Jennings, H. Ikegami, I. Grytsenko, Y. Tian, O. Rybalko, E. Kawakami, “Coupling Plasmons on Liquid Helium to an LC Resonator,” Quantum Technologies with Floating Charged Particles, Okinawa, Japan.

7. [招待] 2024 年 5 月 E. Kawakami, “Coupling surface electrons on helium to an RF resonator,” Czech-Japan workshop on quantum information, Tokyo, Japan.

⑧. 2024 年 3 月 Ivan Grytsenko, Oleksiy Rybalko, Yiran Tian, Asher Jennings, Rajesh Mohan, Erika Kawakami, “Cryogenic microwave source for qubit read-out,” APS March meeting, Minneapolis, USA.

9. 2024 年 3 月 Erika Kawakami, Asher Jennings, Ivan Grytsenko, Yiran Tian, Oleksiy Rybalko, “RF Reflectometry of the Rydberg State of Electrons on Helium: Towards a Helium-Based Quantum Computer,” APS March meeting, Minneapolis, USA.

10. [招待] 2022 年 9 月 E. Kawakami, “Floating electrons as qubits,” Quantum Africa, Kigali, Rwanda (オンライン).

11. [招待] 2022 年 8 月 E. Kawakami, "Towards realizing spin qubits using electrons on helium," ULT2022, Otaru, Japan.

12. [招待] 2022 年 8 月 E. Kawakami, "Dispersive read-out of the Rydberg States: towards realizing qubits using electrons on helium," APPC15, Seoul, South Korea (オンライン).

・「特許」
なし

・「受賞」

1. 2023 年 船井学術賞 川上恵里加

2. 2022 年 ベストポスター賞 ULT2022, Otaru, Japan, I. Grytsenko, O. Rybalko, E. Kawakami

以上