

プレスリリース
2024 年 10 月 15 日

国立研究開発法人情報通信研究機構
日本電信電話株式会社
国立大学法人東北大学
国立大学法人東海国立大学機構 名古屋大学

外部磁場を必要としない新型超伝導磁束量子ビットを世界で初めて実現 ～量子コンピュータの小型化に貢献する素子応用を拓く～

【ポイント】

- コイルなどの補助回路を必要とせず、ゼロ磁場で最適動作できる新型の超伝導磁束量子ビットを開発
- 強磁性ジョセフソン π 接合を持つ超伝導量子ビットとしては最も優れたコヒーレンス時間を達成
- 量子コンピュータの小型化を実現する量子素子への応用に期待

国立研究開発法人情報通信研究機構エヌアイシーティー（NICT、理事長：徳田 英幸）は、日本電信電話株式会社（NTT、代表取締役社長：島田 明）、国立大学法人東北大学大学院工学研究科（工学研究科長：伊藤 彰則）、国立大学法人東海国立大学機構 名古屋大学（総長：杉山 直）と共同で、ゼロ磁場で動作する新型超伝導磁束量子ビット^{*1}の開発に成功しました。

超伝導磁束量子ビットには、従来、コイル等の補助回路で発生させた外部磁場が必須でした。今回開発した強磁性体を使ったジョセフソン π 接合^{*2}による超伝導磁束量子ビットは、コイル等を必要とせず、外部磁場印加と同等な超伝導の位相を反転させる機能を確認しました。さらに、 π 接合を組み込んだ量子ビットの中では最長クラスのコヒーレンス時間を達成しました。量子ビットの寿命はマイクロ秒の範囲ですが、今後、 π 接合の材料を更に改良することで、この π 接合やゼロ磁場で動作可能な磁束量子ビットは、量子コンピュータに欠かせない高機能な量子素子の必須要素となる可能性があります。

本成果は、2024 年 10 月 11 日（金）に、英国科学雑誌「Communications Materials」に掲載されました。

【背景】

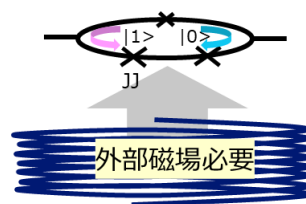
未来の情報社会では、量子コンピュータが、材料・医薬品開発から情報セキュリティまで、幅広い分野で重要な役割を果たすと期待されています。特に、超伝導量子ビットは、量子状態の制御が比較的容易な有望な技術です。超伝導量子ビットの重要な構成要素であるジョセフソン接合^{*3}は回路に非調和性^{*4}を与え、これにより量子ビットが動作します。表 1 に代表的な超伝導量子ビットの特性を示します。

現在広く使用されているトランズモン量子ビット[1]^{*5}は、非調和性が低いため、多数の量子ビットを集積化すると誤動作や周波数衝突と呼ばれる干渉問題が発生しやすくなるなどの欠点を持つことが知られています。

一方、磁束量子ビット[2, 3]は、図 1(a)のようにジョセフソン接合を三つ使用するため非調和性が高く、周波数衝突の問題を緩和できます。しかし、磁束量子ビットは、（量子ビットのコヒーレンス時間が最長となる）最適動作のために、外部コイルで超伝導ループに磁束量子（ $\Phi_0 = 2.07 \times 10^{-15}$ Wb）の半分の磁束を与える必要があります。これは、外部コイル由来の低周波ノイズの要因になり、各々の量子ビットに磁場印加用コントロールラインが必要なため、大規模集積化の課題となっていました。

その解決策として、東北大学の山下太郎教授（研究当時：

(a) 従来の磁束量子ビット



(b) π 接合磁束量子ビット

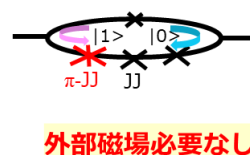


図 1 従来型と新型の超伝導磁束量子ビット回路の概念図：

- (a) 従来型磁束量子ビットは、三つのジョセフソン接合（JJ、×、黒色）を含む超伝導ループで構成され、基底状態 $|0\rangle$ と励起状態 $|1\rangle$ の重ね合わせ状態で最適動作させるためには、外部磁場の印加が必要である。
- (b) 一方、 π 接合（ π -JJ、*、赤色）を用いた新型磁束量子ビットでは、外部磁場なしで自発的に最適動作点に達する。

名古屋大学大学院工学研究科 准教授)らが提案した π 接合を磁束量子ビットに組み込む方法があります(図 1(b)参照)。 π 接合は、強磁性体を組み込んだジョセフソン接合であり、外部から磁場を印加せずに 180 度(π)の位相差を生じるため、自発的に最適動作点にバイアスすることが可能になります。これにより、外部ノイズを抑え、回路が簡素化され、量子ビットの集積化が容易になることが期待されています。

表 1 代表的な超伝導量子ビットの特性

	超伝導量子ビット			π 接合を持つ超伝導量子ビット		
量子ビットの種類	トランズモン	磁束量子ビット		位相量子ビット	磁束量子ビット	
ジョセフソン接合	Al/AIO _x /Al	Al/AIO _x /Al	NbN/AlN/NbN	Nb/Al/AIO _x /Nb	Nb/Al/AIO _x /Al	NbN/AlN/NbN
非調和性	低い	高い		低い	高い	
外部磁場	不要	必要		不要	不要	
量子ビット動作	○	○		○	×	○
コヒーレンス時間	数百マイクロ秒	90マイクロ秒	16マイクロ秒	4ナノ秒	N/A	1.45マイクロ秒
参考文献	[1]	[2]	[3]	[4]	[5]	本成果

【今回の成果】

今回、我々はシリコン基板上に結晶成長させた窒化ニオブを用いた窒化物超伝導量子ビットの技術(2021 年 9 月 20 日 NICT 報道発表)と、 π 接合の技術(2017 年 11 月 15 日 NICT 報道発表)を組み合わせ、 π 接合を持つ磁束量子ビットを作製し、世界で初めてゼロ磁場で最適動作することを実証し、そのコヒーレンス時間の測定に成功しました。

これまでの研究では、カールスルーエ工科大学(ドイツ)の Ustinov 教授研究チームの Feofanov らが Nb/AIO_x/Nb ジョセフソン接合と Nb/CuNi/Nb π 接合により構成された位相量子ビット⁶において 4 ナノ秒のコヒーレンス時間を報告[4]しているほか、同チームの Shcherbakova らが磁束量子ビットへの π 接合導入を試みましたが、量子ビット動作は確認されず、コヒーレンス時間の測定には至りませんでした[5]。

我々は、CuNi よりも安定した π 状態を維持できる PdNi を採用し、NbN 電極上に π 接合を形成しました。さらに、NICT が開発した NbN/AlN/NbN ジョセフソン接合と NTT が開発した 3 次元共振器用の磁束量子ビットの最適デザインを組み合わせ、ゼロ磁場で最適動作する新型超伝導磁束量子ビットを作製しました(図 2 参照)。NTT の長寿命量子ビット測定系を用いた測定の結果、ゼロ磁場が最適動作点であることを確認し、1.45 マイクロ秒のコヒーレンス時間を観測しました(図 3 参照)。これは、従来の π 接合を組み込んだ位相量子ビットと比べて 360 倍のコヒーレンス時間の改善となります。一方で、 π 接合を持たない従来の磁束量子ビットでは 16 マイクロ秒のエネルギー緩和時間が得られており(2021 年 9 月 20 日 NICT 報道発表を参照)、現状の NbN/PdNi/NbN 積層構造による π 接合はコヒーレンス時間の改善という課題があることも世界で初めて明らかにしました。

今回の成果は、外部磁場が不要で、マイクロ秒オーダーのコヒーレンス時間を持つ磁束量子ビットを世界で初めて実現したもので、量子ビットを含む様々な量子回路の微細化・集積化に重要な技術であり、外部磁場が不要になることで、回路の簡素化や省エネ、コスト削減に貢献するものです。

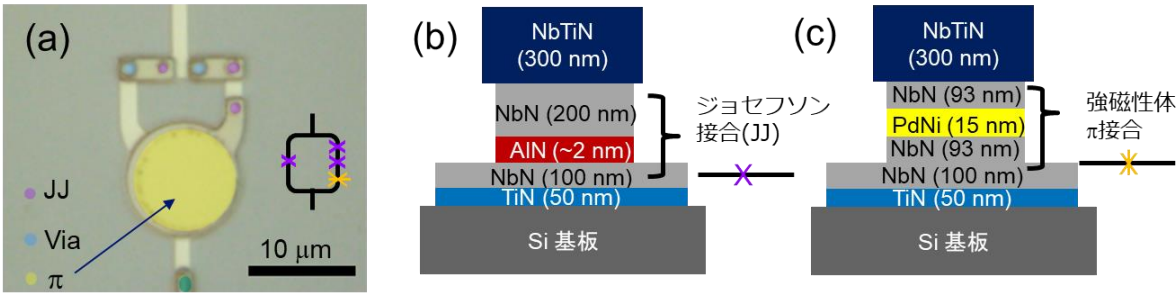


図 2 (a) 開発された新型超伝導磁束量子ビットの光学顕微鏡写真。ジョセフソン接合(JJ)、 π 接合、ビアホール部分が紫、黄、青の擬似カラーで示され、右の回路構成図には、三つのジョセフソン接合(×、紫色)と π 接合(*、黄色)が表示されている。
(b) 全窒化物超伝導体で構成されたジョセフソン接合の構造
(c) 窒化ニオブ(NbN)ベース電極上に形成された π 接合の構造

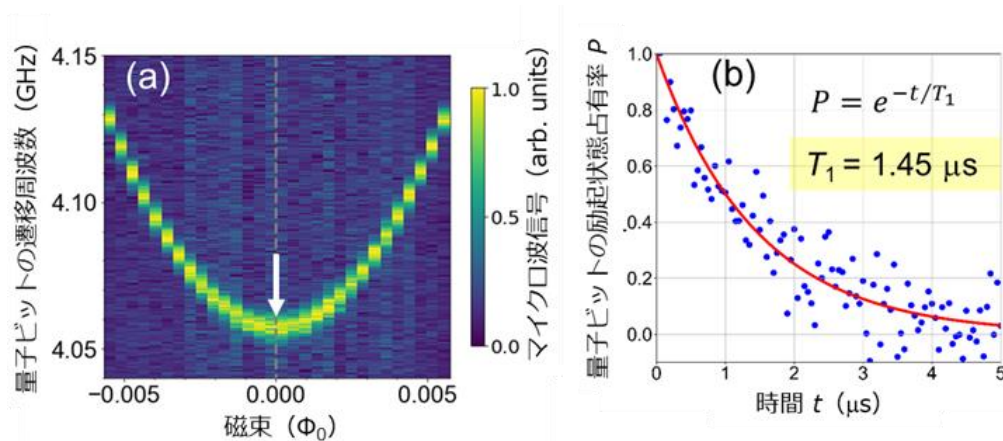


図 3 (a) 新型超伝導磁束量子ビットの基底状態から励起状態への遷移周波数の磁場依存性を表すマイクロ波分光スペクトラム。矢印は遷移周波数の最低点でもある磁束量子ビットの最適動作点を表す。従来の磁束量子ビットは最適動作点が $0.5\Phi_0$ で現れるが、新型超伝導磁束量子ビットはゼロ磁場 ($0\Phi_0$) で現れるのが特徴である。
(b) エネルギー緩和時間 $T_1 = 1.45\ \mu\text{s}$ を示すコヒーレンス時間の測定結果

【今後の展望】

今後、コヒーレンス時間の更なる延伸、将来的な大規模集積化を見据えた素子特性の均一性の向上を目指して、回路構造や作製プロセスの最適化に取り組み、従来のアルミニウムベース量子ビットの性能を凌駕する量子ハードウェアの新しいプラットフォームの構築を目指します。 π 接合の材料、構造を改良することで、より長いコヒーレンス時間を持ちながらゼロ磁場で動作可能な π 接合磁束量子ビットを開発することができれば、量子コンピュータチップを含む様々な量子において必須の構成要素となる可能性があります。

<各機関の役割分担>

- ・情報通信研究機構: 研究の構想、超伝導磁束量子ビットの設計と作製、ジョセフソン接合の特性評価
- ・NTT: 3D 共振器を用いた超伝導量子ビットの測定
- ・東北大学、名古屋大学: 研究の構想、強磁性体 π 接合の作製とその特性評価

<論文情報>

掲載誌: *Communications Materials*

DOI: 10.1038/s43246-024-00659-1

URL: <https://doi.org/10.1038/s43246-024-00659-1>

論文名: Superconducting flux qubit with ferromagnetic Josephson π -junction operating at zero magnetic field

著者: Sunmi Kim, Leonid V. Abdurakhimov, Duong Pham, Wei Qiu, Hirotaka Terai, Sahel Ashhab, Shiro Saito, Taro Yamashita, and Kouichi Semba

<関連する過去の報道発表>

- ・2021 年 9 月 20 日 シリコン基板を用いた窒化物超伝導量子ビットの開発に成功
<https://www.nict.go.jp/press/2021/09/20-1.html>
- ・2017 年 11 月 15 日 窒化ニオブを用いた磁性ジョセフソン素子を世界で初めて実現
<https://www.nict.go.jp/press/2017/11/15-1.html>
- ・2016 年 10 月 11 日 光子と人工原子から成る安定な分子状態を発見
<https://www.nict.go.jp/press/2016/10/11-1.html>

なお、本研究の一部は、科学技術振興機構 JST-CREST「超伝導量子メタマテリアルの創成と制御」(研究課題番号: JPMJCR1775、研究代表者: 仙場 浩一)、科研費 (JP19H05615)、JST ERATO (JPMJER1601) と一部 MEXT Quantum Leap Flagship Programs (JPMXS0120319794 と JPMXS 0118068682) の助成を受けて行われました。

< 本件に関する問合せ先 >

国立研究開発法人情報通信研究機構

・未来 ICT 研究所 小金井フロンティア研究センター
量子 ICT 研究室

金 鮮美、アシュハブ サヘル、仙場 浩一

E-mail: kimsunmi@nict.go.jp, ashhab@nict.go.jp,
semba@nict.go.jp

・未来 ICT 研究所 神戸フロンティア研究センター
超伝導 ICT 研究室

寺井 弘高

E-mail: terai@nict.go.jp

NTT 物性科学基礎研究所

量子電子物性研究部

齊藤 志郎

E-mail: shiro.saito@ntt.com

東北大学

大学院工学研究科応用物理学専攻

(研究当時: 名古屋大学大学院工学研究科)

山下 太郎

E-mail: taro.yamashita.c8@tohoku.ac.jp

< 広報 (取材受付) >

国立研究開発法人情報通信研究機構

広報部 報道室

E-mail: publicity@nict.go.jp

日本電信電話株式会社

先端技術総合研究所 広報担当

E-mail: nttrd-pr@ml.ntt.com

東北大学大学院工学研究科情報広報室

担当: 沼澤 みどり

Tel: 022-795-5898

E-mail: eng-pr@grp.tohoku.ac.jp

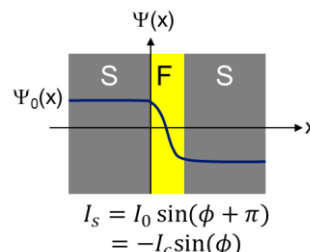
<用語解説>

*1 超伝導磁束量子ビット

量子ビット(量子コンピュータで使われる量子情報を扱う基本素子)の一種で、ジョセフソン接合^{*3}を含む超伝導ループから構成される。0と1の重ね合わせの状態は、磁束で誘導される超伝導ループ内の永久電流(例えば、右回りの電流を0状態としたら、左回りの電流は1状態を表す。)によって実現される。

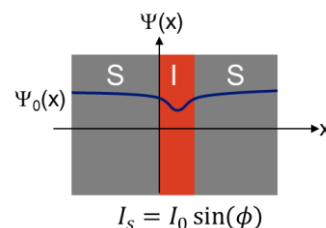
*2 π 接合

π 接合は超伝導体(S)間に強磁性体(F)を挟んだ構造を持つ特殊なジョセフソン接合^{*3}で、ジョセフソン電流バイアスがゼロの時、位相差が通常のジョセフソン接合の0ではなく、180度(π)になることが特徴である。この位相のシフトにより、ジョセフソン π 接合は、超伝導回路や量子ビットに半磁束量子に相当する磁場印加と同じ効果をもたらす。



*3 ジョセフソン接合

二つの超伝導電極(S)を極薄の絶縁体(I)あるいは常伝導金属薄膜で隔てた構造の接合(ジョセフソン接合)を持つ素子をジョセフソン素子と呼び、超伝導電極間のトンネル効果によって電気抵抗ゼロ(ゼロ電圧)の電流(ジョセフソン電流 I_s)が流れる。このジョセフソン電流の大きさは、両超伝導電極の巨視的位相の差(ϕ)によって決まるため(直流ジョセフソン効果)、逆に、ジョセフソン素子にどれだけ電流を流すかで超伝導電極間の巨視的位相を制御することができる。超伝導量子ビットを始めとする多くの超伝導デバイスは、このジョセフソン素子による巨視的位相制御を基本動作原理としている。



*4 非調和性

超伝導量子ビットの基底状態と励起状態のエネルギー差が次のエネルギー準位と異なるという性質のこと。基底状態 $|0\rangle$ と第一励起状態 $|1\rangle$ のエネルギー差(E_{01})と次のエネルギー準位 $|2\rangle$ 間のエネルギー差(E_{12})の違い($E_{12}-E_{01}$)を表す。

*5 トランズモン量子ビット

超伝導量子ビットの一種で、一つもしくは二つのジョセフソン接合で構成される量子ビットに大きなキャパシタンスを持つコンデンサ(シャントキャパシタとも呼ばれる。)を結合させた回路構造で、帯電エネルギーを小さくすることで電荷ノイズに耐性を持ち、コヒーレンス時間を改善させた量子ビットである。

*6 位相量子ビット

超伝導量子ビットの一種で、比較的大きいジョセフソン接合で構成され、帯電エネルギー(E_c)に対するジョセフソンエネルギー(E_J)の比を 10^6 程度に大きくした回路設計が特徴であり、ジョセフソン接合の電圧と電流の位相差を利用して、量子ビットの状態を操作する量子ビットである。

<参考文献>

- [1] C. Wang et al., "Towards practical quantum computers: transmon qubit with a lifetime approaching 0.5 milliseconds", *npj Quantum Inf.* 8, 3 (2022).
- [2] S. Kim et al., "Enhanced-coherence all-nitride superconducting qubit epitaxially grown on Si substrate", *Commun. Mater.* 2, 98 (2021).
- [3] L. V. Abdurakhimov et al., "A long-lived capacitively shunted flux qubit embedded in a 3D cavity", *Appl. Phys. Lett.* 115, 262601 (2019).
- [4] A. K. Feofanov et al., "Implementation of superconductor/ferromagnet/superconductor π -shifters in superconducting digital and quantum circuits", *Nat. Phys.* 6, 593-597 (2010).
- [5] A. V. Shcherbakova et al., "Fabrication and measurements of hybrid Nb/Al Josephson junctions and flux qubits with π -shifters", *Supercond. Sci. Technol.* 28, 025009 (2015).