

## NbTiN 超薄膜の膜厚依存性の評価

## Evaluation of the thickness dependencies for NbTiN ultra-thin films

丸山 晃平, 鈴木 雅斗, 佐野 京佑, 田中 雅光, 藤巻 明(名大); 井上 真澄(名城大)  
 MARUYAMA Kohei, SUZUKI Masato, SANO Kyosuke, TANAKA Masamitsu, FUJIMAKI Akira(Nagoya Univ.);  
 INOUE Masumi(Meijo Univ.)  
 E-mail: maruyama@super.nuee.nagoya-u.ac.jp

## 1. はじめに

超伝導エレクトロニクスにおいて、増幅機能を持つ 3 端子デバイス、すなわちトランジスタの不在が、その発展の障害となっていた。一方、超伝導転移端センサや超伝導ナノワイヤ単一光子検出器において、小さなエネルギーの粒子検出が実証され、検出器分野では超伝導-常伝導転移の利用が注目されていた。そのような背景のもと、米国マサチューセッツ工科大学のグループは、超伝導-常伝導転移を利用したトランジスタ、ナノクライオトロン(nTron)を提案・実証した[1]。実用に耐え得る相互抵抗(入力電流と出力電圧の比)を持つ可能性があることから、半導体回路とのインターフェイスなど、様々な応用の可能性が検討されている。

検出器を含め、共通しているのは超伝導超薄膜を利用していることである。そこで我々は、特性が下地基板の影響を受けにくい NbTiN を取り上げ、超薄膜デバイスの基礎となる薄膜自身の特性を評価した。

## 2. 実験

熱酸化 Si 基板上に NbTi<sub>x</sub> ターゲットを用い、窒素ガスを含めた反応性マグネトロンスパッタリング法により NbTiN 薄膜を堆積した。膜厚は、成膜時間によって制御している。その後、直線上のパターンにイオンビームエッチング装置を用いて加工した。測定は、ヘリウム液中あるいはガス中において、温度を変化させながら四端子法により抵抗値の測定を行った。抵抗率は 20K 時での値とした。

## 3. 実験結果

Fig. 1 に、臨界温度の膜厚依存性を示す。膜厚が 20 nm を下回ると、徐々に臨界温度が低下している。膜厚がコヒーレンス長よりも大きい領域であること、オンセットで定義される臨界温度も同時に低下していることから、粒界が抵抗値に影響を与えている可能性は低いものと考えている。温度依存の原因は、粒内の結晶性の膜厚依存性、あるいはそれに伴う基板近傍の非超伝導層の近接効果の影響などが考えられる。

Fig. 2 に 10nm のときの、抵抗-温度特性を示す。小さな抵抗が臨界温度以下で発生している。これは、膜厚の薄いときだけに観測されていることから、何らかの理由で Vortex の侵入もしくは vortex-antivortex 対の生成が起りやすい状況が生まれているものと考えられる。なお、nTron は、この微小抵抗領域から常伝導状態への転移を利用していると考えられることから、素子作製に向けた有効な情報が得られたものと考えている。

Fig. 3 に電気抵抗率の膜厚依存性を示す。測定値は超薄膜領域でばらついてはいるが、バルク領域と比べると上昇している。これは、結晶が基板近傍と表面近傍では異なっていることを示唆している。ばらつきの原因は、成膜時の装置の状況が何らかの原因で異なったためと考えているが、系統的なデータの収集が再度必要である。今後は、再現性の確認やホール効果測定によるキャリア密度の膜厚依存性についても評価を行っていく。

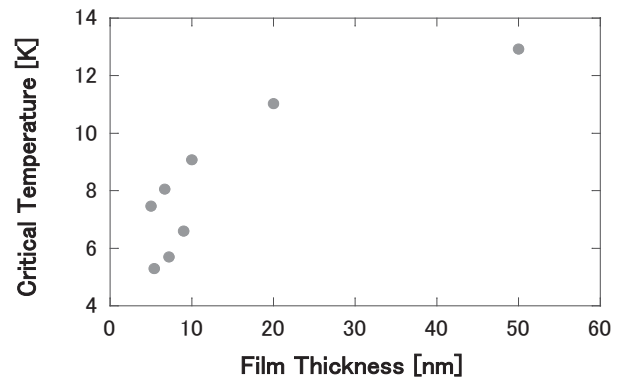


Fig. 1 Film thickness dependence of critical temperature

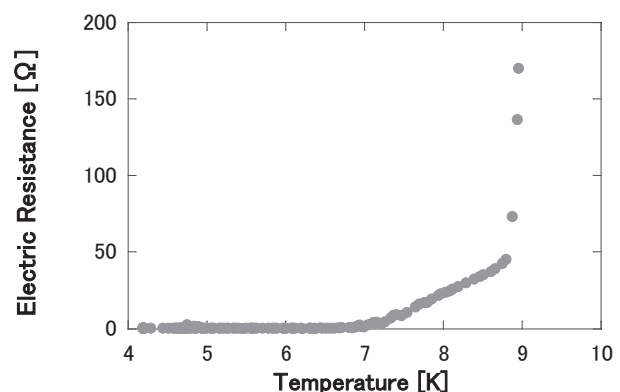


Fig. 2 Temperature-electric resistance characteristic (10nm)

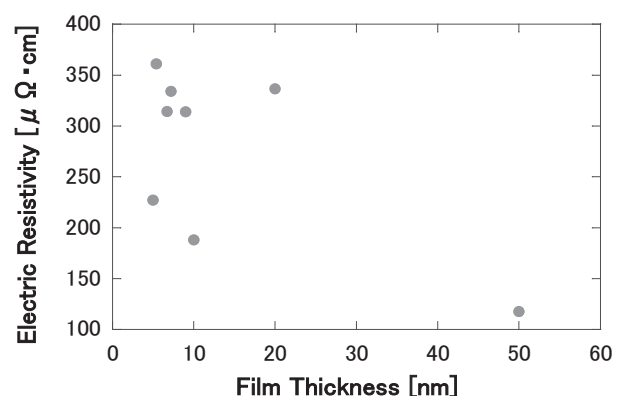


Fig. 3 Film thickness dependence of electric resistivity (20K)

## 参考文献

1. Adam N. McCaughan and Karl K. Berggren:  
 A superconducting-nanowire 3-terminal electrothermal device, Nano Lett.(2014)

## 謝辞

本研究は科研費(26220904,16H02340)の助成を受けて実施したものである。

# 熱援用デバイスの作製に向けた超伝導超薄膜細線の特性評価

## Study on Superconducting nano-wires with ultra-thin films for thermally assisted nano-structured devices

佐野 京佑, 鈴木 雅斗, 丸山 晃平, 田中 雅光, 藤巻 朗(名古屋大学); 井上 真澄(名城大学)  
 SANO Kyosuke, SUZUKI Masato, MARUYAMA Kohei, TANAKA Masamitsu, FUJIMAKI Akira (Nagoya Univ.);  
 INOUE Masumi (Meijo Univ.)  
 E-mail: k\_sano@super.nuee.nagoya-u.ac.jp

### 1. はじめに

単一光子検出器[1]やナノクライオトロン[2]など現在超伝導超薄膜の超伝導-常伝導転移を利用したデバイスが盛んに研究されている。しかしながら、常伝導転移する物理的メカニズムは必ずしも解明されておらず[3], その理解はデバイスの設計上の課題となっている。これらのデバイスに用いられる超伝導薄膜の膜厚は数 nm 程度と極めて薄く、疑似二次元と言える。この領域では、超伝導巨視的波動関数の位相揺らぎの効果により vortex-antivortex pair (VAP) の形成・分離が起きやすくなる[4], この効果により超伝導薄膜の超伝導-常伝導転移が促進されている可能性がある。

今回、超薄膜における位相揺らぎの効果を明らかにするため、NbTiN 超薄膜を用いて超伝導細線を作製し、その線幅依存性及び温度依存性等を調査した。その結果について報告する。

### 2. 超伝導超薄膜細線の作製

本研究では、下地基板の結晶性の大きく左右されない NbTiN 薄膜[5]に着目し細線の作製を行った。Si 基板上に DC マグネトロンスパッタ法により NbTiN 薄膜を堆積させ、光リソグラフィ及び電子線リソグラフィを用いてパターンを形成し、反応性イオンエッチングにて加工を行った。電子線露光の条件は、加速電圧 50 kV, ドーズ時間 0.2  $\mu\text{s}/\text{cm}^2$ , ビーム電流  $2.0 \times 10^{-11}$  A とした。本条件にて、膜厚 10 nm の薄膜を用いて、Fig. 1 に示した模式図のような細線幅が磁場侵入長以下の細線(設計値  $w = 150, 200$  nm)を作製した。

### 3. 特性評価

作製した超伝導薄膜細線の評価は、液体ヘリウム中及び蒸発ガス雰囲気中で温度を調整を行った。Fig. 2 に細線幅 150, 250 nm の超伝導細線の抵抗-温度特性を示す。7.2-7.3 K にて抵抗値が急激に上昇し細線全体が常伝導領域へと転移することが確認できる。一方で、7.2 K 以下の温度においても徐々に抵抗値が増大していくことが分かる。この領域では、VAP の形成・分離により細線が電圧状態となっていると考えられる。このテールを引いた領域は、150 nm の時の方が広く、同膜厚の同一サンプルにて本結果が得られたことから、線幅を狭くしたことにより VAP の形成・分離の影響が大きく現れたと考えられる。また、Fig. 3 に液体ヘリウム中 (4.2 K) にて得られた幅 150 nm の細線の電流-電圧特性を示す。電圧状態にて、比較的急峻な電圧の飛びが等間隔で観測できる。これは細線幅が細く位相滑りの効果が見えている可能性を示しており、vortex の侵入しやすい状態となっていると考えられる。

今後は、より薄くより細い超伝導薄膜細線を作製しその特性を調査し、超伝導薄膜を用いたデバイスに適した条件を明らかにする。

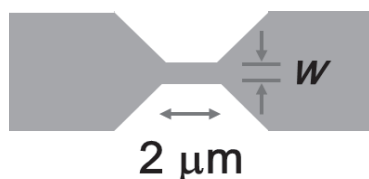


Fig.1 Schematic diagram of nanowires

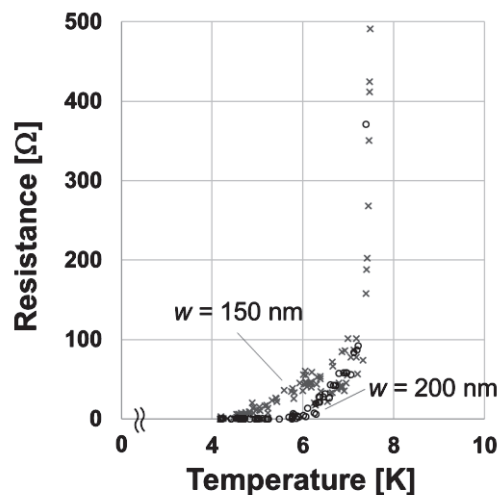


Fig.2 Temperature dependence of resistances for the nanowires with different widths

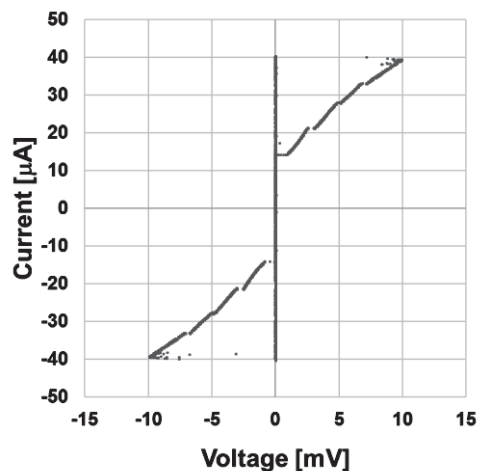


Fig.3 Current-voltage characteristic of fabricated 150-nm-wide nanowire obtained at 4.2 K

### 参考文献

1. G. N. Gol'tsman, et al.: Appl. Phys. Lett., Vol. 79 (2001) p. 705
2. A. N. McCaughan and K. K. Berggren: Nano Lett., Vol. 14 (2014) p. 5748
3. A. Engel, et al.: Supercond. Sci. Technol., Vol. 28 (2015) p. 114003
4. T. Yamashita, et al: Appl. Phys. Lett., Vol. 99 (2011), p. 161105
5. K. Makise, et al: IEEE Trans. Appl. Supercond., Vol. 21 (2011) p. 139

### 謝辞

本研究の一部は科研費 (26220904, 16H02340, 16H02796) の助成を受けて実施したものである。

# AQFP の低エネルギー散逸の測定に向けた超伝導共振器の検討

## Study on Superconducting Resonators for Measuring Low Energy-Dissipation in AQFP

ケイ 育閣, 竹内 尚輝, 山梨 裕希, 吉川 信行 (横浜国大)

XING Yuge, TAKEUCHI Naoki, YAMANASHI Yuki, YOSHIKAWA Nobuyuki (YNU)

E-mail: xing-yuge-nv@ynu.jp

### 1. はじめに

現在の計算機を構成する半導体集積回路は、微細化の限界が近づいていて、性能の向上が難しくなっている。また、エネルギー効率の向上も難しく、エクサスケールのスパコンを実現するにあたり、現在の CMOS プロセッサでは膨大な電力が必要であることが予想される。

これらの問題を解決するため、我々は、CMOS より高速で、超低消費電力である断熱型量子磁束パラメトロン (Adiabatic Quantum Flux Parametron; AQFP) [1] を研究している。AQFP 回路はスイッチングの際にポテンシャルエネルギーを断熱的に変化させることで動的な消費電力を減少させることが可能である [2]。

我々はこれまでの研究で、Q 値が 350 程度の超伝導共振器を用いて、AQFP 回路のスイッチングエネルギーがわずか 10 zJ であることを示した [3]。さらに低電力化された AQFP 回路 [4] の消費エネルギーを実測するためには、より高い Q 値を有する超伝導共振器が必要である。そこで本研究では、ニオブ超伝導集積回路プロセス [5] を用いて、高い Q 値を有する超伝導共振器の実現に向けた検討を行った。

### 2. 超伝導共振器

本検討では、Q 値の異なる 3 つの半波長超伝導共振器を設計し、シミュレーションおよび測定による評価を行った。Figure 1 に、設計した半波長共振器の回路図を示す。共振器は特性インピーダンス ( $Z_0$ ) 50  $\Omega$  のマイクロストリップラインで構成され、トランスを介してフィードラインに磁気結合される。Q 値は、トランスの相互インダクタンス  $M$  を変えることにより調整される。Figure 2 に、設計した超伝導共振器のレイアウト図を示す。共振周波数は 2 GHz である。Figure 3 に、試作した共振器の通過特性を示す  $S_{21}$  の測定結果を示す。Table 1 に、電磁界シミュレーター Sonnet を用いたシミュレーション結果と測定結果の比較を示す。シミュレーションに対して、測定で得られた Q 値は低いことが分かった。特に Q 値が高くなるに連れて、 $S_{21}$  の挿入損失が徐々に下がること分かる。これは、共振器自身の損失が大きいのことを示している。

今後は、損失が小さくなるような共振器の構造を検討し、 $10^5$  程度の Q 値の実現を目指す。検討の詳細については、発表当日に報告する。

### 謝辞

本研究に使用された回路は、(独)産業技術総合研究所 (AIST) の超伝導クリーンルーム (CRAVITY) において、AIST-STP2 プロセスを用いて作製された。

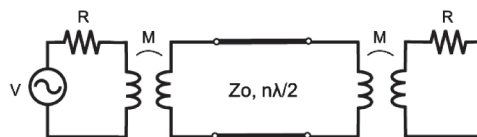


Fig.1 Circuit schematic of distributed constant resonator

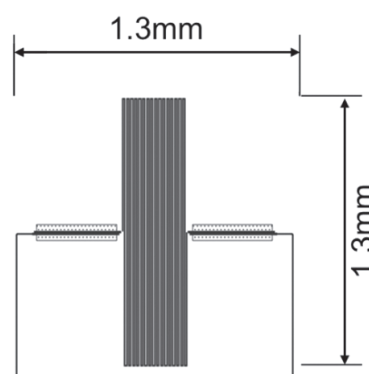


Fig.2 Layout of distributed constant resonator

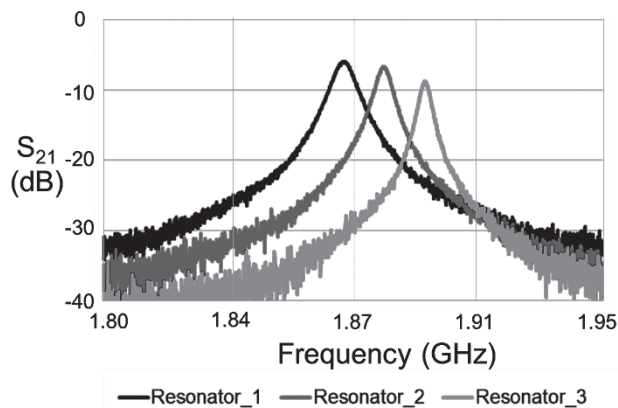


Fig.3 Measurement results of  $S_{21}$

Tab.1 Measured Q-values in comparison with simulated results

	Resonator_1	Resonator_2	Resonator_3
simulated Q-value	360	600	1334
Measured Q-value	249	389	512

### 参考文献

1. N. Takeuchi, D. Ozawa, Y. Yamanashi, and N. Yoshikawa, Supercond. Sci. Technol. 26, 35010 (2013).
2. N. Takeuchi et al., IEEE Appl. Supercond. 23, 3 (2013).
3. N. Takeuchi, Y. Yamanashi, and N. Yoshikawa, Appl. Phys. Lett. 102, 52602 (2013).
4. N. Takeuchi, Y. Yamanashi, and N. Yoshikawa, Phys. Rev. Appl. 4, 34007 (2015).
5. S. Nagasawa, Y. Hashimoto, H. Numata, and S. Tahara, IEEE Trans. Appl. Supercond. 5, 2447 (1995).

# 高駆動能力を持つ単一磁束量子回路向け交流/直流電力変換素子

## AC-DC converters having high driving capacity for single flux quantum circuits

谷口 壮耶, 神谷 智大, 岩下 颯斗, 佐野 京佑, 田中 雅光, 藤巻 朗(名大)

TANIGUCHI Soya, KAMIYA Tomohiro, IWASHITA Hayato,  
 SANO Kyosuke, TANAKA Masamitsu, FUJIMAKI Akira (Nagoya Univ.)  
 E-mail: taniguchi@super.nuqe.nagoya-u.ac.jp

### 1. はじめに

単一磁束量子(SFQ)回路は高速動作、低消費電力という特徴を持つ。SFQ 回路は定電流駆動の回路であり、各回路ブロックに対し適切なバイアス電流を個別に供給する必要がある。現在では複数の直流電源を用いて供給しているが、回路規模に従って電源の数が増え、室温から極低温への熱流入の問題や、電源の消費電力の増加の問題が生じていた。

我々はインライン型ジョセフソン接合とその近傍に配置した磁性体の残留磁化を利用することで超伝導ダイオードを作製し、高い非対称性と高い負荷駆動能力を持つ交流/直流変換素子を実現できることをすでに示した[1]。この超伝導ダイオードを用いて交流/直流変換回路を作製し、SFQ 回路を交流電源から駆動することで、電源による問題を解決することができる。加えて、我々の超伝導ダイオードは磁性体の残留磁化強度を制御して閾値を変化させることができ、その結果負荷に供給する電力量を制御することができる。今回超伝導ダイオードの閾値を制御することによって電力の制御を行ったので報告する。

### 2. 実験

Fig.1 に作製したジョセフソン接合の外部磁場特性を示す。産業技術総合研究所のNb4層 10 kA/cm<sup>2</sup>プロセスを利用し、接合面積は20x1 μm<sup>2</sup>、最大の $I_c$ は1.8 mAとなっている。超伝導ダイオードとして利用するためには磁性体の磁化を調整し、 $B_{ex} = 300 \mu\text{T}$  程度の磁場がジョセフソン接合に加わるようにし、 $I_c$ と $I_{c+}$ の比が大きくなる点で動作させる。電流を入力し、両端に現れる電圧を測定すると半波整流となる。ジョセフソン接合に $B_{ex} = 300 \mu\text{T}$ を加えたうえで正弦波を入力して半波整流を行ったものと、2200 μFのコンデンサによって平滑化させたものを Fig.2 に示す。出力電圧 $V_{out}$ は開放電圧を見ているが、コンデンサ接続後は蓄えられた電荷が接合に逆流するため、平均電圧として1 mV程度の電圧が得られた。なお、平滑後の波形にはリップル成分が含まれているが、これは入力周波数の低さによるもので、入力周波数を高く設定すれば容易に改善が可能である。

一方、ジョセフソン接合に加わる磁場を制御し、 $B_{ex} = 150 \mu\text{T}$ となる場合の出力波形を Fig.3 に示す。接合の $I_c$ が変化することによってジョセフソン接合は入力負の周期でもスイッチするように動作が変化している。その結果コンデンサによる平滑化を行った後では Fig.2 と比較して電圧値が小さくなり、0.6 mV程度の電圧値が得られた。今回はジョセフソン接合に加わる磁場の大きさを外部コイルで制御したが、磁性体の磁化を制御することでジョセフソン接合に加わる磁場の大きさは制御できる[2]。その為、磁性体を用いて負荷に供給する電力量を容易に変更可能な交流/直流電力変換素子の作製に成功した。

### 参考文献

1. S. Taniguchi, et al.: Abstracts of the 78<sup>th</sup> JSAP Autumn Meeting, 7p-S41-15 (2017)
2. S. Taniguchi, et al.: Jpn. J. Appl. Phys., Vol. 54, 043101 (2015)

### 謝辞

本研究は科研費(26220904, 16H02340, 26420306, 16J11440)の助成を受けたものである。また本研究で使用した回路の一部は、産業技術総合研究所(AIST)の超伝導クリーンルーム(CRAVITY)において作製された。

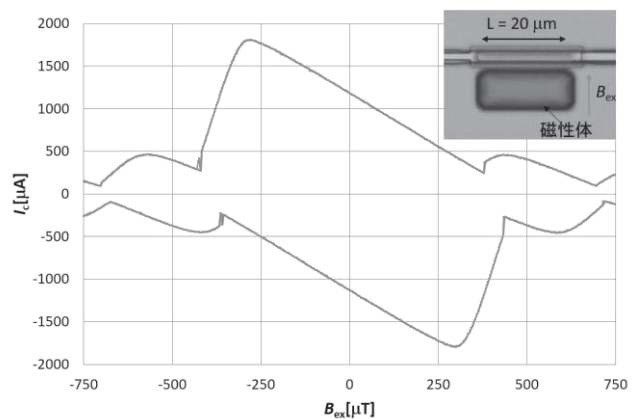


Fig.1 Threshold characteristics of fabricated JJ

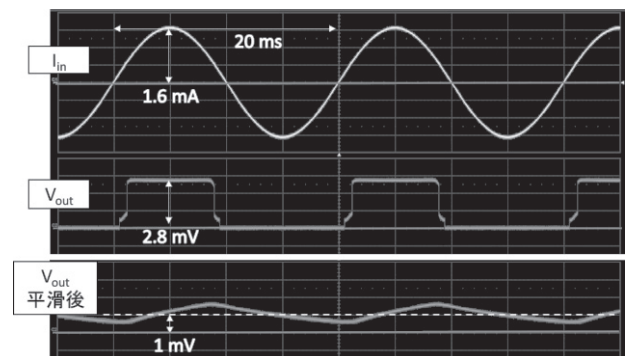


Fig.2 Output voltages of rectifier at  $B_{ex} = 300 \mu\text{T}$

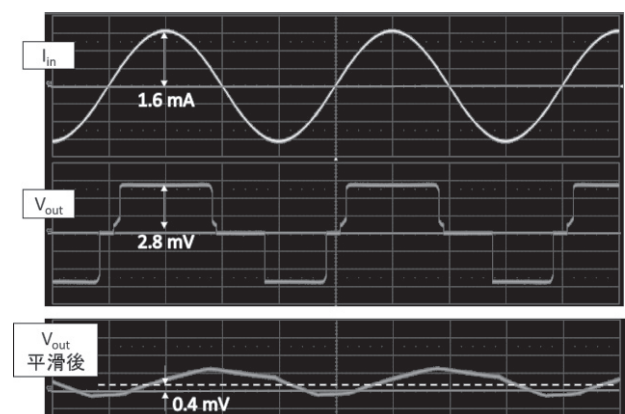


Fig.3 Output voltages of rectifier at  $B_{ex} = 150 \mu\text{T}$

# 単一磁束量子 FFT プロセッサの安定動作に向けた改善

## Improvement of design of single-flux-quantum FFT processors for their stable operation

佐藤 僚亮, 小野 智裕, 山梨 裕希, 吉川 信行 (横浜国大)

SATO Ryosuke, ONO Tomohiro, YAMANASHI Yuki, YOSHIKAWA Nobuyuki (Yokohama Nat. Univ.)

E-mail: sato-ryosuke-ck@ynu.jp

### 1. はじめに

現在、主にデジタル信号処理の分野で時間波形を周波数成分に分解するフーリエ変換が広く用いられている。このフーリエ変換をコンピュータ上で高速に演算を行うアルゴリズムとして高速フーリエ変換(FFT : Fast Fourier Transform)が用いられている。高速に FFT を行うための専用ハードウェアとして FFT プロセッサの開発がなされている。しかし、現在普及している FFT プロセッサは、半導体集積回路を用いているため、FFT の膨大な計算により、発生する消費電力と発熱量が問題となっている。そこで、我々は高速動作と低消費電力性が特徴の SFQ(Single Flux Quantum)回路を用いた FFT プロセッサの動作実証を目指している。

我々は、すでに 4 bit - 8 point SFQ FFT プロセッサを AIST 10kA/cm<sup>2</sup> Nb アドバンスドプロセス(ADP 2.2) [1]を用いて実装し一周分の正常動作を確認している[2]。しかし、FFT 演算に必要な再帰的な演算の動作実証には至っていない。

今回、我々は動作マージンを制限している要因を突き止め、再帰的な演算の安定動作に向け FFT プロセッサのアーキテクチャの変更を行った。

### 2. オンチップ SFQ FFT プロセッサ

8-point の FFT 演算のデータの流れを図 1 に示す。8-point の FFT 演算は、図 1 のように 3 つのステージに分けられる。各ステージにおいてバタフライ演算を行いその後、次ステージの演算に向け、データの並び替えが行われる。これを繰り返すことにより、FFT 演算を行っている。図 2 にオンチップ FFT プロセッサの構成図を示す。入力データは、Data Buffer に低速で書き込まれ、保持される。その後、バタフライ演算回路においてバタフライ演算が行われ、Rounding 回路においてバタフライ演算の過程で増えたビット数の削減を行う。最後に Shuffling 回路において次ステージの演算に向け、並び替えを行う。この動作を複数回繰り返すことにより、FFT 演算を実現している。この構成の 4 bit - 8 point SFQ FFT プロセッサは、一周分の動作実証がなされている。

### 3. オンチップ SFQ FFT プロセッサの改善

図 2 の構成の SFQ FFT プロセッサでは、Rounding 回路が動作マージンを制限していた。その原因として Rounding 回路内において、クロックおよびデータを分周している Toggle Flip Flop (TFF) セルの動作不良が考えられる。今回は、この TFF セルを用いない構成の SFQ FFT プロセッサについて考案を行った。

今回設計した SFQ FFT プロセッサでは、従来の構成において、Rounding 回路内で行っていたデータ及びクロックに対する余分なビットの削減を行う動作を Data Buffer で行うように変更した。また、Sign ビットの検出を行う回路において用いていた TFF セルを別のセルで置き換えることにより、SFQ FFT プロセッサ全体で TFF セルを用いない構成とした。

### 4. 新構成の FFT プロセッサの実装

図 3 に ADP2.2 を用いて試作したオンチップ SFQ FFT プロセッサのチップ写真を示す。今回、試作した SFQ FFT プロセッサは、電流量 2.37 A、接合数 19435 となった。シミュレーションにおいて、最高動作周波数 80GHz、50 GHz でのパイ

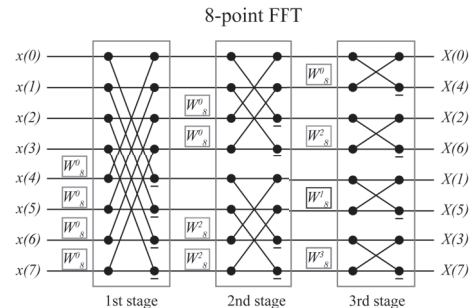


Fig.1 Data flow of 8-point FFT

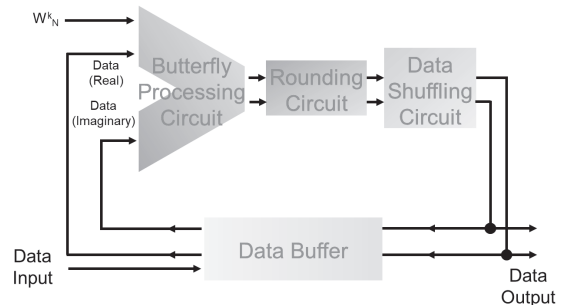


Fig.2 Structure of on-chip SFQ FFT processor

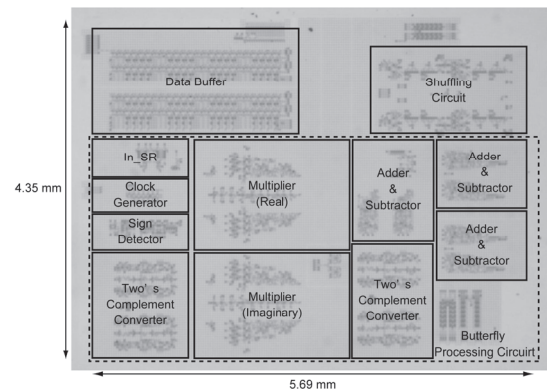


Fig.3 Picture of on-chip SFQ FFT processor

アスマージン 80% - 125%が得られている。測定結果については当日発表を行う。

### 謝辞

本研究に使用された回路は、産業技術総合研究所(AIST)の超伝導クリーンルーム(CRAVITY)において、AIST-ADP2 プロセスを用いて作製された。

### 参考文献

- S. Nagasawa et al., "Nb 9-Layer Fabrication Process for Superconducting Large-Scale SFQ Circuits and Its Process Evaluation," IEICE Transactions on Electronics, vol. E97.C, no. 3, pp. 132-140, 2014.
- T. Ono, H. Suzuki, Y. Yamanashi, and N. Yoshikawa, "Design and Implementation of an SFQ-Based Single-Chip FFT Processor," IEEE Trans. Appl. Supercond., vol. 27, no. 4, pp. 1-5, Jun. 2017.

# AQFP 回路の微細化に向けた rf-SQUID 結合素子の検討

## Investigation of rf-SQUID for miniaturization of AQFP circuit

荒井 孝太, 竹内 尚輝, 山梨 裕希, 吉川 信行(横浜国大)

ARAI Kota, TAKEUCHI Naoki, YAMANASHI Yuki, YOSHIKAWA Nobuyuki (Yokohama Nat. Univ.)

E-mail: arai-kota-jz@ynu.jp

### 1. はじめに

将来のスーパーコンピュータ実現には低消費電力化が求められており、そこで我々は超低電力である断熱型量子磁束パラメトロン(Adiabatic quantum flux parametron: AQFP)回路の研究を行っている。AQFP の回路図を Fig.1 に示す。AQFP 回路はポテンシャルエネルギーを断熱的に変化させることで動的消費電力を極限的に低減させることができ、CMOS 回路と比較して 5 桁以上低い消費電力で動作可能である<sup>[1]</sup>。しかし、集積度が低いといった欠点も存在する。その原因の一つとして、AQFP 回路を連結させているトランスの微細化が困難であることが上げられる。そこで AQFP 回路のトランスを取り除き、接続素子として電流の向き大きさの制御ができる rf-SQUID<sup>[2]</sup>を用いることで微細化できると考え、研究を行っている。

### 2. rf-SQUID

rf-SQUID の回路図を Fig.2 に示す。rf-SQUID は超伝導リングに 1 つのジョセフソン接合を含んだ構造を取っており、rf-SQUID の特性を決める重要なパラメータとして式(1)がある。

$$\beta_L = 2\pi L I_c / \phi_0 \quad (1)$$

ここで  $L$  は rf-SQUID のループ内に含まれる合計インダクタンス、 $I_c$  はジョセフソン接合の臨界電流値、 $\phi_0$  は磁束量子である。 $\beta_L < 1$  の条件を満たすとき、外部からの磁束  $\phi_{con}$  によって rf-SQUID を流れる電流の向きを制御することができる。

本研究では、まず  $\beta_L < 1$  の条件をもとに適当にパラメータを割り当てた。 $L_1 = L_5 = 2.9$  pH、 $L_2 = L_4 = 1.24$  pH、 $L_3 = 1.66$  pH、 $I_c = 50$   $\mu$ A とし、 $\beta_L = 0.628$  において JSIM を用いて rf-SQUID の動作を確認した。シミュレーション結果を Fig. 3 に示す。 $\alpha$  は rf-SQUID の入力電流を  $I_{in}$ 、出力電流を  $I_{out}$  としたときのそれらの電流比であり、以下の式で表される。

$$\alpha = \frac{I_{out}}{I_{in}} = \frac{\beta_2 \beta_4}{(\beta_4 + \beta_5) \left( \beta_2 + \beta_3 + \frac{1}{\cos\theta} \right) + \beta_4 \beta_5} \quad (2)$$

ここで、 $\theta$  はジョセフソン接合の位相差、 $\beta$  はそれぞれのインダクタンスを  $L_{j0}$  ( $=\phi_0/2\pi I_c$  : Josephson junction inductance) で規格化したものである。シミュレーション結果からわかるように、外部から加える磁束によって rf-SQUID に流れる電流の向きと大きさの制御が可能であることがわかる。また、式(2)を検討することで  $\alpha$  の大きさの制御も可能である。

### 参考文献

[1] N. Takeuchi, K. Ehara, K. Inoue, Y. Yamanashi, and N. Yoshikawa, IEEE Trans. Appl. Supercond., vol. 23, no. 3, 1700304, Jun. 2013.

[2] N. Takeuchi "Extremely Energy-Efficient Integrated Circuits Using Adiabatic Superconductor Logic" doctoral dissertation, 2014. pp.83-88.

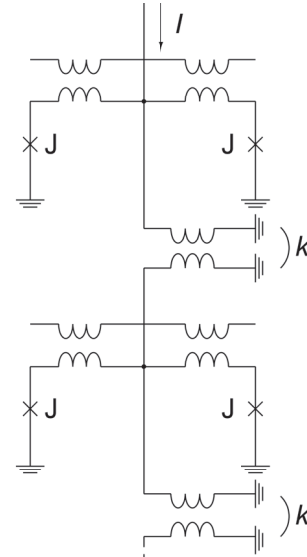


Fig.1 Schematic of AQFP circuit

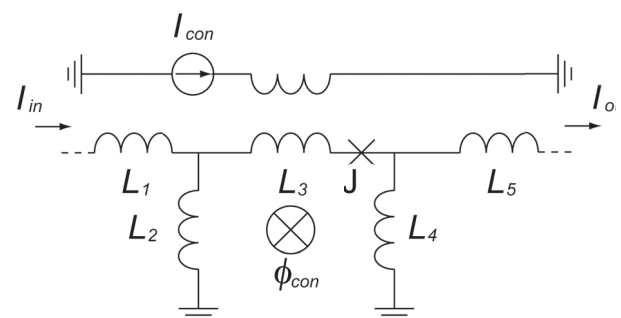


Fig.2 Schematic of rf-SQUID

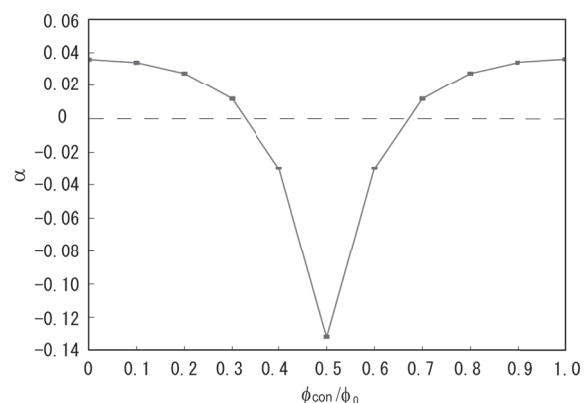


Fig.3 Simulation result of rf-SQUID

## 超伝導細線の位相すべりとデバイス応用

## Phase slips and device applications of superconducting nanowire

牧瀬 圭正, 浮辺 雅宏; 篠崎 文重; 浅野 貴行

MAKISE kazumasa, UKIBE masahiro (AIST); SHINOZAKI bunju (Kyushu univ.) ASANO takayuki (Fukui univ.)

E-mail: kf-makise@aist.go.jp

## 1. はじめに

超伝導体を低次元化すると様々な揺らぎ現象が顕著になる。例えば 2 次元伝導とみなせるほどの超伝導超薄膜では転移温度近傍で超伝導揺らぎによる抵抗の減少が顕著に観測される。さらにその超伝導転移は超伝導オーダーパラメータの位相に対して自発的対称性の破れによる相転移が有限温度では許されないため、Berezinskii-Kosterlitz-Thouless 転移 (BKT 転移) により抵抗 0 状態が生じる。さらに BKT 転移では膜の乱れが大きくなると、量子揺らぎによってクーパー対と渦糸の双対性から超伝導-絶縁体転移が起こる。一次元の場合では超伝導細線に対応し、同様の揺らぎによって細線中に常伝導状態が生じ、超伝導電流が抑制されるが、電流保存則をみたすためにオーダーパラメータの位相が  $2\pi$  すべることによってそれを満たす。これは超伝導位相すべりと呼ばれ、特に量子揺らぎによって起こる位相すべりは量子位相すべり (Quantum phase slip: QPS) と呼ばれる。さらに、この QPS はジョセフソン接合のトンネリングと双対な関係にあることが知られている[1]。すなわちジョセフソン接合の場合はクーパー対のトンネリングが、超伝導細線の場合は渦糸のトンネリングに対応し、実験的にも検証されている[2]。本講演では QPS の輸送特性の結果について触れ、QPS デバイスに必要なとされる細線の最適化に関する実験結果の詳細についてふれる。

## 2. 実験方法

試料は NbN (窒化ニオブ)、NbTiN (窒化ニオブチタン)、TiN (窒化チタン) を反応性 DC マグネトロンスパッタ法で、MgO (100) 単結晶基板上に厚さ 2-5nm の薄膜を成膜した。薄膜は XRD による構造解析により、エピタキシャル成長していること、および AFM により膜表面が平坦であることを確認している。次に成膜した膜の輸送特性を調べ超伝導揺らぎと BKT 転移の評価を行った。次に同様の条件で成膜した薄膜を電子線リソグラフィによってパターンニングし、RIE でエッチングすることで作製した。超伝導細線は幅 10nm-300nm、長さ 250-1000nm の範囲で様々な形状を持つ構造を作製した。そのパターンニングを行った細線の抵抗の温度特性および電流-電圧特性を測定した。磁場中の輸送特性も評価し、上部臨界磁場の温度依存性等も測定した。

## 3. 実験結果と考察

初めに成膜した膜の次元性を評価するために抵抗-温度特性を 2 次元超伝導揺らぎの理論フィッティングできるかということと電流-電圧特性が BKT の振る舞い示すかで評価を行った。その結果、5nm の膜厚で 2 次元的な振る舞いを示していることが分かった。次に、この 2 次元伝導性を示す膜を細線に加工した。図 1 は作成した NbTiN 超伝導細線の SEM 像である。細線の定量評価のために 4 端子測定ができるようにパターンニングを行っている。超伝導 coherence 長は 2 次元薄膜の磁場依存性からおおよそ 10nm 程度であることが見積もられており、一次元的な伝導を示す形状に加工されている。幅 10nm-30nm、長さ 250-1000nm のナノワイヤを作製し、抵抗の温度特性および電流-電圧特性を測定した。図 2 に NbTiN 細線の単位長さ ( $L$ ) 当たりの抵抗 ( $R/L$ ) の温度依存性を示す。 $R/L$  が増加するにつれて、超伝導転移温度が減少し、超伝導転移幅がブロードになる。さらに超伝導的な転移が半導体

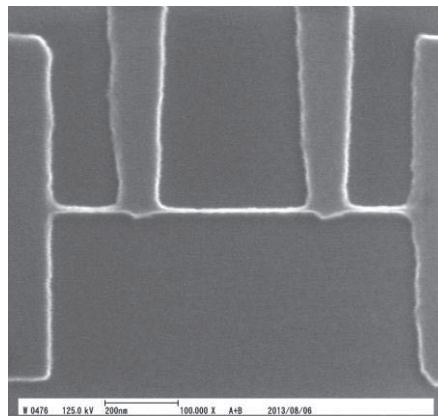


Fig.1 A scanning electron microscope image of a NbTiN nanowire with 10 nm-width and 500 nm-length.

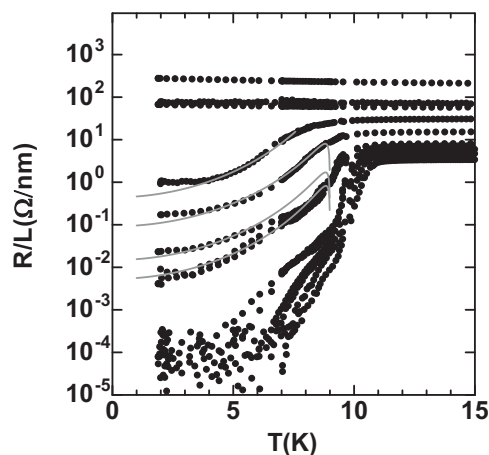


Fig.2  $R/L(T)$  for in series of NbTiN NWs within ranges of 250-1000nm length  $L$  and 10-30nm width.

的な抵抗の増加に転じる。この時の  $R/L$  は  $30-40 \Omega/\text{nm}$  で、MoGe ナノワイヤで報告されている  $40 \Omega/\text{nm}$  とほぼ一致している[3]。さらにこの抵抗がブロードになる振る舞いが位相すべりの理論によってフィッティングを行った。赤線は量子位相すべり理論曲線であり、抵抗のブロードな振る舞いを再現していることが分かる。電流-電圧特性の温度依存性の解析からも熱的な位相すべりから量子的な位相すべりへと変化していることも確認できた。この細線の磁場を印可し、抵抗の磁場依存性を調べたところ異常な負の磁気抵抗の振る舞いも観測された。本講演ではその詳細も紹介する予定である。

## 参考文献

1. J. E. Mooji et al.: Nat. Phys. Vol. 2 (2006) p.169
2. O. V. Astafiev.: Nature Vol.484 (2012) p.355
3. H. Kim et al.: Phys. Rev. Lett Vol.109 (2012) 027002.

## 超伝導トンネル接合軟 X 線検出器による材料分析

## Material analysis of superconducting tunnel junction soft X-ray detectors

大久保 雅隆, 藤井 剛, 浮辺 雅宏(産総研)

Masataka Ohkubo, Go Fujii, Masahiro ukibe(AIST)

E-mail: m.ohkubo@aist.go.jp

## 1. はじめに

4.1eV@400eVという半導体検出器の10倍以上のエネルギー分解能を実現した100 x 100 μm 平方のNb/Al 超伝導トンネル接合(STJ)を最大512個集積したSTJアレイ軟X線検出器を開発し、SDDに対して約10倍のエネルギー分解能と、結晶分光器に対して数百倍の検出効率を同時に実現した。同検出器を活用し、2種類の先端計測機器(超伝導蛍光収量X線吸収微細構造分析装置(SC-XAFS)及び超伝導蛍光X線検出器付走査型電子顕微鏡(SC-SEM))を整備、文部科学省「ナノテクノロジープラットフォーム」(<http://nanonet.mext.go.jp/>)のもと共用装置として公開、実材料分析に使用している。

## 2. 超伝導蛍光収量X線吸収微細構造分析装置(SC-XAFS)

本分析装置では、材料中の対象元素周辺の原子スケールの局所構造を調べるため蛍光収量 X 線吸収微細構造分析(FY-XAFS)を行う。FY-XAFSでは、対象元素からの蛍光 X 線の発生量増大のため、試料に照射する X 線を高強度にする必要があり、一般的に放射光施設において行われる。本装置も、高エネルギー加速器研究機構・放射光科学研究施設(KEK・PF)のビームライン(BL)に接続して使用される。(Fig.1)。現在使用できるビームラインは BL-11A, BL-11B, BL-16A で、70 - 5000 eV の範囲が測定できる。これまで、SC-XAFSによりn-SiCのNドーパント( $4 \times 10^{19} \text{cm}^{-3}$ )のX線吸収端近傍構造(XANES)測定に世界で初めて成功した。500度でNをイオン注入した4H-SiC基板とその後熱処理した基板で実際に得られたXANESスペクトルと原子構造を元に第1原理計算により得られるスペクトルを比較することにより、SiCへのドーピングでは、イオン注入直後から殆どのNがCサイトを置換していることが判明し、アニールによりNの格子位置置換が進むのではなく、アニールによるn-SiCの活性化は、むしろ欠陥回復が原因であることを示唆することとなった。

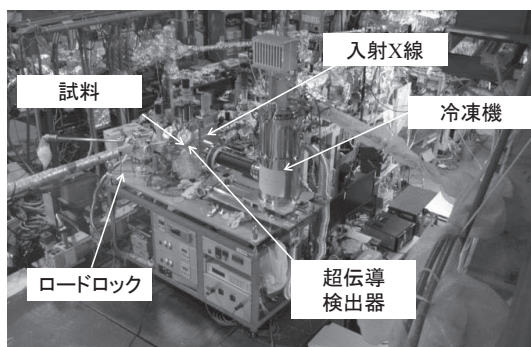


Fig. 1 SC-XAFS

## 3. 超伝導蛍光 X 線検出器付走査型電子顕微鏡(SC-SEM)

本分析装置は、SDD等の半導体検出器の代わりにSTJアレイX線検出器を用いたSEM-EDS装置(Fig.2)であり、材料中の微量元素の偏在状況を将来的にはナノスケールで分析するため開発した。ナノスケールの元素マッピングの為には、電子ビームの加速電圧を1 keV以下とし、蛍光X線の発生領域をナノスケールとする必要があるが、そのような条件下では、

発生する蛍光 X 線のエネルギーも軟 X 線となるため、STJアレイ X 線検出器の高エネルギー分解能が、元素同定に必要な蛍光 X 線弁別の実現には必須である。本装置の SEM は FE-SEM であり、加速電圧は 0.6 ~ 30 keV、一般的な条件下での解像度は 10 nm 程度である。これまでに本分析装置で得られたデータを以下に示す。BN パウダーで得られた蛍光 X 線スペクトルを示す。(Fig.3) 本スペクトルでは B, C, N, O ピークが明瞭に分かれていることが分かる。また、SC-SEM で得られた耐熱合金中に存在する粒子状析出物(Inclusion)の蛍光 X 線スペクトルから、半導体検出器では分離できない Cr と O の蛍光 X 線が分離出来ていることが分かった。(Fig.3) また各 Inclusion で得られる各蛍光 X 線ピークの強度変化から、その中に存在する N, O の量が一定ではない事も分かった。

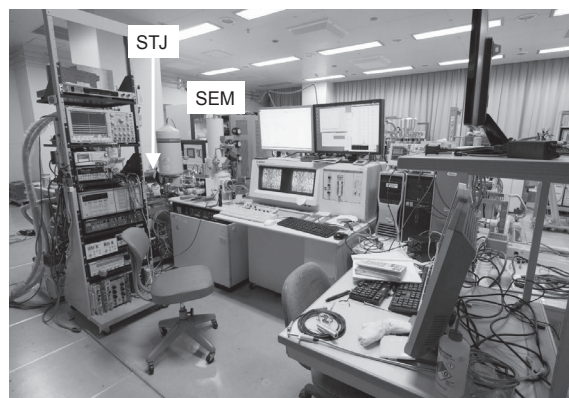


Fig.2 SC-SEM

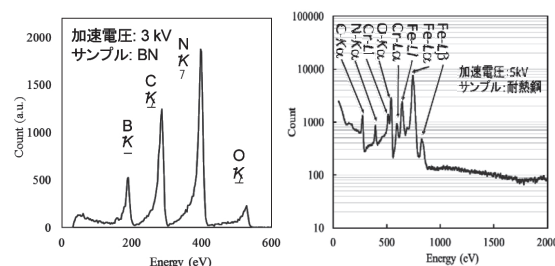


Fig.3 Fluorescence spectrum of a BN sample and a heat resistance steel.

## 4. 今後の展開

今後は、STJアレイX線検出器の更なる有感面積の拡大、エネルギー分解能の向上のため、アレイ数の増大及び、STJ素子の層構造の改良に取り組み、SC-XAFS、SC-SEMの性能を向上させ、より多くの未活用情報の取得を可能にしたい。更に、SC-XAFS、SC-SEMに加えて現在構築を進めている、超伝導蛍光X線検出器付き粒子線励起X線分析装置(SC-PIXE)を完成させ、微量軽元素の高感度分析を実現したい。