

# 窒素サーモサイフォン型ヒートパイプの熱輸送能力向上に関する研究

## Study on Improvement of Heat Transfer Capacity in Nitrogen Thermosyphon Heat Pipe

大関 宏央, 安齋 裕貴, 岡村 哲至 (東工大)  
 OHZEKI Hiro, ANZAI Hirotaka, OKAMURA Tetsuji (Tokyo Tech)  
 E-mail: ohzeki.h.ab@m.titech.ac.jp

### 1. はじめに

浸漬冷却方式による超電導機器の冷却は、蒸発する冷媒を定期的に補充する必要があり、この作業を省くため、GM冷凍機による直冷方式と浸漬冷却方式を組み合わせた極低温ヒートパイプ冷却方式が考案された<sup>[1]</sup>。極低温ヒートパイプにはいくつかの熱輸送限界が存在し、最も頻発するのがフラiddiング限界である。これは、液貯部への熱侵入がある値以上になったとき、上昇する気体が還流する液体を吹き上げ、液貯部に液体がなくなり、熱輸送効率が著しく低下するものである。先行研究において気液の流れを分離した二重管ヒートパイプによる実験が行われ、単管ヒートパイプと比べて熱輸送能力は向上したが、温度上昇は見られた<sup>[2]</sup>。本研究では、実験により二重管ヒートパイプにおける温度上昇の発生原理を考察した。また、二重管ヒートパイプの内管径を変化させ、熱輸送能力を比較した。

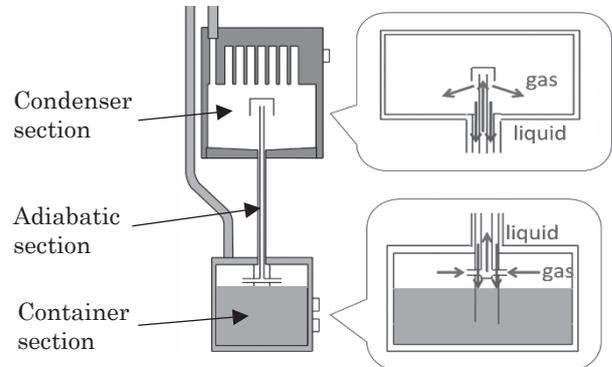


Fig.1 Schematic view of double tube heat pipe

### 2. 実験方法

Fig.1 に二重管ヒートパイプの構造概略図を示す。GM 冷凍機によってヒートパイプを冷やし、凝縮部を 70K に温調する。液貯部に貼ったヒーターで熱入力し、温度センサーCernox を液貯部側面に貼り、温度計測を行った。また、液貯部と凝縮部の圧力差も同時に測定した。断熱部の外管径は 5mm、管長は 100mm で一定とし、内管径をFig.2 に示す No.1~3 の 3 通りに変化させてそれぞれ実験を行った。

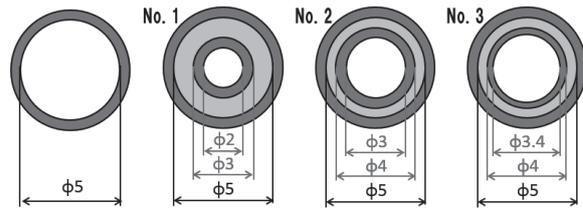


Fig.2 Cross-sectional view of the adiabatic section

### 3. 実験結果と考察

Fig.3 に No.1 の実験結果を示す。22.5W 以下の熱入力では温度上昇は見られなかったが、25.0W 以上の熱入力ではフラiddiングと思われる温度上昇が見られた。これより、No.1 の限界熱輸送量は 22.5W~25.0W であることが分かった。また、温度上昇と同じタイミングで圧力差の降下が見られた。結果をもとに温度上昇のメカニズムを考察する。

液貯部で蒸発した気体が内管を上昇する際に急縮小と管摩擦によって圧力損失が生じる。これにより液貯部と凝縮部に圧力差が生まれ、液柱高さ分だけ液体が外管を上昇する。液貯部の液面が外管の下端を下回ると、外管に気体が入り込み、外管においてフラiddiングが発生する。その結果、気体上昇の際の通過断面積が増加し、圧力損失が軽減されることで圧力差が降下したと考えられる。

また、No.2,3 でも実験を行ったが、実験装置の最大入力熱量である 35W を入れても温度上昇は見られなかった。そのため、圧力差の測定結果をもとに限界熱輸送量の予測値を求めた。Fig.4 に単管と No.1~3 の限界熱輸送量を示す (No.2,3 は予測値を白抜きで示した)。単管と比べて二重管の方が熱輸送能力は大きく、二重管内の気液の通る断面積の割合を変えることにより、熱輸送能力が変化することが示唆される。

#### 参考文献

1. H.Anzai, et al.: Abstracts of CSSJ Conference, Vol.90 (2014) p.128
2. S.Inoue et al.: Abstracts of CSSJ Conference, Vol.88 (2013) p.214

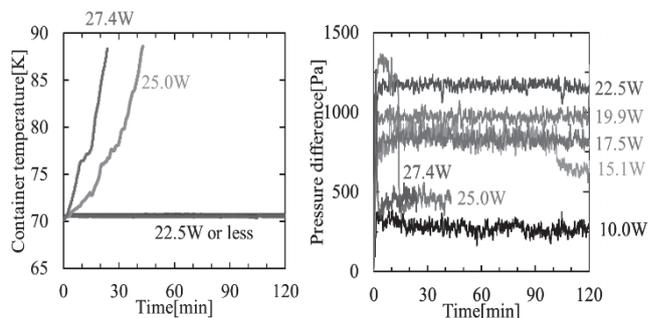


Fig.3 Time traces of temperature at the container section and pressure difference between the container and condenser sections after heat input(No.1 at 70K)

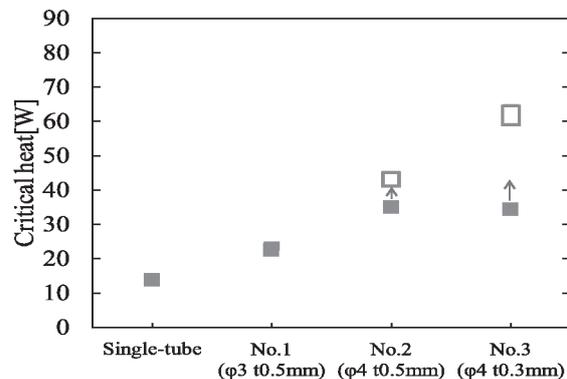


Fig.4 The heat transfer limit of the respective heat pipe

# 超1GHz-NMR 03: マグネットおよびクライオスタットの加圧超流動ヘリウム冷却

## 1GHz NMR 03: Cooling for Magnet and Cryostat by pressurized superfluid helium

野口 隆志, 大木 忍, 端 健二郎, 後藤 敦, 松本 真治, 西島 元, 酒井 修二, 清水 禎(NIMS)  
 NOGUCHI Takashi, OHKI Shinobu, HASHI Kenjiro, GOTO Atsushi, MATSUMOTO Shinji, NISHIJIMA Gen,  
 SAKAI Syuji, SHIMIZU Tadashi(NIMS)  
 E-mail: NOGUCHI.Takashi@nims.go.jp

### 1. はじめに

2010~2011 年度に完成予定であった超 1GHz NMR 用超電導マグネットは、2011 年 3 月 11 日の地震で被災し、その復旧に約 2 年を必要とした。2013 年の常温から液体ヘリウム温度までの冷却については既に報告したが、その後の、定格運転温度 1.8K 以下への“加圧超流動ヘリウム冷却”の工程について報告する。

1.8K への冷却対象は、超伝導コイル約 8ton、加圧超流動ヘリウム槽約 1ton の個体と、内包する液体ヘリウム約 1000L である。これらは、大気圧で飽和した液体ヘリウムを貯液しておく約 500L の 4K 槽約 0.6ton と 4K シールド約 0.1ton に覆われている。

### 2. HeII 冷却器と実際の冷却

超流動ヘリウム冷凍器は 2001 年の 920MHz NMR 完成時に備えられていた物を用いた。したがって本報告には冷却手法に関わる開発要素はあったが、新たな装置の開発は行われていない。

7 月 31 日に入点を越え上記冷却対象は超流動ヘリウム温度となり、8 月 27 日からコイルへの通電を開始した。10 月 17 日に定格 240A:1.02GHz 相当の磁場でホールドした。

図1にその間の Bath 温度変化を示す。

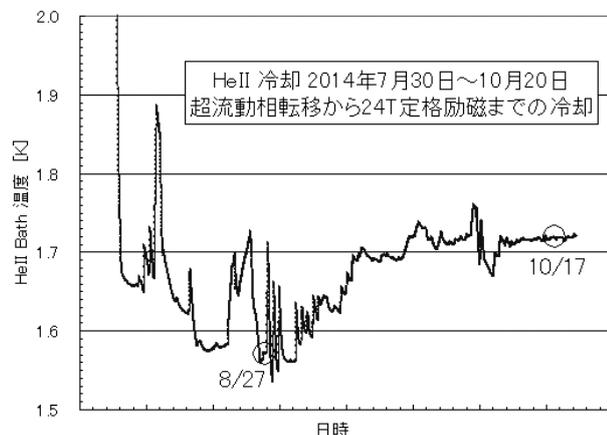
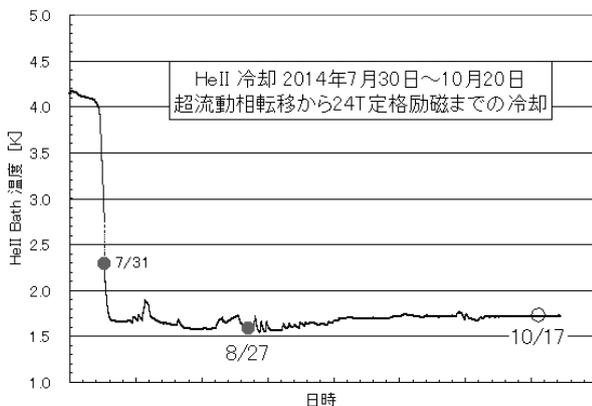


図1 初期冷却と励磁による発熱に対する冷却

### 3. 励磁中の冷却

冷却器は以下の実績を持っていた。

定格運転温度 :

1.4K~1.6K HeII Bathとの温度差 50mK 以上

JT 排気ポンプ :

排気量 5000L/min 1台 \* 予備 1台

冷却温調機構 :

ステッピングモーターによる JT 弁開度調整

PC プログラムによる Bath 温度追尾自動運転

定格排気流量 :

10 std.L/min

これに対し今回の超1GHzNMR では、以下の運転となった。

定格運転温度 :

1.6K~1.7K HeII Bathとの温度差 20mK 以下

JT 排気ポンプ :

排気量 5000L/min 3台 \* 予備 なし

冷却温調機構 :

ステッピングモーターによる JT 弁開度調整

PC から Bath 温度監視による手動運転

定常排気流量 :

45 std.L/min

その理由は、HTS コイルの接続抵抗と LTS の接続部と思われる安定抵抗の出現によるシュール発熱が加わったことによる。1.7K での必要冷却量は約 4.3W 必要であった。

### 4. 冷却結果のまとめ

コイルの発熱が加わり、超流動冷却器の定格を越える運転を余儀なくされたが、定格通電中は、排気ポンプの増設などにより 1.75K 以下±10mK の温度を維持できた。その間の Bath 温度=マグネット温度の推移を図2に示す。

結果として、10 月 17 日から本年 4 月 14 日まで、NMR 信号を得、4 月 14 日にはピーク磁場を発生できた。

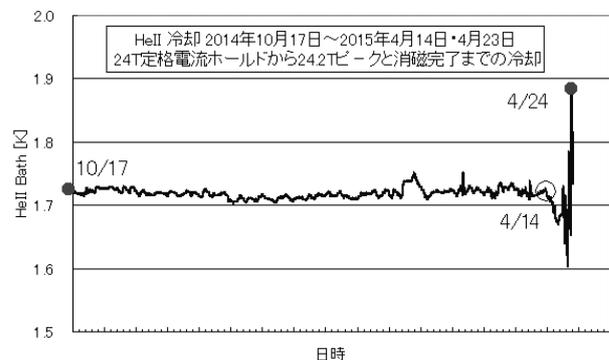


図2 NMR 用マグネットとしての定格時の温度変化

## 野外観測対応超伝導重力計の設置 Field type Superconducting Gravimeter

池田 博(筑波大); 森 稜太(筑波大); 杉原光彦, 名和一成, 西 祐司(産総研)

IKEDA Hiroshi (Tsukuba Univ); MORI Ryouta (Tsukuba Univ); SUGIHAR Mitsuhiko, NAWA Kazunari, NISHI Yuji (AIST)  
E-mail: ikeda@bk.tsukuba.ac.jp

### 1. はじめに

超伝導重力計は米国 GWR 社によって1980年代末に10Kタイプ GM 冷凍機を装備した超伝導重力計(TT-70タイプ)の第一世代が市販された。その後、1990年代に同じ10Kタイプ GM 冷凍機を装備しているが小型化された小型超伝導重力計(CTタイプ)の第二世代が開発された。さらに第三世代として4Kタイプ GM 冷凍機を装備して液体ヘリウム再凝縮型の超伝導重力計(OSGタイプ)が2000年代に開発された。第四世代として計測系と超伝導センサーが一体化されて、さらにコンパクト化された超伝導重力計(iGravタイプ)が2010年に開発された。今回、日本で初めて2015年3月に北海道苫小牧にCO<sub>2</sub>地中貯留モニタリングへの適用を目指して[1] iGravタイプ野外観測対応超伝導重力計(iGrav017)が設置されたので立ち上げに関して報告する。

### 2. 超伝導重力計

重力の測定方法として絶対値を測定する絶対重力測定と重力差や時間的変化を測定する相対重力測定との2つに大別される。超伝導重力計は相対重力計で超伝導コイルのつくる極めて安定な磁場で浮上した1インチニオブ球の位置変化を検出することで重力の変化を測定する装置である。液体ヘリウム温度で使用しているため熱的ノイズはカットされ、絶対重力計に比べて3桁以上感度が高く、1ナノガル(10<sup>-11</sup>m/sec<sup>2</sup>)までの測定が可能である(1μガル=10mmの分解能)。そのため、超伝導重力計は地球深部のダイナミクスを観測目的とするため国際観測プロジェクト GGP が組織され世界各国で観測が続行されている。これらの超伝導重力計によって地球上の重力を測定して地球内部の動きや地球自由振動の測定により地球の動的特性を解明しようとしている[2]。

### 3. 超伝導重力計の立ち上げ

iGravタイプ野外観測対応超伝導重力計は米国 GWR 社から日本に輸送された状態は室温である。そのため、OSGタイプまでは容器の真空度チェック後にセンサー容器(35リットル)を液体窒素で予冷後、液体窒素を追い出し、液体ヘリウム容器から液体ヘリウムをトランスファーして1時間程で液体ヘリウム温度まで冷却していたが、新しいiGravタイプではセンサー容器の上部に計測系も一体化されているため、今までのような液体窒素による予冷は行わず、小型4K冷凍機により徐々に冷却して1週間程でヘリウム液化を行っている。今回は冷凍機による冷却では時間的な制約があったため、初めて液体ヘリウムのみでのiGravセンサー容器の冷却を試みた。

液体ヘリウムのみによる冷却試験は Fig. 1 に示すように右側のiGravタイプ容器に左側の60リットルヘリウム容器から加圧圧力に注意しながら液体ヘリウムトランスファーを行った。ここで回収ラインに市販の都市ガスメーター(N6型)を接続して回収流量をモニターすることにより冷却速度を一定にしてセンサーに熱的ショックが掛からないように心掛けた。

液体ヘリウムのみによるトランスファーは、加圧圧力が0.02PSIで、使用した液体ヘリウムは51リットルである。回収ヘリウムガス量の総量は29m<sup>3</sup>でセンサー容器内に液体ヘリウムを9.3リットル、5時間掛けて貯めること

が出来た。これにより時間的に6日間の短縮に成功した。その後、超伝導重力計は現地で初期レベiterションと調整を行った。現地での冷凍機の動作試験の結果、冷凍機1段で34K、2段で4.18Kを維持しながら稼働している。

Fig.2 に現地に設置したiGravタイプ野外観測対応超伝導重力計(iGrav017)の配置を示した。iGravは左側のエンクロージャーの中に入っており、右側の大きいエンクロージャーには冷凍機用の圧縮機と蓄電池とヘリウムガスボンベが収納されており、それぞれ温度コントロールされている。



Fig.1 Liquid helium transfer



Fig.2 Field type Superconducting Gravimeter

### 4. まとめ

iGravタイプ野外観測対応超伝導重力計(iGrav017)を北海道苫小牧にCO<sub>2</sub>地中貯留モニタリングへの適用を目指して設置した。2015年3月より連続観測を開始しており、臨海地区での重力値の影響を調査中である。

超伝導重力計の設置関連作業の一部は、経済産業省からの委託研究「二酸化炭素回収・貯蔵安全性評価技術開発事業(弾性波探査を補完するCO<sub>2</sub>挙動評価技術の開発)」の一部として実施した。

### 参考文献

1. 杉原, 名和, 池田, 相馬, 石戸, 宮川, 西 (2015) 資源・素材学会 平成27年度春季大会講演集1403.
2. K. Nawa, N. Suda, Y. Fukao, T. Sato, Y. Aoyama and K. Shibuya, Earth Planet and Space **50** (1998) 3.

## NIFS 液化冷凍設備の更新と実験設備の増設

### Replacement of a refrigerator/liquefier and installation of a new experimental system at NIFS

岩本 晃史, 濱口 真司, 高畑 一也, 高田 卓, 今川 信作, 三戸 利行, 力石 浩孝, 柳 長門, 尾花 哲浩, 森内 貞智, 大場 恒揮, 鷹見 重幸, 相良 明男(NIFS); 檜垣 春弘, 撫原 浩嗣(大陽日酸); 堀越 篤(日立製作所)

IWAMOTO Akifumi, HAMAGUCHI Shinji, TAKAHATA Kazuya, TAKADA Suguru, IMAGAWA Shinsaku, MITO Toshiyuki, CHIKARAISHI Hiroataka, YANAGI Nagato, OBANA Tetsuhiro, MORIUCHI Sadatomo, OBA Koki, TAKAMI Shigeyuki, SAGARA Akio (NIFS); HIGAKI Haruhiro, NADEHARA Kouji (TNSC); HORIKOSHI Atsushi (Hitachi)

E-mail: iwamoto.akifumi@LHD.nifs.ac.jp

#### 1. はじめに

核融合研の超伝導マグネット研究棟では老朽化した液化冷凍設備から新機能を備えた温度可変低温設備へと更新を行った。その設備では液体ヘリウム(LHe)や超臨界ヘリウム(SHe)を供給する能力に加え、任意の温度に冷却されたヘリウムガスを冷媒として供給する能力を有し、被冷却体の要求にあわせた冷媒供給を行うことができる。これに並行して、大口徑 13T マグネットを設計・製造し、これまでの 9T 超伝導試験装置に加え、より高磁場を発生する設備を増設している。今回の報告では既設・新設をあわせた超伝導マグネット研究棟の実験設備について紹介する。

#### 2. 温度可変低温設備

温度可変低温設備の構成を Fig. 1 に示す。今回の更新ではコールドボックス(CB), ヘリウム圧縮機, 制御装置を更新し, その他の設備:タンク・貯槽類, 精製器, 液体窒素設備, ガス回収設備などは既設を再利用している。既存のガス回収設備や液体窒素設備は一般高圧ガス設備として残ったが, CB を含む新設の大部分は常用圧力を 1MPa 未満に抑えることで一般高圧ガス設備から除外されている。

この温度可変低温設備の詳細な仕様は前回の学会で既に報告済み[1]なので省略するが, クロードサイクルの液化/冷凍機で, 最大の特徴は CV3105, 3123, 3125, 3156, 3175 の弁から最適な温度領域の GHe を選択し混合することで任意の温度の冷媒を試験設備に供給することが可能な点である。LHe(250L/h)や SHe(350W, 50g/s)の供給能力は前設備と同様である。

#### 3. 13T マグネットの増設

大型導体の試験に対応できる高磁場試験装置の整備は

長年の課題となっていた。温度可変低温設備の建設にあわせて 13T マグネットの整備を進めている。Fig.2 にその外観を示す。直径 700mm の試験空間を確保しており, 75kA 電源とあわせて ITER クラスの導体試験が可能である。



Fig. 2 13T magnet with 700 mm bore diameter

#### 4. 超伝導マグネット研究棟の実験設備

温度可変低温設備により超流動ヘリウム温度(HeII 設備を使用)から室温までの冷媒供給が可能な実験設備として再稼働を始めた。その幅広い供給温度を活用した冷媒の特性研究や冷却関連機器の試験研究, 13T や 9T の磁場環境下で HeII を除くそれら冷媒により冷却される様々なタイプの大型導体の試験が可能である。さらに, JT-60SA の CS モジュールコイルの冷却・励磁試験も予定されるなど大型コイルの試験も可能である。共同利用の設備としての活用が期待される。

#### 参考文献

1. T. Mito, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 90 (2014) p.129

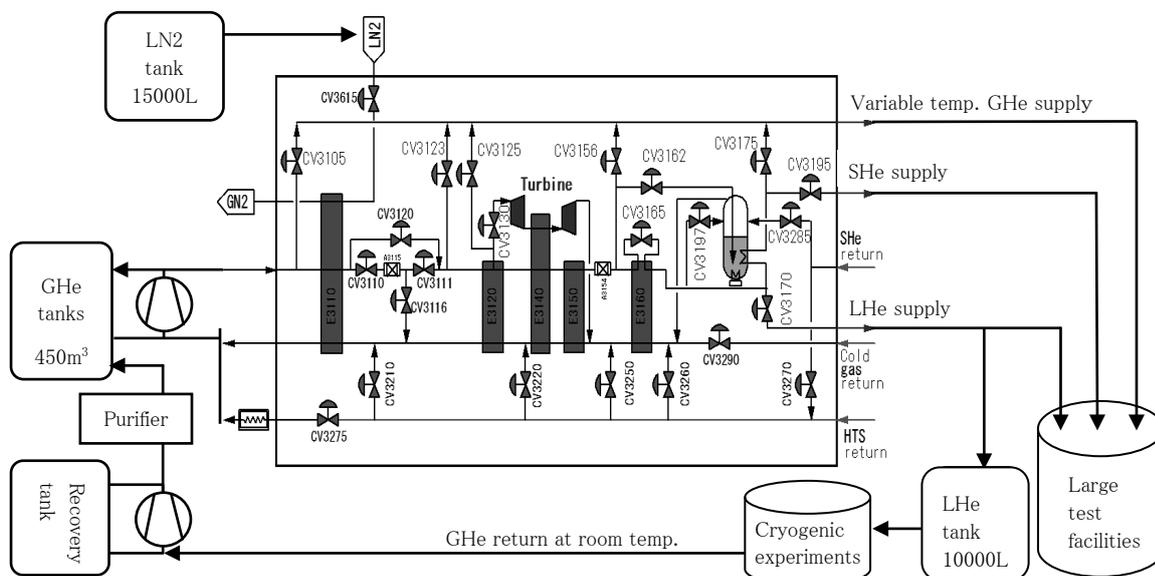


Fig. 1 600W refrigerator/liquefier with variable temperature GHe supply.

# 気温上昇に伴う不純ヘリウムカードルガス圧の想定外の上昇

## Unanticipated rise of pressure inside impure He gas container with rise in temperature

岩佐 章夫, 坪井 勇一, 福山 康弘, 金子 晋久(産総研);  
 樋口 明年, 池田 洋一, 奥主 英和(新生ビルテック・産総研)  
 Akio Iwasa, Yuichi Tsuboi, Yasuhiro Fukuyama, Nobu-hisa Kaneko (AIST);  
 Akitoshi Higuchi, Yoichi Ikeda, Hidekazu Okunushi (Shinsei Buil-Techno Co., Ltd., AIST)  
 E-mail: iwasa@ni.aist.go.jp

### 1. はじめに

産総研では平成25年度にヘリウム液化機を更新して、所内に向けて液体ヘリウムの供給をおこなっている。現在のところ液化機は概ね順調に稼働しているが、試運転時には、不純ガスに空気が混入した結果90%程度の純度までに低下して正常な液化運転ができない事態に陥ることもあった。その際、空気混入のヘリウムガスは代替ガス確保の目途がつくまで不純ガス用の長尺カードル内(不純ガスカードル)に保管されていたが、保管中に気温が上昇したところカードル圧力が想定より早く常用圧力(14.7MPa)を超えてしまい、安全弁が16.2MPaで動作する前に予防的措置としてガスを放出させざるを得なくなった。

容器置き場にある充填容器については通常40℃以下[1]に保たれるようになってはいるが、気温による圧力上昇が想定外に大きかったことをふまえて、後日カードル圧力を大気圧程度まで下げた状態にしてカードル圧力の温度依存性を調べてみた。

### 2. ヘリウム液化装置と長尺カードル

ヘリウムガスバックに貯えられたヘリウムガスがある程度の量を超えると、回収圧縮機によって自動的に14MPa程度まで(常用圧力の14.7MPaを超えないように)圧縮され、更新後に追加された油水分離器、そして高圧乾燥機を通った後に不純ガスカードルに送られる。

不純ガスカードルはCY-6, CY-7, CY-8の3台(各400L長尺容器25本組)で構成されているが、試運転時に空気が混入したカードルはCY-6とCY-7であり、そのうち圧力が上がってガスを放出せざるを得なくなったのはCY-6である。空気が混入したCY-6とCY-7の純度は90%程度、CY-8中には空気混入防止の措置をおこなった後に回収されたガスが入っており純度は98%程度であった。

### 3. 空気混入不純ヘリウムガス入りカードルと、通常の回収ガス入りカードルの圧力の温度依存性

不純ガスカードルの運用に余裕があるときを見計らって、空気混入ガスが入ったカードルCY-7と通常の回収ガスが入ったカードルCY-8の圧力を共に大気圧程度までにしてから両カードルへの充填バルブを各々閉じ切り、1ヶ月間程度かけて気温と両カードル圧(絶対圧)の関係をプロットしたのがFig.1である。比較のために、300K(=27℃)において0.3MPaの絶対圧を持つ理想気体がカードル内に入っていると仮定したときの近似直線( $y=0.001x$ )を追記した。空気が混入したカードルCY-7の近似直線の傾きは理想気体の場合の6倍程度となっており、カードル内の気体の圧力が想定外に上昇したという事象と合致している。一方で、空気が混入していないCY-8においてもCY-7と同様、理想気体を想定した場合に比べて近似直線の傾きは大きかった。

その後、3台のカードルすべてについて2-7日間の真空引きを行い半年程度通常の運用をしてから同様の実験をおこなったところ、カードル圧力の温度特性は理想気体と同様になった。

### 4. 考察とまとめ

混入したガス中の水分量のカードル圧への影響を定量的に評価するため、飽和水蒸気圧をあらわす式として一般的によく知られている、Tetens(1930)のパラメータ値によるAugust他(1)の式

$$E(t) = 6.11 \times 10^7 (7.5t / (t + 237.3)) \quad (1)$$

を用いて数点における飽和水蒸気圧値を計算し、Fig.1に各温度での飽和水蒸気圧をプロットした。ここで、 $t$ は温度(℃)、 $E(t)$ は飽和水蒸気圧(hPa)である。飽和水蒸気圧を超えた水蒸気は液体として存在するため、ガス中の水蒸気分圧が飽和水蒸気圧を超えることはない。(1)式より300K時の飽和水蒸気圧は $35.6 \times 10^{-4}$ MPaと計算され、Fig.1に示されるように飽和水蒸気圧はカードル圧と比較して大変小さい。あわせて空気混入の有無にかかわらず気温による圧力上昇が想定外に大きかったことから、ガスに水分が混入したためというよりは、むしろ、カードル内の物質(酸化鉄、水、油等)に吸着及び溶存されて蓄積されていた分子が気温上昇によって不純ヘリウムガス中に放出されたために想定外の圧力上昇が引き起こされたと解釈したほうがよい。真空引き等でこれらの分子がカードルから排出された後に新たに充填された不純ガスについては、更新後に追加された油水分離器により水分や油分のカードルへの混入が抑制されていたため、理想気体と同様なカードル圧力の温度依存性を示すようになったものと考えられる。

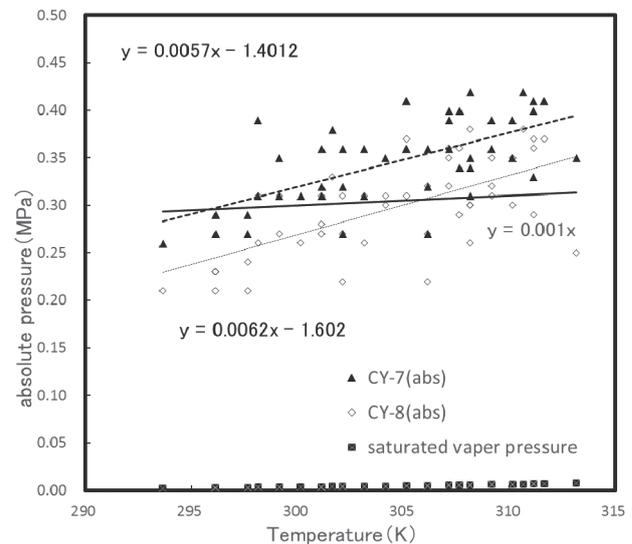


Fig.1 Temperature dependence of pressure of CY-7 (90% gas) and CY-8 (98% gas)

### 参考文献

1. 高圧ガス保安法第8条第1条及び第2号の技術的基準に関する事項(一般高圧ガス保安規則第6条第2項第8号ホ)

# カレントリサイクル用ドライバー/レシーバー回路の磁気結合部の評価

## Evaluation of magnetic coupling structures of driver/receiver circuits for current recycling techniques

佐野 京佑, 山梨 裕希, 吉川 信行(横浜国大)

SANO Kyosuke, YAMANASHI Yuki, YOSHIKAWA Nobuyuki (Yokohama Nat. Univ.);

E-mail: sano-kyosuke-cw@ynu.jp

### 1. はじめに

Single-Flux-Quantum (SFQ) 回路の動作には一定の電流供給が必要であり、その電流量は回路規模に比例する。SFQ回路は磁場に敏感であり、回路の大規模化が進む現在では電流供給時の磁場も無視できない。本課題の解決のため、供給電流量の低減技術としてカレントリサイクル技術が提案されている [1]。

本技術を用いた SFQ回路は、独立したグランドプレーン上に形成された一定規模の複数のブロックに分割され、一つのブロックに供給された電流が各ブロックへと再利用される。各回路ブロックのグランドプレーン間には電位差があるため、各ブロック間の SFQ 信号の伝搬は非接触で行う必要がある。そこで我々は SQUID 構造を利用した非接触 SFQ パルス伝達回路を開発している。

### 2. カレントリサイクル用ドライバー/レシーバー回路

我々は、カレントリサイクル技術への利用を目的として、分離されたグランド間を非接触で信号伝搬するドライバー・レシーバ回路の研究を行っている。Fig.1にドライバー回路とレシーバー回路の回路図を示す。

d\_input 部へ SFQ パルスが入力されると、 $J_1$ 、 $J_2$  の Josephson 接合がスイッチし、 $J_2$ 、 $L_1$ 、 $R_0$  で構成されるループに電流が流れる。この時、磁気結合構造によりレシーバー回路の  $J_3$ 、 $L_2$ 、 $J_4$  で構成される SQUID が磁場を感知してスイッチすることで、SFQ パルスが生成され、r\_output へ伝搬される。

三次元構造に対応したインダクタンス計算ツール InductEx [2]を用いて磁気結合部のインダクタンスを最適化した。また、磁気結合部がグランド電流により生じる磁場に対し平行である従来型構造に対して、垂直となる構造も検討した。本構造によりドライバー/レシーバー回路の磁場耐性の強化が期待される。Fig.2に従来型構造及び垂直型構造の磁気結合部の三次元構造を示す。

今回、InductExにより最適化された従来型及び垂直型のドライバー/レシーバー回路の動作を評価したため、その結果について報告する。

### 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。

### 参考文献

1. Johnson, M. W., et al, IEEE Trans. Appl. Supercond, Vol. 13 (2003) p.507
2. C. J. Fourie, et al, Supercond Sci. Technol., Vol. 24 (2011) p.125015

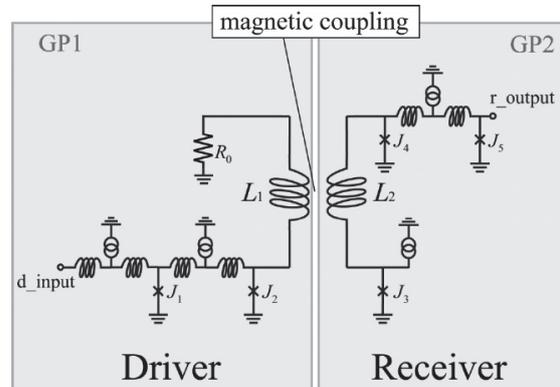
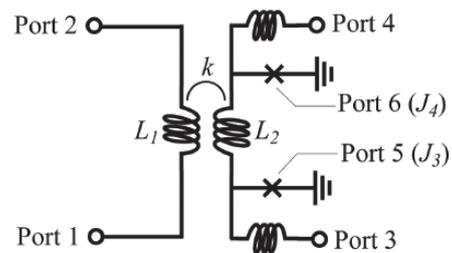
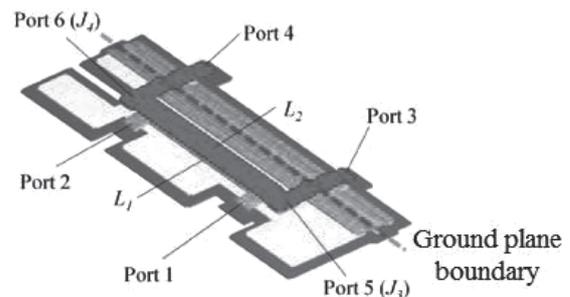


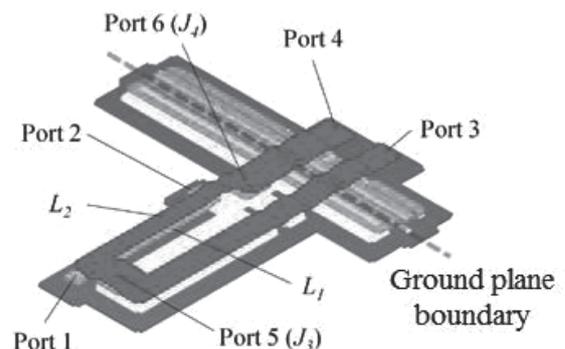
Fig.1 カレントリサイクル用ドライバー/レシーバー回路



(a) 磁気結合部



(b) 従来型構造



(c) 垂直型構造

Fig.2 ドライバー/レシーバー回路の磁気結合部

# 単一磁束量子回路と断熱型磁束量子パラメトロン回路間 インターフェース回路の最適化

## Optimization of Interface Circuit between Single Flux Quantum and Adiabatic Quantum Flux Parametron Circuits

知名 史博, 奈良間 達也, 竹内 尚輝, 山梨 裕希, 吉川 信行(横浜国大); Thomas Ortlepp(CiS)  
Fumihiko China, Tatsuya Narama, Naoki Takeuchi, Yuki Yamanashi, Nobuyuki Yoshikawa (YNU); Thomas Ortlepp (CiS)  
E-mail: china-fumihiko-pf@ynu.jp

### 1. はじめに

近年, CMOS を用いた計算機は微細化の限界やリーク電流による発熱量・消費電力の増大といった問題があり, 性能向上の限界に直面している。そこで CMOS に代わる新たな集積回路技術として, 超伝導回路技術である単一磁束量子 (Single Quantum Flux) 回路と断熱型磁束量子パラメトロン (Adiabatic Quantum Flux Parametron) 回路が提案されている。SFQ 回路は CMOS に比べ低消費電力性と高速動作性に優れ, AQFP 回路は SFQ 回路よりも更に低い消費電力で動作可能である[1]。これらの超伝導回路技術を活かしハイエンドな大規模計算機を実現するには, SFQ 回路と AQFP 回路のハイブリッドシステムが有効であると考えられる。そこで我々は, バイアス方法や動作原理の異なる SFQ 回路と AQFP 回路間の情報伝達を可能とするため, SFQ 回路と AQFP 回路間インターフェース回路についての研究を行っている。インターフェース回路を用いることで, SFQ 回路と AQFP 回路の相互接続だけではなく, Fig.1 のように AQFP 回路間に Passive Transmission Line 配線[2]を導入することができ, 長距離配線が容易になる。インターフェース回路は, SFQ 回路から AQFP 回路に信号伝達する SFQ/AQFP インターフェースと, その逆の AQFP/SFQ インターフェースの2種類を用いる。本発表では, 2 種のインターフェース回路の構成及びパラメータの最適化による動作余裕度の向上について報告する。

### 2. SFQ/AQFP インターフェース

Fig.2 に SFQ/AQFP インターフェースの概略図を示す。SFQ/AQFP インターフェースは TFF と非対称 AQFP で構成されており, AQFP の初期状態は"0"に固定されている。また, TFF の保持ループのインダクタンス  $L_t$  と AQFP の入力インダクタンス  $L_{in}$  は磁気結合している。ここで TFF に SFQ パルスが入力されると,  $D_1$  から出力が得られるとともに  $L_t$  は SFQ を保持する。TFF の保持ループを流れる電流が磁気結合を介して AQFP に入力される。この状態で励起電流  $I_{ex}$  が加わることで AQFP の状態は 0 から 1 に遷移する。再度 SFQ パルスが TFF に入力されると,  $L_t$  が保持していた SFQ が  $D_2$  に出力され, AQFP への入力電流は消失し 0 状態に戻る。

### 3. AQFP/SFQ インターフェース

Fig.3 に AQFP/SFQ インターフェースの概略図を示す。AQFP/SFQ インターフェースは, AQFP と高感度 DC/SFQ コンバータ (高感度 D/S[3] から構成されている。高感度 D/S は AQFP との同期のため,  $L_{clk}$  と  $J_{clk}$  を含むループが接続されており, 励起電流の立ち上がり時に高感度 D/S に CLK 信号が入力される。AQFP の出力インダクタンス  $L_{out}$  と高感度 D/S のセンシング部のインダクタンス  $L_s$  は磁気結合状態にある。AQFP の出力電流の向きは AQFP の状態によって決定され, AQFP が"1"状態になったときに  $J_{c1}$  がスイッチし, SFQ パルスが出力される。AQFP が"0"状態のとき, CLK 信号は  $J_e$  でエスケープされ, SFQ パルスは出力されない。

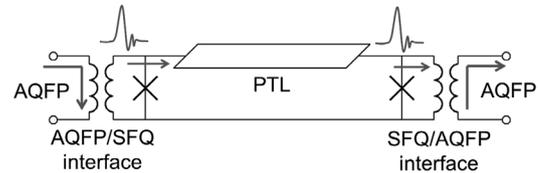


Fig.1 Circuit schematic of long distance wiring between AQFP gate

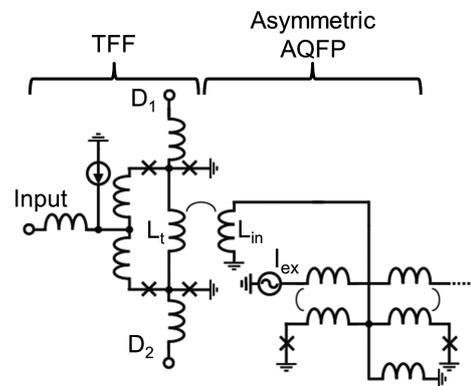


Fig.2 Circuit schematic of SFQ/AQFP interface

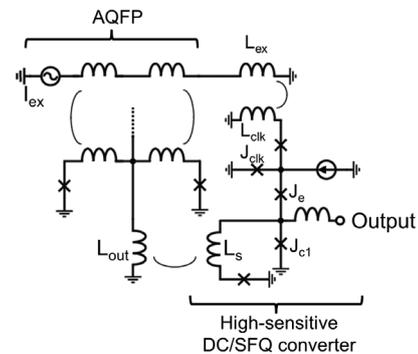


Fig.3 Circuit schematic of AQFP/SFQ interface

### 謝辞

本研究は JSPS 科研費 26220904 および 25820137 の助成を受けたものである。本研究に使用されたデバイスは, (独)産業技術総合研究所 (AIST) の超伝導クリーンルーム (CRAVITY) において作製された。

### 参考文献

1. N. Takeuchi et al., IEEE Trans. Appl. Supercond. Vol. 23, No. 3 (2013) 1700304
2. S. Hideo et al., IEEE Trans. Appl. Supercond. Vol. 10, No. 3 (2000) pp. 1637-1641
3. Makise, K, et al., IEEE Trans. Appl. Supercond. Vol. 23, No. 3 (2013) 1100804

# 光子数分解能を有する SNSPD 検出器アレイ用 SFQ 増幅回路の設計

## Design of SFQ Amplified Circuit for Photon-Number-Resolving SNSPD Array

大田 一喜, 成瀬 雅人, 田井野 徹, 明連 広昭 (埼玉大); 陳 健, 吳 培亨 (南京大)

OTA Kazuki, NARUSE Masato, TAINO Tohru, MYOREN Hiroaki (SaitamaU); CHEN Jian, WU Peiheng (NanjingU)

E-mail: k\_ohta@super.ees.saitama-u.ac.jp

### 1. まえがき

本研究では、光子数分解能を有する超伝導単一光子検出器 (Superconducting Nanowire Single-Photon Detector: SNSPD) アレイからの出力信号を広帯域増幅可能な、単一磁束量子 (Single Flux Quantum: SFQ) 論理を用いた読み出し回路を提案する。

単一光子検出器は、量子情報通信、量子光計算、量子計測等の分野で応用されている。代表的な単一光子検出器には In-GaAs や Si のアバランシェフォトダイオードなどがあるが、SNSPD は量子効率、暗計数率、計数率、ジッタなどの点で優れている。また、通信に用いられる波長の 1550nm に感度があるため、特に量子情報通信の分野での応用が期待されている [1]。

SNSPD 自体は特殊な構造を除いてアバランシェフォトダイオードと異なり光子数を検出することはできないため、光子数検出器として用いる場合、複数の SNSPD を用いる必要がある。しかし、それぞれの SNSPD から別々に信号を読み出す場合、読み出し線の増加による極低温下への熱流入の問題が避けられない。また、SNSPD の出力信号を半導体増幅器により増幅した場合、半導体増幅器のジッタにより光子の到達時間の同時性の確認に問題を抱えている。そこで、SNSPD と同様に極低温で動作する SFQ 論理回路を用いた読み出し回路により、読み出し線の削減を目指すとともに、同時に入射した光子数を識別できる広帯域増幅回路を設計した。具体的な数値としては、処理速度が 500MHz、扱える光子数が 6 個とした。

### 2. 読み出し回路

Fig.1 に提案する読み出し回路を示す。この回路では、SFQ 増幅回路として DFQ [2]を用いている。この DFQ を重ねた回路を AMP 回路と呼び、 $N$  段重ねた場合、SFQ パルス列が入力されると出力端に平均入力電圧の  $N + 1$  倍の平均電圧が出力させる [3]。本研究では、この AMP 回路を更に直列に 6 個接続している。SNSPD からの出力電流は、トランスを結合した DC/SFQ 回路によって SFQ 信号に変換され、それぞれの Pulse generator に入力して SFQ パルス列に変換される。AMP 回路自体はそれぞれ別々に動作するため、Pulse generator からの SFQ パルス列が入力された AMP 回路の出力端のみに電圧が発生する。よって、読み出し回路の出力電圧  $V_o$  は、SNSPD からの入力信号数によって倍増する。また、読み出し線も 1 本にできる。

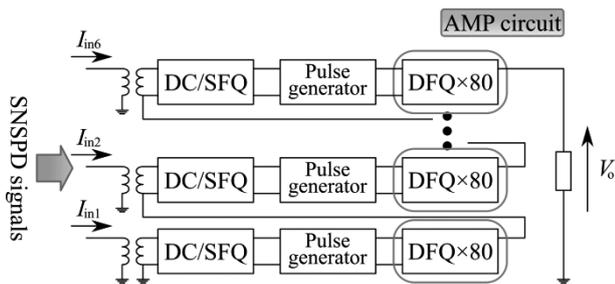


Fig.1 Schematic diagram of readout circuit

### 3. シミュレーション結果

回路の設計は、AIST SDP2 による試作を前提に、SFQ 論理セルライブラリの設計仕様に準拠して回路、レイアウト設計を行った。読み出し回路の出力波形をシミュレーションしたところ、Fig.2 のように入力数によって波高値が約 4.8mV ずつ変化することがわかった。ここから、入力数によって出力電圧が倍増しているのが確認でき、光子数を識別できることがわかった。なお、シミュレーションソフトには JSIM を用いた。

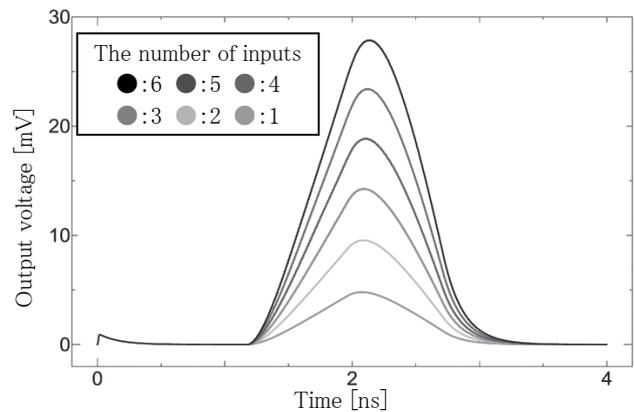


Fig.2 Simulated output waveform of the readout circuit

### 4. まとめ

複数の SNSPD の信号を処理する回路を設計し、読み出し線を 1 本にし、6 個までの光子数が識別可能なことをシミュレーションで確認した。

### 謝辞

本研究では名古屋大学・SRL・NICT・横浜国立大学で開発された CONNECT セルライブラリ及び設計ツールを用いており、チップは AIST の Nb 標準プロセス II を前提に設計された。関係者の皆様に深く感謝致します。本研究の一部は東京大学大規模集積システム設計教育研究センターを通しケイデンス株式会社の協力で行われたものである。

### 参考文献

1. H. TERAJ, T. YAMASHITA, S. MIKI, Z. WANG, Superconducting Single-Flux-Quantum Logic Circuit Toward an Innovation in Information and Communications Technology, J. Cryo. Super. Soc. Jpn., Vol. 48 (2013) p.77 - p.82
2. Q. P. Herr, Stacked Double-Flux-Quantum Output Amplifier, IEEE Trans. Appl. Supercond., Vol.15, (2005) p.259 - p.262
3. Y. Mizugaki, Y. Sato, H. Shimada, M. Maezawa, Input-output characteristics of a 999-stage double-flux-quantum amplifier designed for 1000-fold voltage multiplication, Jpn. Appl. Phys., Vol.53, (2014) p.053101-1 - p.053101-4

# ニオブ 4 層高 $J_c$ プロセスを用いた小型磁束遷移メモリの開発

## Development of Miniaturized Vortex Transitional Memory Using Nb 4-Layer, High- $J_c$ Fabrication Process

幸村勇斗, 田中雅光, 藤巻朗 (名大); 永沢秀一 (産総研); BOZBEY Ali (TOBB ETÜ)

KOMURA Yuto, TANAKA Masamitsu, FUJIMAKI Akira (Nagoya Univ.); NAGASAWA Shuichi (AIST); BOZBEY Ali (TOBB ETÜ)

E-mail: masami\_t@ieee.org

### 1. はじめに

磁束遷移 (VT) メモリは, これまでに優れた動作マージンや歩留まりが実証されており [1], 超伝導回路による記憶回路の有力な候補である. しかしながら, 磁束量子 1 つ 1 つを記憶ビットとするため, 比較的大きな超伝導ループ構造をもち, メモリセルが物理的に大きいことが課題のひとつである.

本報告では, 臨界電流密度 ( $J_c$ ) を  $10 \text{ kA/cm}^2$  に上昇したニオブ 4 層プロセスを利用し, VT メモリセルの小型化に取り組んだので報告する. ジョセフソン接合とその周辺部の専有面積減少と, 4 層の配線層を活用した磁気結合部のレイアウトの工夫により,  $25 \times 25 \mu\text{m}$  の VT メモリセルを実現した. 試作したメモリセルを評価し, 十分な動作マージンを確認した.

### 2. メモリセルの設計

VT メモリセルは二次元アレイとして配置し, X 方向と Y 方向で別々に選択した列 (行) の交点のセルに対してのみ, 読み書き操作を行うことでランダムアクセスメモリを実現する.

今回設計した VT メモリセルの等価回路とレイアウトを Fig. 1 に示す. X 方向の選択線と超伝導ループ 1, 及び超伝導ループ 2 と読み出しゲート間にある 2 つの磁気結合を含み, 4 つの接合から構成される.

メモリセルをコンパクトに実現するため, AIST  $10 \text{ kA/cm}^2$  高速標準プロセス (HSTP) を用いた. 高  $J_c$  化による接合面積の縮小や積層コンタクトの導入により, 接合とその周辺部の専有面積が大幅に減少させた. また, HSTP では下部グランド面を含め 4 層の超伝導層 (下から M1, M2, ... M4 と呼ぶ) が利用できるため, M2 から M4 をそれぞれ読み出しゲート, 記憶ループ, X 方向選択線に割り当てている. 磁気結合部分では, M1 を取り除いて結合係数を上げる工夫をした. 図中に示した各結合係数は, InductEX [2] を用いて見積もった値である.

設計した VT メモリセルの大きさは  $25 \times 25 \mu\text{m}$  であり, 従来に設計されたもの [1, 3] と比較して  $1/5$  から  $2/3$  に減少している. 駆動電流の低減を狙い, 接合の臨界電流値を  $10\%$  小さくした.

### 3. 評価結果

試作した VT メモリセルを低速試験により評価した. X 方向または Y 方向のいずれか片方が選択された状態 (半選択状態) では内容が変化していないことも含め, すべての動作パターンを組み合わせて正常動作を確認した.

Fig. 2 に 3 つの入力 (X 方向  $I_x$ , Y 方向  $I_y$ , 及び動作点設定のための直流オフセット  $I_{dc}$ ) に対する動作マージンを示す. 実用上, 十分な大きさの動作マージンが得られている. 数値計算とのずれや, 駆動電流の低減効果があまり見られなかったことが課題として挙げられるが, 複雑な磁気結合部の回路パラメータが正確に見積もられていない可能性がある.

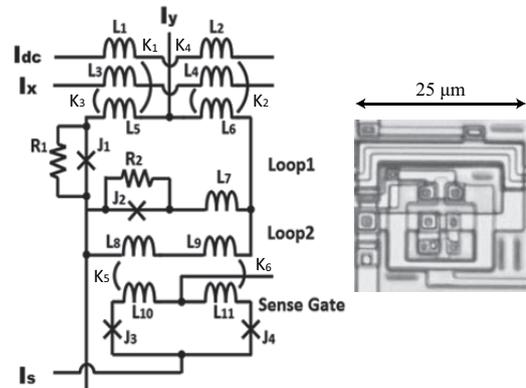


Fig. 1 VT memory cell: (a) Equivalent circuit and (b) microphotograph. ( $J_1=180 \mu\text{A}$ ,  $J_2=90 \mu\text{A}$ ,  $J_3=J_4=100 \mu\text{A}$ ,  $R_1=0.6 \Omega$ ,  $R_2=0.3 \Omega$ ,  $L_1=5.8 \text{ pH}$ ,  $L_2=3.3 \text{ pH}$ ,  $L_3=5.8 \text{ pH}$ ,  $L_4=2.6 \text{ pH}$ ,  $L_5=4.9 \text{ pH}$ ,  $L_6=3.8 \text{ pH}$ ,  $L_7=2.7 \text{ pH}$ ,  $L_8=L_9=3.3 \text{ pH}$ ,  $L_{10}=L_{11}=1.9 \text{ pH}$ ,  $K_1=0.23$ ,  $K_2=0.30$ ,  $K_3=0.37$ ,  $K_4=0.40$ ,  $K_5=K_6=0.6$ )

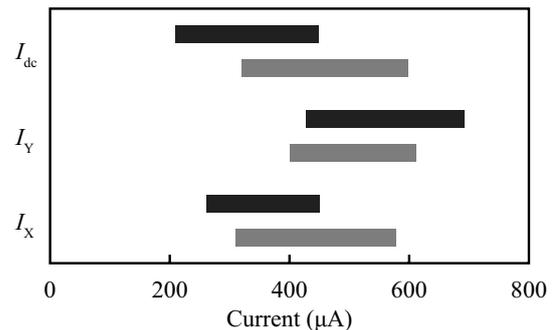


Fig. 2 Dc bias margins of control currents: Experimental (upper) and simulation (lower) results.

### 参考文献

1. S. Nagasawa, Y. Hashimoto, H. Numata, and S. Tahara, IEEE Trans. Appl. Supercond. **5** (1995) 2447.
2. Online: <http://www0.sun.ac.za/ix/>, accessed on Apr. 30, 2015.
3. K. Hinago, Y. Yamanashi, and N. Yoshikawa, Appl. Supercond. Conf., Portland, USA, Oct. 2012.

### 謝辞

本研究は JST ALCA 及び 科学研究費 (22226009, 24760276) の助成を受けたものである. 本研究に使用した回路は, (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-HSTP プロセスを用いて作製された. また, 本研究の一部は東京大学大規模集積システム設計教育研究センターを通しケイデンス株式会社の協力で行われたものである.

# 単一磁束量子 FFT プロセッサの設計とコンポーネント高速テスト

## Design and High-Speed Component Tests of Single-Flux-Quantum FFT Processor

吉川信行, 坂下洋介, 小野智裕, 山梨祐希 (横浜国大)

YOSHIKAWA Nobuyuki, SAKASHITA Yosuke, ONO Tomohiro, YAMANASHI Yuki (Yokohama Nat. Univ.)

E-mail: nyoshi@ynu.ac.jp

### 1. はじめに

FFT (Fast Fourier Transform) はフーリエ変換を計算機上で高速に行うための演算アルゴリズムであり、音声解析・画像解析など幅広い分野で応用されている。しかしながら、現在用いられている半導体集積回路を用いた FFT 専用のプロセッサは FFT の多量の演算によって発生する大きな消費電力が問題となっている。そこで、我々は、エネルギー効率がよく高速性に優れた SFQ (Single flux Quantum) 回路を用いた FFT プロセッサの研究開発を行っている。

従来の研究では、FFT 演算において最も重要なコンポーネントである符号付き演算が可能な 4 bit 整数型バタフライ演算回路の設計を行い、AIST 10kA/cm<sup>2</sup> Nb アドバンスドプロセス (ADP 2.2) [1] を用いた試作チップにおいて 50 GHz における高速動作実証を行った [2]。本報告では、SFQ FFT プロセッサのアーキテクチャについて検討し、プロセッサシステム全体の設計を行った。また、全てのコンポーネント回路を試作し、それらの高速動作検証を行った。

### 2. プロセッサアーキテクチャ

図 1 に SFQ FFT プロセッサのブロック図を示す。SFQ 回路において現時点で高密度メモリの利用ができないこと、ならびに SFQ 回路の高速性を考慮して、本設計ではビットシリアル処理に基づくパイプラインアーキテクチャを採用した。システムは、単位 FFT 演算を行うバタフライ演算回路、データの順序を入れ替えるためのネットワークスイッチ (データシャッフル回路)、ならびに回転因子を蓄えるための ROM で構成される。また、出力データは、シフトレジスタを介してバタフライ演算回路の入力にフィードバックされる。

### 3. コンポーネント回路の高速テスト

本研究では、8 ポイント FFT 用の 4bit データシャッフル回路、ならびに回転因子 ROM を設計し、AIST 10 kA/cm<sup>2</sup> Nb ADP プロセスを用いて試作した。

図 2 に 8 ポイント FFT 用 4bit データシャッフル回路のチップ写真を示す。本回路は、各バタフライ演算ステージに対して適切な順序で演算を行うためのネットワークスイッチである。回路の接合数ならびに総バイアス電流量はそれぞれ 726 接合、87.3 mA であり、回路面積は 1.50 × 0.42 mm<sup>2</sup> である。オンチップ高速テストにより回路の正常動作を確認した。50GHz におけるバイアスマージンは 89.5% ~ 98.7% であり、最高動作周波数は 59.5 GHz であった。

図 3 には 8 ポイント FFT 用 4bit 回転因子 ROM のチップ写真を示す。読み取り速度の高速化のために ROM のコントロールはハードウェアベースで行った。回路はメモリアレイ、スイッチアレイならびにカウンタにより構成される。回路の接合数ならびに総バイアス電流量はそれぞれ 1028 接合、109.7 mA であり、回路面積は 0.75

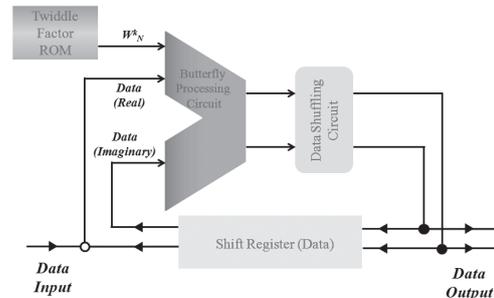


Fig. 1 Block diagram of an SFQ FFT processor.

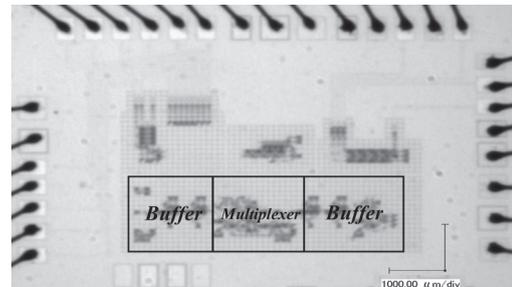


Fig. 2 Micro-photograph of the implemented data-shuffling circuit for 4-bit 8-point FFT.

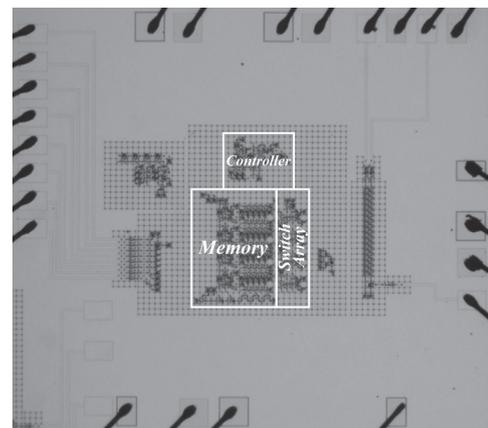


Fig. 3 Micro-photograph of the implemented twiddle factor ROM for 4-bit 8-point FFT.

× 0.90 mm<sup>2</sup> である。オンチップ高速テストにより回路の正常動作を確認した。50GHz におけるバイアスマージンは 102.4% ~ 112.9% であり、最高動作周波数は 51.5 GHz であった。

### 参考文献

1. S. Nagasawa, et al., *Phys. C Supercond.*, Vol. 412–414, p. 1429, 2004.
2. Y. Sakashita, et al., *Trans. Appl. Supercond.*, in press.

# Design, fabrication, and performance of a TES X-ray micro calorimeter array for STEM-EDS

## STEM-EDS 用の TES 型 X 線マイクロカロリメータの設計, 製作, 評価

MURAMATSU Haruka, NAGAYOSHI Kenichiro, HAYASHI Tasuku, SAKAI Kazuhiro, CHIBA Akira,  
MITSUDA Kazuhisa, YAMASAKI Noriko (ISAS/JAXA); MAEHATA Kyosuke (Kyusyu Univ); HARA Toru (NIST)

村松はるか, 永吉賢一郎, 林佑, 酒井和広, 千葉旭,  
満田和久, 山崎典子, (ISAS/JAXA); 前畑洋介(九州大学); 原徹(NIST)

E-mail: muramatu@astro.isas.jaxa.jp

### 1 Introduction

X-ray energy dispersive spectroscopy (EDS) performed with scanning transmission electron microscopes (STEM) now plays an important role for compositional analysis in nano scales. Presently, Si solid-state detectors are commonly used for EDS. However, the energy resolution (typically  $\sim 130$  eV) is often inadequate in order to resolve emission lines with closely adjacent peaks. This low energy resolution prevents to accurate analysis the line intensities. In order to improve the energy resolution, we have been developing a detector system utilizing TES microcalorimeters [1]. In this paper we report the development of  $8 \times 8$  format TES microcalorimeter array for STEM.

A microcalorimeter determines the energy of an X-ray photon by measuring the temperature increase with a transition edge sensor (TES). The requirement for STEM-EDS system is a good energy resolution (FWHM  $< 10$  eV) in a wide energy band (0.5-15 keV) with a high counting rate ( $> 5$  kcps).

### 2 Development of TES for STEM

In order to accommodate the high counting rate, we adopted an  $8 \times 8$  format, 64-pixel array while the detector chip size is limited to  $5.2 \times 5.2$  mm<sup>2</sup> so that the each component of TES array can be allocated as close as possible. We show the conceptual illustration of TES side view and top view (Figure 1). The X-ray absorber is  $2.5$   $\mu$ m thickness gold. Transition temperatures of our previous TES's are all around 100 mK. However, we selected 200 mK to obtain fast response and to accommodate the high count rate requirement. The energy resolution may not be best but can satisfy 10 eV requirement. We did all design and fabrication of this TES in house. When we first fabricated the TES array prototype, they showed a double-step superconducting transition curve. We considered it is due to super-normal-super conducting connect (Ti-Au-Al) at the electrodes and removed Au at the electrode. We then obtained a single step transition curve as shown in Figure 2 left. The Au absorber is fabricated with e-beam vapor deposition and lift-off process.

First we could not fabricated  $2.5$   $\mu$ m thickness absorber because of the taper shape of the photo resist. By changing the photo resist from positive-type to negative-type, we succeeded to make a  $2.5$   $\mu$ m absorber. That improved the detection efficiency at 10 keV to 40 %. With this device we have fabricated, we have confirmed that all 64 pixels are intact. We measured the superconducting transition of 7 pixels and found that it is almost uniform at about 200 mK (Figure 2 left). We did x-ray irradiation test of this device by using <sup>55</sup>Fe radio-active source in a dilution refrigerator. The FWHM energy resolution of one pixel is 7.8 eV at MnK $\alpha$  (5.9 keV) within one pixel read out system (Figure 2 right) and 9.5 eV within two pixels read out system. The decay time is around 35  $\mu$ sec, this time is faster than typically TES decay time ( $\sim 100$   $\mu$ sec). Thus we consider that the device meets all the requirements although we need wait full read out test to confirm them experimentally.

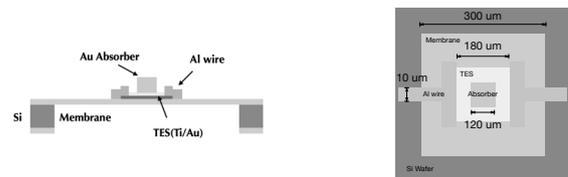


Figure 1: Conceptual illustration of TES side view (left) and top view (right)

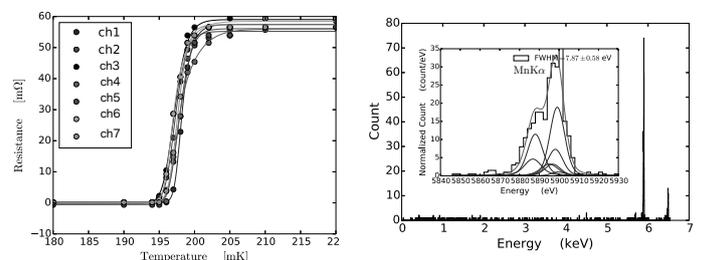


Figure 2: Resistance-Temperature curve of 7 pixels TES (left), MnK line spectrum of <sup>55</sup>Fe radio-active source

### References

- [1] Hara, T et al. Microcalorimeter-type energy dispersive X-ray spectrometer for a transmission electron microscope. Journal of Electron Microscopy, 59(1), 17-26 2010.

# DIOS衛星搭載に向けた積層配線 TES型 X線マイクロカロリメータの開発

## Development of a large array of TES micro calorimeters using multilayer readout wiring for the X-ray astronomy satellite DIOS

黒丸 巖静, 宮崎 直人, 桑原 啓介, 鈴木 翔太, 小泉 祥人, 細矢 祥平, 大橋 隆哉, 石崎 欣尚, 江副 祐一郎, 山田 真也(首都大); 満田 和久(JAXA); 日高 睦夫, 佐藤 哲郎(産総研)

KUROMARU Gensei, MIYAZAKI Naoto, KUWABARA Keisuke, SUZUKI Shota, KOIZUMI Yoshito, HOSOYA Shohei, OHASHI Takaya, ISHISAKI Yoshitaka, EZOE Yuuichirou, YAMADA Shinya (TMU); MITSUDA Kazuhisa (JAXA); HIDAKA Mutsuo, SATO Tetsuro (AIST)

Email: gensei@phys.se.tmu.ac.jp

### 1. はじめに

我々のグループでは2020年頃の打ち上げを目指して提案中の小型科学衛星DIOSへの搭載に向けた TES (Transition Edge Sensor) 型X線マイクロカロリメータアレイの開発を行っている。DIOS衛星は、ダークマターや銀河団の分布など、いわゆる宇宙のフィラメント構造を正確にトレースすることが予想されているWHIM(Warm Hot Intergalactic Medium)と呼ばれる中高温銀河間物質を実際に観測することを目的としている[1]。空間的に広がったWHIMからの電離酸素輝線を検出するためには、十分な有効面積と 0.5-1.5 keVで 数eV という非常に高いエネルギー分解能を兼ね備えた次世代のX線検出器が必要となる。

我々のグループではDIOSのこれらの要求を満たすため、TES型X線マイクロカロリメータの開発を進めている。TESカロリメータは素子に入射したX線光子のエネルギーによる温度変化を超伝導金属の超伝導-常伝導遷移端での急激な抵抗変化を利用して検出する分光器である。極低温で動作させることで、原理的には  $\sim 1$  eV 台のエネルギー分解能を得ることが可能である。我々はこれまでにMHI, SIIといった企業および産総研、JAXA宇宙研などと協力しながらクリーンルームで素子の大部分を自作してきた。TES素子はTiとAuの二層薄膜をピクセル加工したものの両端にAl配線を接続した構造で、転移温度を  $\sim 100$  mKに制御している。X線の吸収体にはAuを用いている。これまでに 16 ピクセルアレイ中の1素子について、5.9 keV の入射X線に対して 2.8 eV のエネルギー分解能 (FWHM) を達成した[2]。また、世界最大級の1 cm 角に 256 ピクセルを配置したアレイ中の1素子について 4.4 eV を達成した[3]。

我々は現在DIOSが要求する 1 cm 角中に  $20 \times 20$  ピクセルの配置を実現すべく、積層配線と呼ばれる新しい配線デザインの開発を進めている。本講演では我々の積層配線TES型X線マイクロカロリメータについて、開発の現状を紹介する。

### 2. 超伝導積層配線

DIOS ミッションの要求を満たすためには  $200 \mu\text{m}$  角素子による  $20 \times 20$  ピクセルアレイが必要である。しかし、通常の配線で読み出すには、配線部分のスペースが多い上に、ピクセルを密集させ配線の距離が近くなって、配線を通る電流が生む磁場によるクロストークの影響が無視できなくなるという問題が生じる。

この問題を解決するため、我々は Fig.1 に示したような、積層配線と呼ばれる、素子までのホットとリターン配線を絶縁膜で挟んで上下に重ねるデザインを採用した[4]。これによりデットスペースが減少し、クロストークや自己・相互インダクタンスによる干渉の影響も押さえることができる。積層配線デザインを採用した  $4 \times 4$  ピクセルアレイの TMU284 素子の X線照射実験では、エネルギー分解能  $\sim 100$  eV と悪いものの、積層配線素子で初めて X線信号を検出した。

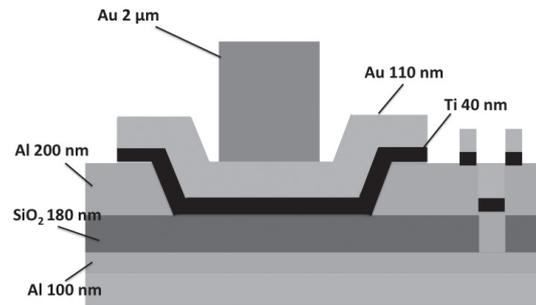


Fig.1 Schematic view of a multilayer readout wiring TES pixel.

### 3. 傾斜付き積層配線

上記の積層配線デザインによってピクセル密集化の問題は解決されるが、配線が薄くなったことで歩留まりが悪くなる、配線と TES と配線間が段切れしやすくなる等の問題が生じる。そこで我々は、これらの問題の対策として産総研と共同で配線にイオンリング法で傾斜をつける傾斜付き積層配線の製作を進めている。Fig.2 で示すように傾斜をつけることで TES と配線の接触が良くなり、上部配線を厚くすることができる。まずは上部配線のみを試作において正しい超伝導転移が確認できた。現在は Fig.3 に示すような下部配線付き  $20 \times 20$  ピクセル TES アレイの試作を進めている。

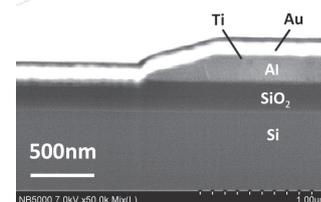


Fig.2 Cross sectional view of a tapered upper readout wiring.

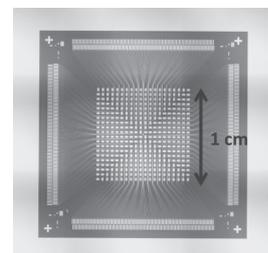


Fig.3 Picture of a multilayer readout sample wiring for a  $20 \times 20$  TES array.

### 参考文献

- [1] Ohashi et al.: SPIE (2014)
- [2] Akamatsu et al.: AICP (2009)
- [3] Ezoe et al.: AICP (2009)
- [4] Ezoe et al.: IEEE TAS (2015)

## SQUID 上に配置した PdNi パターン磁気特性の膜厚依存性

The thickness dependence of the magnetic properties of PdNi Patterns placed on SQUIDs

石川 航太, 伊藤 大, 谷口 壮耶, 赤池 宏之, 藤巻 朗(名大院工)

Kouta Ishikawa, Hiroshi Ito, Soya Taniguchi, Hiroyuki Akaike, Akira Fujimaki(Nagoya Univ.)

E-mail: ishikawa-k@super.nuqe.nagoya-u.ac.jp

## 1. はじめに

超伝導回路は単一磁束量子(SFQ)回路に代表されるように、高速動作性、消費電力性に優れているデバイスである。しかし現在、超伝導回路のためのメモリは、その容量が数 Kbit に留まっているという状況にある[1]。この状況を打破するために、我々は磁性体に注目した。磁性体の特徴として、残留磁化が挙げられる。この残留磁化の向きを情報担体とすれば、その磁化反転を利用することにより、磁気ランダムアクセスメモリ(MRAM)のごとく、セル面積の小さなメモリが実現できる可能性がある。一方、残留磁化のみに着目すると、位相シフトの実現が可能となる[2]。実際、我々は磁性体を縦型の超伝導量子干渉計(SQUID)に配置させることで、超伝導波動関数の位相シフトの動作を確認している。

我々は、これまでにメモリ応用を念頭に、低磁場による磁化反転を実現すべく検討を行ってきた[3]。磁性体として PdNi を選択し、膜中の Ni 割合の変化により PdNi の磁気特性の制御を試みた。しかし、メモリ応用上重要となる 4.2K 下での磁化反転を観測するには至らなかった。また、Ni 割合に対して極めて高い精度性が要求され、制御が困難となってきた。そこで、今回は新たなアプローチとして PdNi の膜厚を変化させることで磁化反転現象の検討を行った。

## 2. 実験手法

PdNi 磁気特性の膜厚依存性の検討は二つの実験から行った。一つは、異常ホール効果を利用したキュリー点 ( $T_{Curie}$ ) の膜厚依存性の評価である。この実験では、PdNi 素子を配置したチップの温度を 4.2K から 150K まで変化させ、得られたホール電圧-外部磁場特性から  $T_{Curie}$  を見積もった。

もう一方は、縦型 SQUID に PdNi 薄膜を配置したものを利用して磁化反転現象を検討した。この SQUID は通常の Nb/ $AlO_x$ /Nb 接合プロセスによって作製されており、Fig.1 に PdNi パターンを形成した SQUID の顕微鏡写真を示しておく。この実験では、PdNi を配置した SQUID に対して、4.2K 下で外部磁場  $\mu_0 H_{ex}$  ( $\mu_0$  は真空の透磁率) を印加し、臨界電流-外部磁場 ( $I_c - \mu_0 H_{ex}$ ) 特性を評価した。また、有磁場冷却(FC)を SQUID に用いることで  $T_{Curie}$  の検討も行った。FC の終了温度を固定し、開始温度を変化させることで、PdNi の  $T_{Curie}$  を見積もることが可能である。開始温度が  $T_{Curie}$  を超えていた場合、PdNi は磁化を有し、 $I_c - \mu_0 H_{ex}$  特性に位相のシフトが引き起こされる。

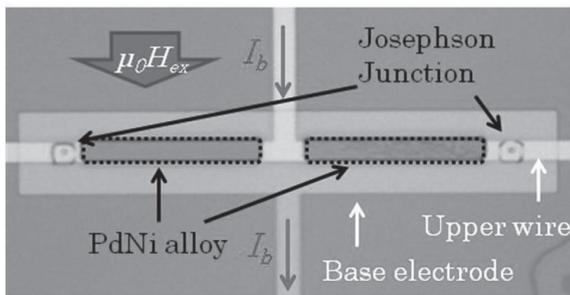


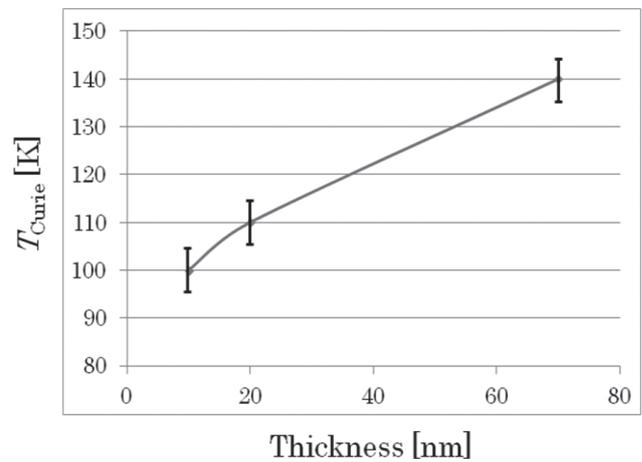
Fig.1 Microphotograph of SQUID

## 3. 結果と考察

PdNi における Ni 割合を 10%とし、膜厚厚をそれぞれ 10nm から 70nm まで変化させたときの、 $T_{Curie}$  の膜厚依存性を Fig2 に示す。膜厚を薄くすることで、 $T_{Curie}$  を減少させることが可能であることがわかる。また、膜厚が 10nm, 及び 20nm のものに対して、異常ホール効果の測定結果から、保磁力が 4kA/m 及び 20kA/m と見積もられた。この結果は、膜厚により磁性体の特性を制御できる可能性を示唆している。ただし、Ni 割合 10%のものは、膜厚 10nm でも保磁力が大きすぎるため、Ni 割合を小さくする必要がある。

Ni 割合を 6.8%, 70%, 膜厚を 20nm, 70nm とした試料に対しては、従来の FC により磁化を試みたが、残留磁化が現れなかった。一方、Ni 割合 7.5%, 膜厚は 70nm のものでは、30K から 15K までの FC を用いることにより残留磁化が生じた。ただし、4.2K において最大 1.0kA/m までの外部磁場に対して磁化反転は見られなかった。

上記の結果を考慮すると、Ni 割合 7.5%において、膜厚を 70nm から減少させると、比較的小さな保磁力をもつ PdNi パターンを実現できる可能性がある。現在、膜厚を薄くした PdNi 膜に対しての SQUID による磁化反転現象の検討を進めている。

Fig.2 Dependence of the thickness of  $T_{Curie}$ 

## 4. 謝辞

この研究は JST-ALCA「低エネルギー情報ネットワーク用光・磁気・超伝導融合システム」、ならびに科学研究費基盤研究 C(26420306)のもとで行われた。

## 参考文献

1. S. Nagasawa, et al. "High-frequency clock operation of Josephson 256-word  $\times$  16-bit RAMs," IEEE Trans. Appl. Supercond., vol. 9, no. 2, pp. 3708-3713, Jun. 1999.
2. S. Taniguchi, et al.: Jpn. J. Appl. Phys. 54, 043101(2015)
3. K. Ishikawa, et al.: Abstracts of CSSJ Conference, Vol.90(2014)

# PECVD-SiO<sub>2</sub> 膜の Nb 標準プロセスへの適用

## Nb standard fabrication process using PECVD-SiO<sub>2</sub> films

永沢 秀一, 佐藤 哲朗, 日高 睦夫 (産総研)  
 NAGASAWA Shuichi, SATOH Tetsuro, HIDAKA Mutsuo (AIST)  
 E-mail: s-nagasawa@aist.go.jp

### 1. はじめに

我々は、大規模な超伝導集積回路の開発を目的として、Nb 系製造プロセスの研究開発を行っており、その一つに Nb 標準プロセス[1]がある。従来、この Nb 標準プロセスの層間絶縁膜は、バイアススパッタで形成した SiO<sub>2</sub> 膜を使用してきたが、今回、PECVD (plasma-enhanced chemical vapor deposition) の SiO<sub>2</sub> 膜を適用した Nb 標準プロセスを開発した。PECVD-SiO<sub>2</sub> 膜は、バイアススパッタ膜に比べて膜応力が小さい、下部段差パターンの被覆性が良好、成膜レートが大きい等の利点があり、導入により Nb 標準プロセスの信頼性向上が期待される。本報告では、適用に際しての PECVD 膜の問題点と改善策、及び測定結果について述べる。

### 2. PECVD-SiO<sub>2</sub> 膜の問題点

PECVD-SiO<sub>2</sub> 膜は、上記の様な利点があるが、多層構造では下部段差に起因した上部配線間の線間リークが多数発生するという問題点があり、この原因の検討を行った。

図1に、SiO<sub>2</sub> をバイアススパッタと PECVD で形成した場合の成膜形状の断面概略図を示す。バイアススパッタの SiO<sub>2</sub> 膜は、下部配線の段差部で約 45 度の傾斜が付く様に形成される。一方、PECVD 膜は、下部段差パターンの被覆性は良好であるが、段差部でエッジが鋭角に形成される。また下部配線間の間隔が狭い(約 1μm 以下) 場合、非常に狭い凹部が形成される。この様な鋭角の領域や非常に狭い凹部では、上部の Nb 配線をエッチングする際に、エッチング残りが発生し易いということが分かった。上記の上部配線間の線間リークは、このエッチング残りに起因すると考えられる。

### 3. 改善策

そこで、PECVD 膜のシャープなエッジや非常に狭い凹部などの表面モホロジーを改善するための方法を検討した。図2に、改善策の断面工程図を示す。図では、400nm の Nb パターンに対して、400nm の PECVD-SiO<sub>2</sub> を成膜する(a)。次に、Ar ガスを用いたミリングで約半分(200nm)の SiO<sub>2</sub> を除去する。この際、ビームに対してウェハ基板を 45 度の角度に配置してウェハ基板を回転させながらミリングを行う。これにより SiO<sub>2</sub> のシャープなエッジ部を除去でき、スムーズな表面モホロジーを得ることが出来る(b)。最後に、除去した膜厚(200nm)分の SiO<sub>2</sub> を CVD で追加することで、初期の膜厚でスムーズな表面モホロジーを有した PECVD-SiO<sub>2</sub> 膜を形成することができた。これにより、上部配線のエッチング残りがなくなり、下部段差に起因した上部配線間のリークの問題を解決できた。

### 4. Nb 標準プロセス(STP2)への適用

図3に、Nb 標準プロセス(STP2)のデバイス構造を示す。STP2では、下部段差のある SiO<sub>2</sub> 層間絶縁膜は、RES/BAS 層間の 100nm、BAS/COU 層間の 400nm、COU/CTL 層間の 500nm であり、各層に対する今回の改善策のプロセス条件を表1に示す。これにより、STP2 のデバイス構造においても、各層での線間リークという PECVD-SiO<sub>2</sub> 膜の問題点を解決することが出来き、STP2 への適用を可能にした。当初の目的である信頼性向上に関しては、今後繰り返し試作を行い評価していきたいと考えている。

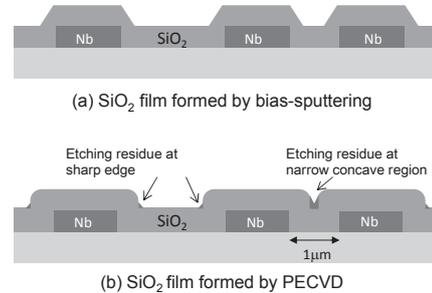


Fig.1 Cross sectional view of SiO<sub>2</sub> film formed by bias sputtering and PECVD.

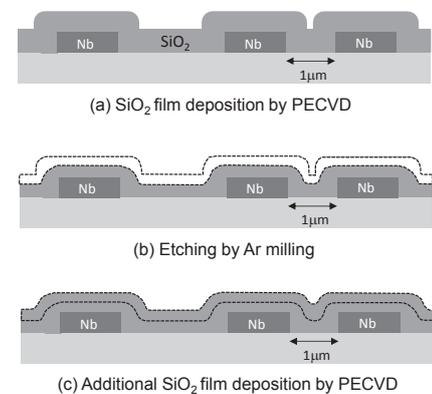


Fig.2 Improvement of PECVD SiO<sub>2</sub> formation.

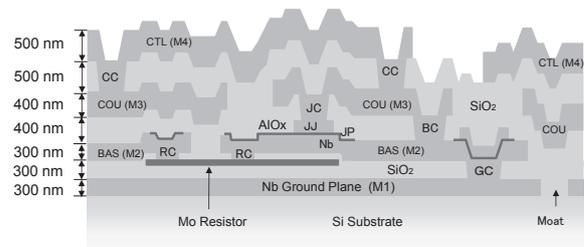


Fig.3 Device structure of Nb standard process (STP2)

Table 1 Process conditions for SiO<sub>2</sub> layers of STP2

SiO <sub>2</sub>	1 <sup>st</sup> PECVD	Ar Milling	2 <sup>nd</sup> PECVD
RES/BAS: 100nm	250nm	-150nm	
BAS/COU: 400nm	400nm	-200nm	200nm
COU/CTL: 500nm	500nm	-200nm	200nm

### 謝辞

本研究の一部は、科研費(26220904, 23226019, 26249054)及びALCA-JST、先端計測-JSTの支援を受けたものである。

### 参考文献

1. S. Nagasawa, et al.: *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, Vol. 5, (1995) p. 2447.

## 小型超伝導分波器の設計・試作・評価

Design, fabrication and evaluation of a small superconducting duplexer

黒田晃弘、齊藤敦、大嶋重利 (山形大)

KURODA Akihiro, SAITO Atsushi, OHSHIMA Shigetoshi (Yamagata University)

E-mail; ohshima@yz.yamagata-u.ac.jp

### 1. はじめに

超伝導フィルタは、低損失、高帯域外遮断特性や高周波数選択性などの利点を有し、携帯電話基地局の受信フィルタシステムとして、米国や中国で既に実用化されている。残念ながら日本では未だ実用化されていない。その大きな問題点の一つとしてコストパフォーマンスが挙げられている。より付加価値を高める研究が広く行われている。その一つの方法として、バンドパスフィルタと分波器を超伝導化し、より低損失なシステムを作製することである。特に、冷凍機で冷却することを念頭にすれば、小型分波器の開発が重要となる。我々は、小型の共振器を用いた新しい分波器を設計し、その評価を行っている。今回は、5.0GHz, 5.1GHzの2周波数分波器を開発したので、その結果を報告する。

### 2. 実験手法

小型超伝導分波器を開発する上で重要な点は、Q値の大きい、小型サイズの共振器を設計することである。我々は、種々の共振器形状を検討した結果、図1で示されるようなCQ構造の共振器を選定した。それは、一般的に用いられている半波長ヘアピン型共振器よりも20分の1以下のサイズにもかかわらず、共振器

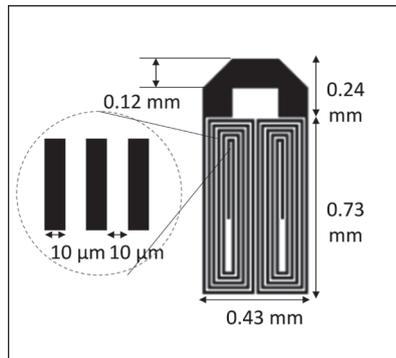


Fig.1. Configuration of a small size resonator

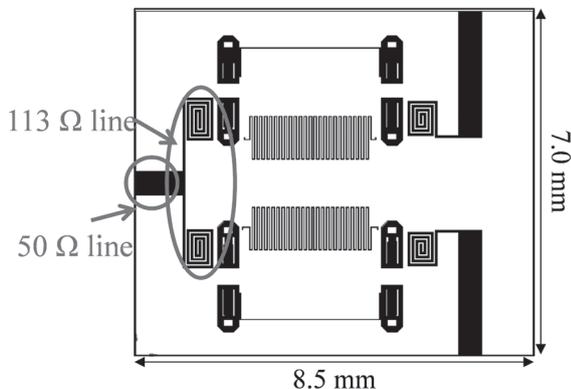


Fig.2. Configuration of a duplexer

のQが20000以上となるのが電磁界シミュレーションより明らかになったからである。この共振器を用いて、図2のような分波器を設計した。共振器間隔や入力端の結合等は電磁界シミュレータにより決定した。

### 3. 実験結果

図2の形状の分波器をYBCO薄膜で作製し、その周波数特性を測定した。その結果を図3に示す。その結果、4.85GHz, 4.95GHzの2分波特性を示すことを見出した。帯域内にリップルが見られるものの、2つの周波数帯で鋭いバンドパス特性を示している。4段の共振器を持つフィルタにおいて鋭い周波数特性を示したのは、飛越結合をもつ偽楕円関数フィルタとして機能しているからである、このような小型サイズの分波器は未だ誰も報告していない。

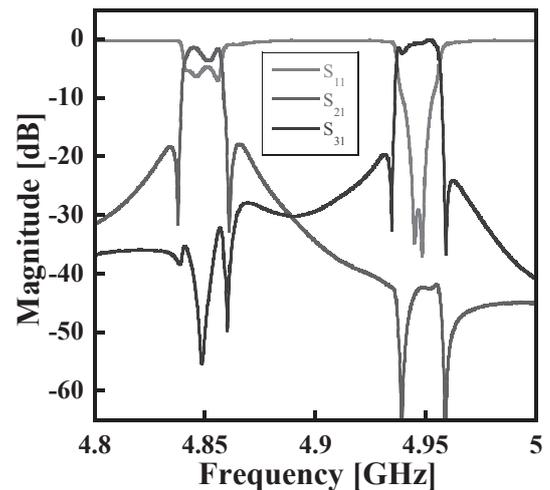


Fig.3. Frequency response of a duplexer which configuration is shown in Fig.2.

### 4. まとめ

2分波の小型超伝導分波器を設計、試作、評価した結果、優れた分波特性を示す超伝導分波器の試作に成功したことが明らかとなった。ただし、未だ帯域内にやや大きいリップルが存在するので、これを解決することが今後の課題である。

### 参考文献

1. A.Kuroda et al., IEEE. Trans. Applied Superconductivity (2015) to be published
2. 黒田晃弘等 信学技法 IEICE Technical Report RCS2014 (2014.4)45-48