

窒化物超伝導体を用いた量子計算回路の開発

大学院工学研究科

山下太郎 (taro@tohoku.ac.jp)

1. はじめに

近年、超伝導体をベースとした量子計算機の研究開発が世界的に加速している [1]。量子計算機はいくつかの特定の問題に対して従来の古典計算機の性能を凌駕することが期待されており、米国 Google や IBM 等の大企業を始めとして世界中の大学・研究機関等で熾烈な研究開発競争が繰り広げられている。量子計算機のハードウェアとしては、超伝導体だけではなく半導体やイオントラップ、光など様々な物理系が研究されているが、その中でも超伝導体は、高い設計自由度や集積可能性により最有力候補のひとつとして注目されている。2019年には Google が量子超越性（古典計算に対する圧倒的な優位性）の実証を報告する論文を発表し [2]、大きな話題を呼んだ。

2. 超伝導体ベースの量子計算回路

超伝導量子計算回路を構成する最小単位は量子ビットと呼ばれ、各ビットは“0”か“1”の2値だけではなく、それら任意の重ね合わせ状態を取りうる点が従来のデジタル信号処理における古典ビットとの大きな違いである。超伝導体を用いた量子ビットにはその設計パラメータの違いにより、大きく分けて電荷型・磁束型・位相型の3つのタイプが存在する。いずれのタイプも、その基本構造はジョセフソン接合（超伝導/絶縁体/超伝導接合）を含んだ超伝導ループである。現在の主流は、電荷型をベースに雑音耐性を改善したトランズモンと呼ばれるタイプであり、前述の Google から報告された量子回路も54個のトランズモン量子ビットから構成されている [2]。個々の量子ビットは固有のエネルギー（典型的には周波数換算で数 GHz 程度）によって特徴付けられるが、この値はジョセフソン接

合の臨界電流値やキャパシタンス等で決定するため、各接合を極力設計値通りに作製することが今後の量子回路の大規模化にとって重要となる。また、量子ビットの性能指標として最も重要なのがコヒーレンス時間である。コヒーレンス時間とは、量子ビットが量子状態を保持可能な時間であり、現在では長いもので 100 μ s を超えるまで改善がなされている [3]。一般的には、量子回路の大規模化に伴ってビット間のクロストークや配線数増加による雑音増大等により、コヒーレンス時間は減少するため、更なる改善が求められている。

また、量子ビット自体は受動素子であるため、量子回路を動作させるためには、各量子ビットの状態を制御し読み出すことが必要となる。現在は一般的に、量子ビットとコプレーナ導波路型の超伝導共振器を結合させた回路を作製し、回路量子電磁力学（circuit quantum electrodynamics; circuit QED）と呼ばれる手法を用いた制御・読み出しが行われている [4]。詳細は他の文献に譲るが、この手法ではコプレーナ導波路へマイクロ波のパルスを入射し、その周波数を制御対象の量子ビットのエネルギーにチューニングすることで量子状態の制御を行う。照射するパルスの時間幅もしくは振幅を調節することで、所望の量子状態へ遷移させることが可能となる。読み出しに関してもマイクロ波を利用する。一般的に用いられるのが分散読み出し（dispersive readout）と呼ばれる手法であるが、これは量子ビットと弱く結合したコプレーナ導波路共振器の共振周波数が、量子ビットの状態に応じて変化（シフト）することを利用する。マイクロ波の入射に対して、反射もしくは透過したマイクロ波の振幅や位相を測定することで、量子状態を判別することが可能である。量子ビット研究の黎明期

に用いられていた超伝導量子干渉素子 (SQUID) による状態読み出し等と異なり、量子ビットの状態を破壊することなく読み出すことができる (非破壊読み出し) のが大きな利点である。

3. 窒化物超伝導体を用いた量子ビット

現在、超伝導量子回路の研究開発における大きな方向性は、コヒーレンス時間の更なる改善と、十分なコヒーレンス時間を保持しつつ大規模化 (多量子ビット化) を達成することである。そこで我々は、窒化物超伝導体を用いた超伝導量子ビットの開発を進めている [5-7]。現在に至るまで、多くの超伝導量子ビットを構成するジョセフソン接合としては、斜め蒸着法により作製された Al/AIO_x/Al 接合が用いられてきた。ところが障壁層である AIO_x はアモルファス酸化膜であり、コヒーレンスを劣化させる要因なのである 2 準位系が多く含まれていることが知られている。そのためコヒーレンス時間の改善には、障壁層中に存在する 2 準位系密度の低減が必要となる。

そこで我々が開発を進めているのが、窒化アルミニウム (AlN) を障壁層に用いた窒化ニオブ (NbN) 接合 (NbN/AlN/NbN 接合) である。Si 基板上に窒化チタン (TiN) を反応性スパッタリングにより成膜することで、(100)配向した TiN 薄膜が得られる。TiN と NbN は格子定数が近いので TiN をバッファ層として用いることで、Si 基板上に(100)配向したフルエピタキシャル NbN/AlN/NbN 接合が得られる [6]。結晶化した AlN 障壁層では 2 準位系密度の低減が期待されるため、現在この NbN ベースのジョセフソン接合を用いた超伝導量子ビットを作製し、コヒーレンス時間の改善実証に向けた研究を進めている。最近では、開発した NbN 接合による磁束型量子ビットにおいて、20 μs 程度のコヒーレンス時間を得ることに成功している [7]。

3. 超伝導量子ビットへの π 接合応用

多量子ビット化に向けたもうひとつのアプローチとして、我々は新しいタイプの量子ビット開発も進めている。現在主流のトランズモンタイプの

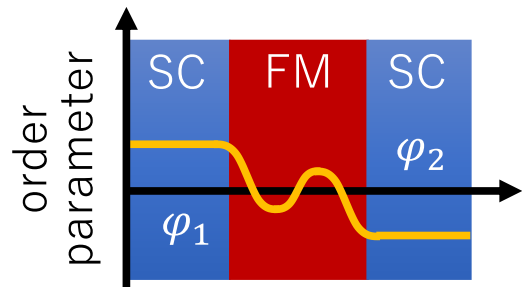


図 1 強磁性ジョセフソン接合 (SC/FM/SC 接合) による π 接合の概念図。超伝導オーダーパラメータが強磁性層内で空間的に振動し、両側の超伝導体における巨視的位相 φ_1 と φ_2 の符号が異なっている。

量子ビットは高い雑音耐性を達成した一方、量子ビットとして利用すべき基底状態と第一励起状態よりもさらに上のエネルギー準位への望まない状態遷移が起きやすくなる (小さな非調和性によるリーク) という問題がある。これに対し、3つのジョセフソン接合を有する磁束型量子ビットは高い非調和性を有するためこの問題を克服でき、多量子ビット化においてもビット間クロストークの低減も期待できる。また最近では、磁束型量子ビットにシャントキャパシタを付加した構造を採用することで、良好なコヒーレンス時間や歩留まりの改善も報告されている [7,8]。このような状況の中、磁束型量子ビットにおける残された課題は動作のために外部磁場を必要とする点である。最長のコヒーレンス時間を保持するためには、量子ビットを構成する超伝導ループ中に、磁束量子のちょうど半分に対応する磁束 (半磁束量子) を定常的かつ正確にバイアスし続ける必要がある。これを最適動作点と呼ぶが、多量子ビット化した際には全ての量子ビットを最適動作点へチューニングすることは技術的に極めて困難となり、大規模化のボトルネックとなる。

この問題を解決できる可能性をもつのが、筆者が理論提案を行い [9,10]、現在開発を進めている磁束バイアスフリーな磁束型量子ビットである。ここに用いるのが、図 1 に示す強磁性ジョセフソン接合 (超伝導/強磁性/超伝導接合) であり、π 接合

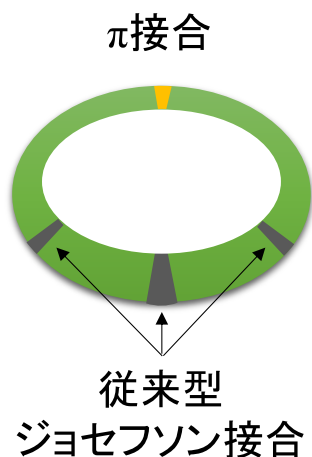


図2 π接合を組み込んだ磁束バイアスフリーな磁束型量子ビットの概念図。

と呼ばれる。π接合では、強磁性層へ染み込んだ超伝導オーダーパラメータが交換相互作用の影響により空間的に振動し、正または負の符号をとる。そのため、強磁性膜厚を適切に設定することにより、両側の超伝導体における巨視的位相がちょうどπの場合にエネルギー的に安定となる状態(π状態)が存在し、この接合をπ接合と呼ぶ。図2に示すように、このπ接合を磁束型量子ビットへ導入することにより、半磁束量子に相当する磁束バイアスを印加したと等価になり、外部磁場ゼロで最適動作点を実現できる。

そこで我々は、窒化物超伝導量子ビットと相性の良いNbNベースのπ接合開発を進めている。強磁性層としては希釈磁性体であるCuNiを採用し、NbN/CuNi/NbN接合を作製・評価した結果、CuNi膜厚及び温度依存性における0状態とπ状態の相転移[11]や、SQUID構造素子の臨界電流の磁場依存性における半磁束量子シフトを観測[12]し、窒化物π接合の実証に成功した。また最近では、強磁性層にPdNiを用いることで、より幅広い膜厚領域においてπ接合を実現できることを明らかとした[13]。現在、前述の窒化物超伝導量子ビットへこのπ接合を導入した素子の作製を行い、位相シフト動作実証まで完了している[14]。また並行して、従来の

AI接合と窒化物π接合のハイブリッド型量子ビットの開発・評価も進めており、磁束バイアスフリー動作実証に成功している[15]。今後、この強磁性ジョセフソン接合技術を発展させ、超伝導量子ビットの大規模化におけるコア量子技術として確立することを旨とする。

3. まとめ

本稿では、超伝導量子計算回路の概要と、我々が取り組んでいる窒化物超伝導技術をベースとした量子計算回路の開発について紹介した。従来のAI接合を用いたトランズモン量子ビットを置き換えるには、さらなる成膜条件の最適化やプロセス工程の改善、素子設計のブラッシュアップ、最適な材料探索を含む様々な研究開発が必要となるが、大規模集積化に適した新しい量子技術の可能性が大いに期待される。

謝辞

本研究の一部は、国立研究開発法人情報通信研究機構の寺井弘高氏、川上彰氏、金鮮美氏、丘偉氏、布施智子氏、吉原文樹氏、仙場浩一氏、理化学研究所のKunZuo氏(現・シドニー大学)、浦出芳郎氏(現・産業技術総合研究所)、東京大学の中村泰信教授、産業技術総合研究所の猪股邦宏氏、理化学研究所の前川禎通氏、東北大学の高橋三郎氏、名古屋大学のDuong Pham氏(現・東北大学)、田中雅光助教、藤巻朗教授らとの共同研究である。また本研究の一部は、JST さきがけ(JPMJPR1669)、JST CREST(JPMJCR1775)、JSTERATO(JPMJER1601)、科研費基盤研究(S)(19H05615)、特別推進研究(18H05211)、文部科学省Q-LEAP(JPMXS0118068682)の支援を受けて行われた。

参考文献

- [1] J. Clarke and F. K. Wilhelm, “Superconducting quantum bits”, *Nature* **453**, 1031 (2008).
- [2] F. Arute *et al.*, “Quantum supremacy using a programmable superconducting processor”, *Nature* **574**, 505 (2019).

- [3] W. Oliver and P. B. Welander, “Materials in superconducting quantum bits”, MRS Bulletin **38**, 816 (2013).
- [4] A. Blais, R.-S. Huang, A. Wallraff, S. M. Girvin, R. J. Schoelkopf, “Cavity quantum electrodynamics for superconducting electrical circuits: An architecture for quantum computation”, Phys. Rev. A **69**, 062320 (2004).
- [5] Y. Nakamura, H. Terai, K. Inomata, T. Yamamoto, W. Qiu, Z. Wang, “Superconducting qubits consisting of epitaxially grown NbN/AlN/NbN Josephson junctions”, Appl. Phys. Lett. **99**, 212502 (2011).
- [6] K. Makise, H. Terai, and Y. Uzawa, “NbN/AlN/NbN/TiN Tunnel Junctions on Si (100) Substrate for Superconducting Devices”, IEEE Trans. Appl. Supercond. **26**, 1100403 (2016).
- [7] S. Kim, H. Terai, T. Yamashita, W. Qiu, T. Fuse, F. Yoshihara, S. Ashhab, K. Inomata, K. Semba, “Enhanced coherence of all-nitride superconducting qubits epitaxially grown on silicon substrate”, Communications Materials **2**, Article number: 98 (2021).
- [8] F. Yan *et al.*, “The flux qubit revisited to enhance coherence and reproducibility”, Nature Communications **7**, 12964 (2016).
- [9] T. Yamashita, K. Tanikawa, S. Takahashi, S. Maekawa, “Superconducting π qubit with a ferromagnetic Josephson junction”, Phys. Rev. Lett. **95**, 097001 (2005).
- [10] T. Yamashita, S. Takahashi, S. Maekawa, “Superconducting π qubit with three Josephson junctions”, Appl. Phys. Lett. **88**, 132501 (2006).
- [11] T. Yamashita, A. Kawakami, H. Terai, “NbN-based ferromagnetic 0 and π Josephson junctions”, Phys. Rev. Appl. **8**, 054028 (2017).
- [12] T. Yamashita, S. Kim, H. Kato, W. Qiu, K. Semba, A. Fujimaki, H. Terai, “ π phase shifter based on NbN-based ferromagnetic Josephson junction on a silicon substrate”, Sci. Rep. **10**, Article number: 13687 (2020).
- [13] D. Pham, R. Sugimoto, K. Oba, Y. Takeshita, F. Li, M. Tanaka, T. Yamashita, A. Fujimaki, “Weak spin-flip scattering in Pd₈₉Ni₁₁ interlayer of NbN-based ferromagnetic Josephson junctions,” Scientific Reports **12**, Article number: 6863 (2022).
- [14] T. Yamashita, K. Inomata, D. Pham, H. Terai, “Flux-bias-free superconducting flux qubits with coplanar waveguide resonator”, 16th European Conference on Applied Superconductivity (EUCAS2023), Bologna (Italy), Sep. 3-7.
- [15] K. Zuo *et al.*, in preparation.