

4-3-3 超伝導デバイス技術

4-3-3 Superconducting Device Technology

寺井 弘高

TERAI Hirotaka

超伝導デバイス技術は、高感度な磁気センサ、電磁波センサ、超高速・低消費電力デジタル演算素子、電圧標準、量子コンピュータ等に応用可能であり、活発に研究開発が行われている。本稿では、NICT が取り組んでいる紫外から中赤外に感度を持つ超伝導ナノストリップ単一光子検出器 (SNSPD)、テラヘルツ帯のヘテロダイン受信機、超高速・省電力デジタル回路、超伝導量子ビットについて紹介する。

Superconducting devices are vigorously researched and developed for the applications to various sensors such as high sensitivity magnetic sensors and electromagnetic field sensors high-speed and low-power digital circuits, voltage standard, quantum computers and so on. In this paper, we introduce our research activities on superconducting nanostrip single-photon detectors that are sensitive to the photons from ultra-violet to mid-infrared wavelength, heterodyne receivers for terahertz band, high-speed and low-power digital circuits, and superconducting qubits.

1 まえがき

超伝導現象は、ある温度以下で電気抵抗が消失すると同時に、超伝導体内部の磁束が完全に排除されるという現象で、この現象を利用した応用研究が活発に行われている。エレクトロニクス分野では、各種センサや高速・省電力なデジタル回路、量子コンピュータ等への応用を目指した研究開発が行われており、すでに実用化に至っている技術もある。これまで、超伝導エレクトロニクスの分野では、超伝導材料としてニオブ (Nb) が使われてきたが、その背景としてエレクトロニクス分野で重要な役割を果たすジョセフソン素子と呼ばれる能動素子 (半導体集積回路におけるトランジスタのような役割の素子) として、優れた接合特性の制御性と安定性を持つ Nb/Al/AIOx/Nb 接合をベースとした集積回路プロセスが確立していることがある。しかしながら、Nb の超伝導転移温度 (T_c) は約 9 K であるため、デバイスを液体ヘリウム温度 (4.2 K) 以下に冷却する必要があり、また表面に誘電損失の大きい酸化膜が生成されやすく、超伝導量子ビットに応用した際に表面酸化膜に起因したエネルギーの散逸が発生する等の問題が顕在化してきている。

NICT では、 T_c が 16 K と Nb よりも高く、表面酸化耐性に優れた窒化物超伝導体を用いて研究開発に取り組んでいる。図 1 に窒化物超伝導薄膜・デバイス技

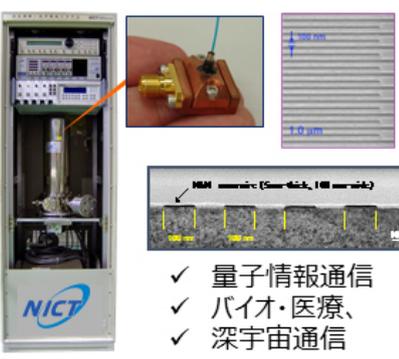
術をコアとした NICT の研究開発の概要を示す。 T_c が高い NbN を用いることで、より冷却エネルギー効率の高い 10 K 冷凍機での冷却が可能であり、冷却コストの低減という観点で超伝導デジタル集積回路への応用でメリットが大きい。また、 T_c が高いことでより高い周波数での動作が可能であり、世界最大の電波望遠鏡である ALMA 望遠鏡の最も高い周波数帯域の Band10 受信機 (750 ~ 965 GHz が観測対象) においては、同調回路の損失を低減するために Nb 薄膜ではなく NICT の窒化ニオブチタン (NbTiN) 薄膜が採用されている [1]。一方、表面酸化耐性に優れていることは、超伝導ナノストリップ単一光子検出器 (SNSPD) の作製に必要な 5 nm 以下の超薄膜の作製だけでなく、表面酸化膜による誘電損失の影響を受けやすい超伝導量子ビットへの応用でも大きな優位性となる。本稿では、我々が取り組んでいる 4 つの研究課題のうち、超伝導ナノストリップ単一光子検出器、超伝導量子ビットについてもう少し詳しく研究開発の現状を紹介したい。

2 研究開発内容の概要

2.1 超伝導ナノストリップ単一光子検出器 (SNSPD)

NICT では量子情報通信への応用を目指して通信波長帯 (1,550 nm) マルチチャンネル SNSPD システムを開発した。SNSPD の動作原理、研究開発の経緯の詳細

超伝導ナストリップ単一光子検出器 (SNSPD)

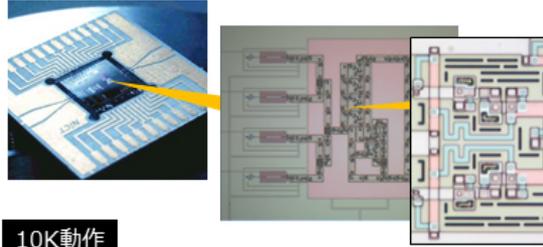


検出効率：
~ 88% @ 1550nm
~ 91% @ 850nm

超極薄膜

- ✓ 量子情報通信
- ✓ バイオ・医療、
- ✓ 深宇宙通信

超伝導デジタル集積回路

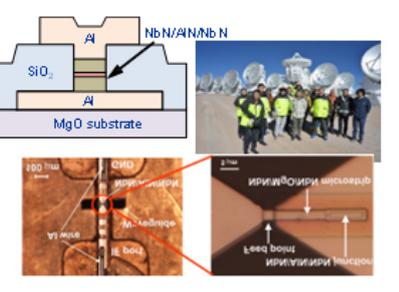


10K動作

- ✓ 超低消費電力情報処理
- ✓ 超伝導センサ後段信号処理
- ✓ 量子ビット制御・読出し

NICTのコア技術
高品質窒化物超伝導
薄膜・デバイス技術

テラヘルツ受信機



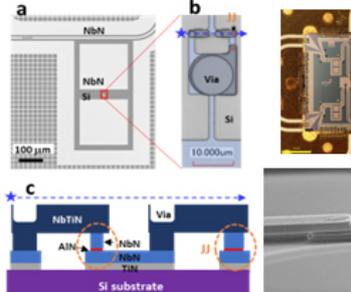
$T_{CNb} (\sim 9\text{ K}) < T_{CNbN} (\sim 16\text{ K})$

高周波動作

動作周波数
Nb: ~750 GHz
NbN: 1.2 THz

- ✓ 電波天文応用 (ALMA受信機) with 国立天文台

超伝導量子ビット



超低損失

NbN/AlN/NbN
エピタキシャル
接合技術

量子コンピュータ、量子ノード

図1 窒化物超伝導薄膜・デバイス技術をコアとした NICT における超伝導デバイスの研究開発

については文献1を参照されたい [2]。表1に開発したマルチチャンネル SNSPD システムの性能をまとめた。1,550 nm での検出効率はすでに 90 % 近くに達しており、InGaAs アバランシェフォトダイオード (APD) の約 20 % を大きく凌駕しており、ノイズ指標である暗計数率についても 100 カウント / 秒以下、光子検出の時間ゆらぎ (ジッタ) も 50 ps 以下と小さく、量子情報通信分野の研究開発ですでに広く利用されている。NICT で開発した SNSPD システムは、水冷不要、100 V 電源で駆動可能な機械式冷凍機で冷却可能であり、高額な液体ヘリウム等の冷媒を使用せずに 10,000 時間以上の連続使用が可能である。我々が開発した技術は (株) 浜松ホトニクスに技術移転済みであり、昨年には浜松ホトニクスで製造した SNSPD システムを使って量子ネットワークの基礎実験に成功する等、SNSPD システムの国産化も着々と進んでいる [3]。1,550 nm だけでなく可視から近赤外の所望の光波長に対して高い検出効率の SNSPD を実現することが可能であり [4]、1,550 nm よりも長い中赤外用の SNSPD についても研究開発を進めている [5]。また、SNSPD を多ピクセル化することで、大面積化、高計数率化、疑似光子数識別、単一光子イメージングが可能になるなど、SNSPD の応用範囲を広げることができる。

表1 SNSPD の性能表

パラメータ	典型値
システム検出効率 ($\lambda=1,550\text{ nm}$)	80%
暗計数率	1-100 Hz
最大計数率	20-40 MHz
ジッタ (FWHM)	50 ps
入力	光ファイバ (SMF or MMF)
出力ポート	SMAコネクタ
冷凍機	0.1 W GM冷凍機 (空冷式、AC100V駆動)
最低到達温度	< 2.5 K
連続運転時間	10,000 hours

NICT では、単一磁束量子論理回路による極低温信号処理を用いて、多ピクセル SNSPD の研究開発に取り組んでいる [6][7]。

2.2 窒化物超伝導量子ビット

超伝導量子ビットは、原子、イオン、スピンといっ

た数ある量子コンピュータのハードウェア候補の中で最も集積化が進んでおり、Google、IBM等の大手IT企業が巨額の研究資金を投じて精力的に研究開発を進めている。ほとんどの研究機関で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にAl/AIO_x/Al接合を採用しているが、非晶質のAIO_xに含まれる2準位系に起因したデコヒーレンスや接合特性の均一性、制御性が課題となっている。我々はAlに替わる新たな材料プラットフォームとして窒化物超伝導体に注目しており、NbN/AlN/NbNエピタキシャル接合をベースとした超伝導量子ビットの開発に取り組んでいる。窒化物超伝導体は表面酸化膜が形成されにくく、超伝導量子ビットの電極材料に起因した誘電損失を低減するうえでも有効である。我々はシリコン基板上にNbN/AlN/NbNエピタキシャル接合を実現するため、水素終端したシリコン基板上に加熱成膜して配向成長させたTiN薄膜をバッファ層として用いているが、このTiN薄膜は超伝導量子ビットの電極材料としても非常にマイクロ波損失が小さく、理研が中心となって開発を進めている超伝導量子コンピュータ(今年3月に国産初の量子コンピュータとしてクラウド公開された)にも採用されている[8]。このシリコン基板上に配向成長したTiN薄膜上にNbN/AlN/NbNエピタキシャル接合を作製することが可能であり、トンネル障壁に非晶質のAIO_xではなく結晶化したAlNを用いることでコヒーレンス時間の改善を目指している。図2にNbN/AlN/NbNエピタキシャル接合の走査電子顕微鏡写真を示す。犠牲層である非晶質のSiO₂もAIO_xと同様デコヒーレンスの要因となるため、最終的にバッファードフッ酸でSiO₂を除去している[9]。この接合作製技術を用いて超伝導量子ビットを作製・評価し、20 μsを超えるコヒーレンス時間の観測に成功した[10]。しかしながら、20 μsというコヒーレンス時間

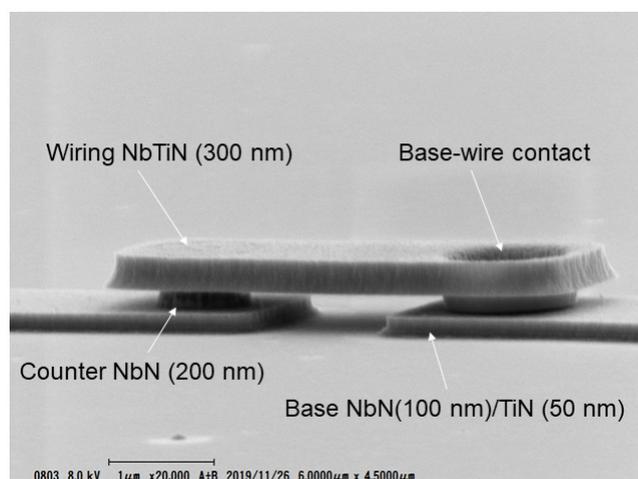


図2 NbN/AlN/NbNエピタキシャル接合の走査電子顕微鏡写真

はAl/AIO_x/Al接合を用いたトップデータと比べてまだ1桁程度短く、更なるコヒーレンス時間の改善に向けて、デコヒーレンス要因の究明が必要であり、そのための新たな素子構造の探索・設計・作製に取り組んでいる。

3 おわりに

NICTで取り組んでいる超伝導デバイスの研究開発を紹介した。NICTの特色として、窒化物超伝導薄膜デバイス技術をコアとして研究開発を展開している点があり、ALMA Band10受信機への貢献やSNSPDシステムの技術移転等、すでに実用化の域に達している技術もある。SNSPDは、今後も高性能化、高機能化の余地は十分にあり、量子情報通信だけにとどまらず、その応用範囲は更に広がっていくものと考えている。また、超伝導量子ビットにおいては、窒化物超伝導材料という新たな材料プラットフォームの確立に向けた研究開発に取り組んでおり、材料工学という観点から量子情報処理分野の発展に貢献していきたいと考えている。このようなNICTの特色ある技術をより広範な研究開発で活用できるよう、外部機関との連携を更に強化し、超伝導エレクトロニクスの研究開発拠点として、超伝導デバイス技術の発展・実用化に貢献していくことがミッションと考えている。

謝辞

本稿の執筆にあたり、日頃から議論していただいている超伝導ICT研究室メンバーに感謝する。本研究の一部は、科学研究費、JST ERATO、CREST、光・量子飛躍フラグシッププログラム(Q-LEAP)、ムーンショット型研究開発制度(目標6)、総務省委託事業の助成を受けたものである。各プロジェクト関係者にこの場を借りて感謝申し上げる。

【参考文献】

- 1 T. Kojima, M. Kroug, M. Takeda, Y. Uzawa, W. Shan, Y. Fujii, Z. Wang, and H. Ogawa, "Three Quanta Sensitivity Superconductor-Insulator-Superconductor Mixer for the 0.78-0.95 THz Band," Appl. Phys. Exp. vol.2, 102201, 2009.
- 2 寺井 弘高, "超伝導ナノワイヤ単一光子検出器," 日本応用物理学会誌, 第90巻, pp.148-154, 2021.
- 3 プレスリリース, "量子コンピュータに向けたハイエンドな国産超伝導ナノワイヤ単一光子検出器システムのフィールド実証に成功," Sept. 16, 2022, <https://www.nict.go.jp/press/2022/09/16-1.html>
- 4 T. Yamashita, K. Waki, S. Miki, R. A. Kirkwood, R. H. Hadfield, and H. Terai, "Superconducting nanowire single-photon detectors with non-periodic dielectric multilayers," Scientific Reports, vol.6, 35240, 2016.
- 5 F. China, M. Yabuno, S. Mima, S. Miyajima, H. Terai, and S. Miki, "Highly efficient NbTiN nanostrip single-photon detectors using dielectric multilayer cavities for a 2-μm wavelength band," Optics Express, vol.31,

4 百折不撓・デバイス研究

- no.12, pp.20471–20479, 2023.
- 6 H. Terai, S. Miki, and Z. Wang, “Readout Electronics Using Single-Flux-Quantum Circuit Technology for Superconducting Single-Photon Detector Array,” *IEEE Trans. on Appl. Supercond.*, vol.19, no.3, pp.350–353, 2009.
 - 7 S. Miki, S. Miyajima, F. China, M. Yabuno, and H. Terai, “Photon detection at 1 ns time intervals using 16-element SNSPD array with SFQ multiplexer,” *Optics Letters*, vol.46, pp.6015–6018, 2021.
 - 8 プレスリリース, “量子コンピュータを利用できる「量子計算クラウドサービス」開始ー国産超伝導量子コンピュータ初号機の公開ー,” March 24, 2023.
<https://www.nict.go.jp/publicity/topics/2023/03/24-1.html>
 - 9 W. Qiu and H. Terai, “Fabrication of deep-sub-micrometer NbN/AlN/NbN epitaxial junctions on a Si substrate,” *Appl. Phys. Express*, vol.13, 126501, 2020.
 - 10 S.Kim, H. Terai, T. Yamashita, W. Qiu, T. Fuse, F. Yoshihara, S. Ashhab, K. Inomata, and K. Semba, “Enhanced coherence of all-nitride superconducting qubits epitaxially grown on silicon substrate,” *Communications Materials*, vol.2, Article number 98, 2021.



寺井 弘高 (てらい ひろたか)

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
上席研究員
博士 (工学)
超伝導エレクトロニクス

【受賞歴】

2021 年 第 66 回 (令和 2 年度) 前島密賞
2018 年 第 22 回超伝導科学技術賞
2000 年 第 8 回応用物理学会講演奨励賞