

Hf オーバレイヤを用いた NbTiN トンネル接合の作製と評価

Fabrication and evaluation of NbTiN tunnel junctions with Hf overlayers

宗本 健太郎, 山本 直輝, 赤池 宏之, 藤巻 朗 (名大院工)

MUNEMOTO Kentaro, YAMAMOTO Naoki, AKAIKE Hiroyuki, FUJIMAKI Akira (Nagoya Univ.)

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

1. はじめに

我々は、NbN 系接合をサブミリ波帯における電磁波検出器に応用するため、接合の高品質化への検討を進めてきた。これまで、障壁層として Al をラジカル窒化した AlN_x を用いた NbN/Al- AlN_x /NbN 接合を提案し、均一性に優れた接合の作製に成功した[1]。しかし、接合ギャップ電圧の Al 膜厚依存性から Al の常伝導コヒーレンス長 ξ_n の減少が確認されており、下部 NbN 電極における N が障壁層中の Al と反応し Al 中に拡散することによるものと考えられた。また、得られた特性は、サブミリ波帯における電磁波検出器に応用するには更なる改善が必要と考えられた。そこで、我々は Hf オーバレイヤを用いたトンネル接合に着目した。Hf は Nb よりも N に対する活性化エネルギーが大きい[2], [3]、下部電極 NbN 上に Hf を堆積しても、Al のように N と反応しないことが期待される。また、Hf は空气中で不動態を形成するため、トンネル接合の障壁層として HfO_x は適していると考えられる。実際、 HfO_x を障壁層とした Nb トンネル接合は過去に作製されており、サブギャップリーク電流の少ない接合特性を実現している[4]。

今回、我々は NbTiN/Hf/Al- AlN_x /NbTiN 接合及び NbTiN/Hf- HfO_x /NbTiN 接合の作製と評価を行い、従来のトンネル接合との比較及び Hf を用いることによる効果について考察を行った。

2. 実験手法

NbTiN/Hf/Al- AlN_x /NbTiN 及び NbTiN/Hf- HfO_x /NbTiN 三層膜は酸化膜付 Si 基板上に堆積させた。NbTiN 及び Hf 薄膜の堆積には DC マグネトロンスパッタ法を、Al 薄膜の堆積には RF マグネトロンスパッタ法を用いている。NbTiN 薄膜の成膜は、NbTi ターゲットを用い、Ar と N_2 の混合ガスの下で成膜を行った。 AlN_x 障壁層の形成は、ターゲット上にプラズマを発生させ、窒素ラジカルにより Al 薄膜の窒化を行うラジカル窒化法により行った。 HfO_x 障壁層の形成は、熱酸化及びラジカル酸化によりそれぞれ行った。

3. 実験結果と考察

NbTiN/Hf/Al- AlN_x /NbTiN 及び NbTiN/Hf- HfO_x /NbTiN 接合のギャップ電圧 V_g の Hf 膜厚依存性を Fig.1 に示す。Hf 膜厚の増加により V_g が減少しているが、これを Hf の近接効果によるものと仮定すると、Hf の ξ_n は 12 ~ 13 nm 程度であると求められる。一方、Hf 薄膜の抵抗率から得られる ξ_n は 9 nm 程度と予想された。現時点、両者の値には大きな差がないため、下部 NbTiN 電極から Hf への N の拡散を防ぐことができている可能性があると考えているが、さらに詳細な検討が必要と思われる。

次に、熱酸化及びラジカル酸化により作製した NbTiN/Hf- HfO_x /NbTiN 接合の電流-電圧特性を Fig.2 に示す。熱酸化により障壁層を形成した接合と比べて、ラジカル酸化による接合は低バイアス側でサブギャップリーク電流が少なくなっていることが分かる。これは、ラジカル酸化は熱酸化と比べて酸化力が強いので、Hf 薄膜をより酸化することができたためだと考えられる。

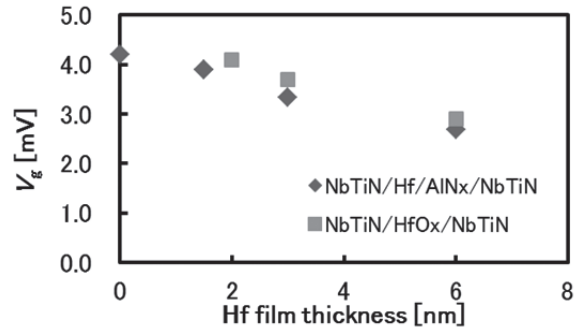


Fig. 1. Dependence of V_g on Hf film thickness

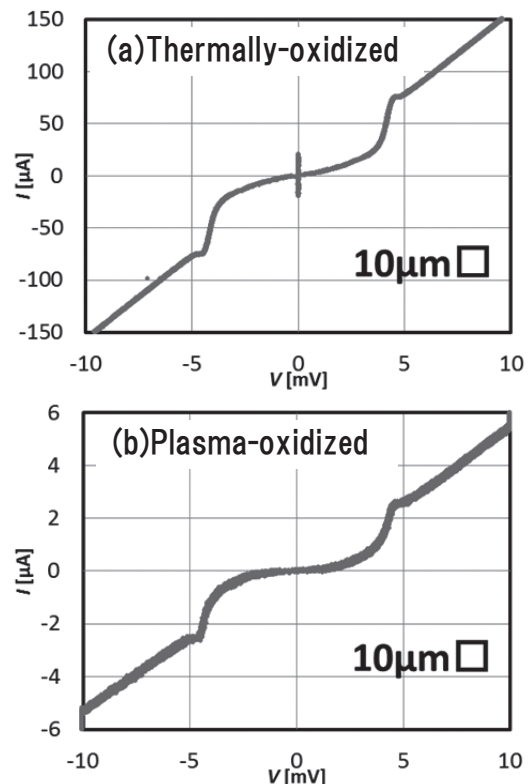


Fig. 2. I - V characteristics of a NbTiN/Hf- HfO_x /NbTiN junction (a) Thermally-oxidized HfO_x (b) Plasma-oxidized HfO_x

4. 謝辞

本研究は、JSPS 科研費 26105511 の助成を受けたものである。

参考文献

- Hiroyuki Akaike, et al.: IEEE Trans. Appl. Supercond., Vol. 23 (2013) 1101306.
- R. K. Edwards, et al.: J. Phys. Chem., Vol. 62 (1958) p.45-47
- C. Y. Ang: Acta Metallurgica, Vol. 1(2) (1953) p. 123-125
- Shin'ichi Morohashi, et al.: Appl. Phys. Lett., Vol. 60 (1992) p.3039-3041

SFQ RAM 用単極性 VTM メモリセルの設計と評価

Design and evaluation of unipolar vortex-transition-memory cells for SFQ RAM

五十嵐 丈, 宮西 駿, 鈴木 秀雄, 山梨 裕希, 吉川 信行(横浜国大)

IGARASHI Takeshi, MIYANISHI Shu, YAMANASHI Yuki, YOSHIKAWA Nobuyuki (Yokohama Nat. Univ.)

E-mail: igarashi-takeshi-wv@ynu.jp

1. はじめに

これまでに CMOS を主とした半導体による集積回路では、微細化によって性能を大きく向上させてきた。しかし、物理的な微細化の限界や消費電力の増大、それともなう発熱量の増大などが大きな問題となっている。そこで、高速、低消費電力動作が可能である超伝導技術を用いた単一磁束量子 (SFQ: Single Flux Quantum) 回路が注目されている。SFQ 回路のコンピュータ応用のためにはマイクロプロセッサだけでなく、それらと高速でデータのやりとりを行うメモリが必要である。そこで、SFQ 回路で構成されたランダムアクセスメモリ (RAM: Random Access Memory) が研究されている。これまでに (VTM) セルが提案されているが、本メモリセルでは、動作のために両極性の駆動電流が必要であった。そのための両極性ドライバを必要とするが、その設計が難しいという欠点があった。そこで、本研究では永沢氏が考案した単極性 VTM セル [2] に着目し、その最適化と動作マージンの評価を行った。

2. 単極性 VTM

単極性 VTM セルは SFQ 回路を用いた RAM であり、最大の特徴は低消費電力性である。超伝導ループに磁束量子を保持することで流れる循環電流の有無を “0” と “1” に対応させるため、情報の保持に対して電力が消費されない。また、単極性電流信号で書き込み、読み出しを行うことができるので、両極性のループドライバを必要としない。

単極性 VTM メモリセルの回路図を Fig. 1 に示す。単極性 VTM セルは書き込みゲートと読み出しゲートからなり、入力信号は I_D , I_X , I_Y , I_{SX} , I_{SY} の 5 本である。書き込み動作は I_D により書き込む情報の “0” と “1” を指定し、 I_X , I_Y で書き込むセルの位置を指定する。読み出し動作は I_{SX} , I_{SY} により読み出すセルの位置を指定し、セル内部の磁束量子の有無を読み出し用 SQUID (J3, J4) で検出する [1][2]。

今回はメモリセルの設計と最適化を行い、Fig. 2 に示すような半選択を考慮した測定を行うことにより正常動作領域の評価を行った。講演では、シミュレーションと実験を通して得られたメモリセルの動作領域の比較について報告する。

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、作製された。本研究は ALCA-JST の支援により行われた。

参考文献

- [1] 早川尚夫, “超高速ジョセフソン・デバイス” pp. 137-163, 培風館, 1986 年.
 [2] Shunichi Nagasawa et al, ” Supercond. Sci Technol. 19 (2006) p. S325-S330

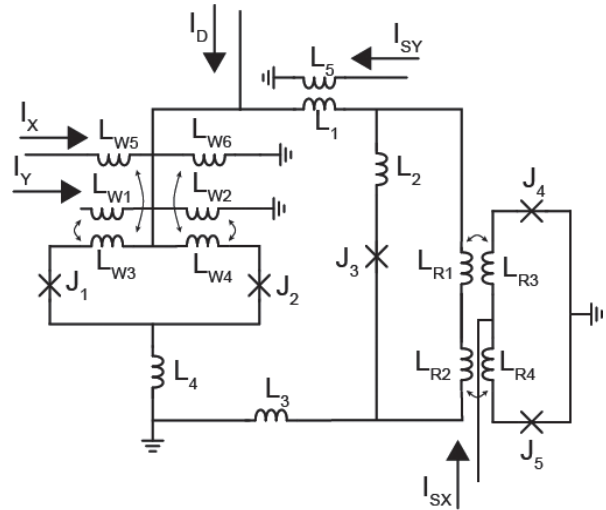


Fig. 1 Unipolar VTM cell

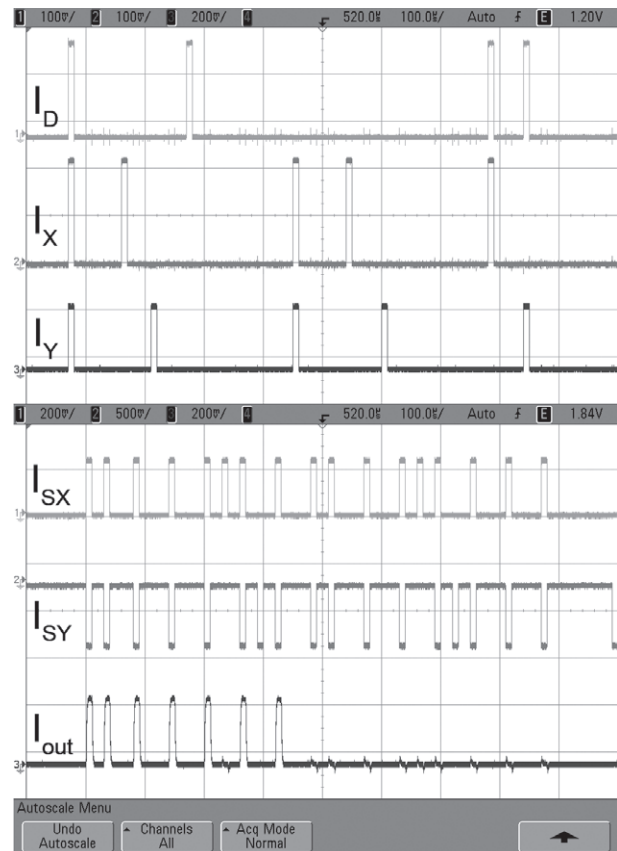


Fig. 2 Low-speed measurement results of unipolar VTM cell

超伝導ランダムアクセスメモリのための SFQ NOR デコーダの特性改善

Characteristic improvement of SFQ NOR decoders for superconducting random access memories

宮西 駿, 鈴木 秀雄, 山梨 裕希, 吉川 信行(横浜国大)

MIYANISHI Shun, SUZUKI Hideo, YAMANASHI Yuki, YOSHIKAWA Nobuyuki (YNU)

E-mail: miyanishi-shun-py@ynu.jp

1. はじめに

現在、我々は Single Flux Quantum (SFQ) 回路を用いたコンピュータシステムに向け、2 次キャッシュメモリとして全てを SFQ 回路で構成する超伝導ランダムアクセスメモリ (SFQ RAM) の開発を行っている[1], [2]。

SFQ RAM ではアドレスで指定されるメモリセルを選択するための回路として SFQ NOR デコーダが用いられている。SFQ NOR デコーダは複数の NOR 回路から成るが、入力アドレス信号を SFQ 信号から DC 信号へ変換し、複数の NOR 回路にアドレス信号を供給する超伝導ループドライバが重要な構成要素である。この超伝導ループドライバの電流駆動能力を上げるためには、ループドライバを駆動するための SQUID ゲートに対する入力電流を高める必要がある。

今回超伝導ループドライバを駆動するための回路として、電流駆動力が大きな Multi Flux Quantum (MFQ) ドライバを用いて超伝導ループドライバを設計し、評価を行った。

2. MFQ ドライバを用いた超伝導ループドライバの構成

図 1 に MFQ ドライバを用いた超伝導ループドライバの構成図を示す。この回路は、2 つの SQUID が直列接続されたセットゲートとリセットゲート、ならびに超伝導ループを形成するマイクロストリップラインから構成される。マイクロストリップラインは NOR ゲートアレイとインダクティブに結合している。セットゲートがオンし電圧状態に遷移するとマイクロストリップラインに DC 電流が流れ、NOR ゲートに電流を供給する。セットゲートとリセットゲートの駆動能力を高めるために、これらの入力部には MFQ ドライバが接続されている。これにより 1 つの SFQ パルスの入力に対して複数の SFQ パルスが生成され、セット・リセットゲートの駆動能力を高めることができる。リセットゲートはマイクロストリップラインに流れる DC 電流をリセットするために用いる。

今回、超伝導ループドライバの評価指標として、バイアス電流の動作マージンならびにループドライバの出力電流量を用いた。

3. MFQ ドライバを用いた超伝導ループドライバの測定

図 2 に超伝導ループドライバのチップ写真を示す。回路は 2 段の超伝導ループドライバが電流源に対して直列に接続されている。マイクロストリップラインに流れる DC 電流の測定は、マイクロストリップラインに磁気結合させた検出用 SQUID の電圧変化によって行った。

図 3 にバイアス電流動作マージンのシミュレーション結果と測定結果の比較を示す。直列接続された 2 段の超伝導ループドライバ共にループドライバの正常動作を確認することができた。また、検出用 SQUID のしきい値特性から出力電流量の見積もりを行った結果、321 μ A 以上の電流が得られていることが確認できた。この値は、NOR 回路を駆動するのに十分な大きさである。

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-ADP2 プロセスを用いて作製された。本研究は ALCA-JST の支援により行われた。

参考文献

1. S.Nagasawa et al, " Supercond. Sci Technol.19 (2006) p.S325-S330
2. K. Hinago, et al.: Abstracts of ASC 2012, Portland, Oct, 2012

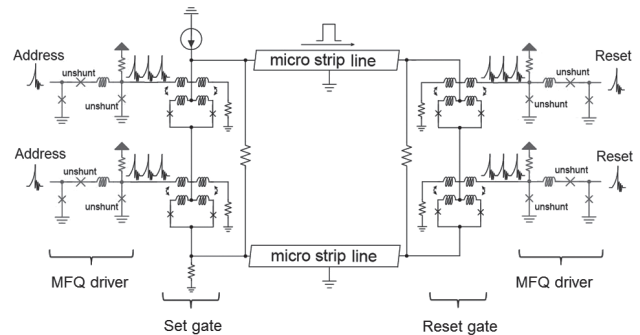


Fig.1 Block diagram of the superconducting loop driver using MFQ drivers

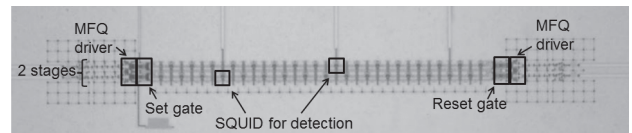


Fig.2 Chip photograph of the superconducting loop driver using MFQ drivers

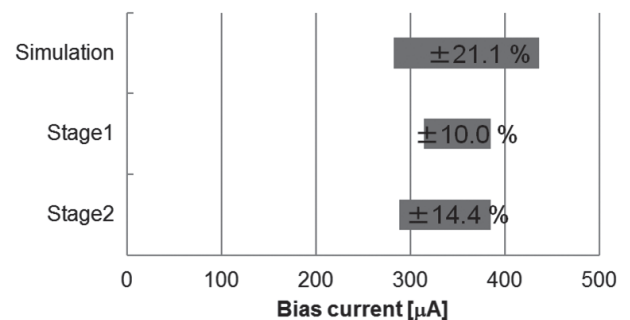


Fig.3 Measured and simulated bias current margins of the superconducting loop drivers

AQFP セルライブラリのための定数セルのパラメータ検討

Parameter Consideration of a Constant Cell for an AQFP Cell Library

安藤 拓生, 竹内 尚輝, 山梨 裕希, 吉川 信行(横浜国大)
 ANDO Takumi, TAKEUCHI Naoki, YAMANASHI Yuki, YOSHIKAWA Nobuyuki(YNU)
 E-mail: ando-takumi-cz@ynu.jp

1. はじめに

現在の計算機の主流であ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、低消費電力性の向上も難しく、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磁束量子パラメトロン(Adiabatic Quantum Flux Parametron; AQFP)回路[1]を研究しており、大規模化に向けてセルライブラリの構築を進めてきた[2]。

定数セルは、常に決められた出力をするセルであり、AQFP 回路による AND や OR といった論理ゲートの作成に必要不可欠である。我々は定数セルを非対称な AQFP 回路により実現している。今回我々は非対称な AQFP による定数セルの最適化のため、各パラメータと動作マージンの関係をシミュレーションにより解析した。

2. AQFP 回路

AQFP 回路の回路図を図 1 に示す。AQFP 回路は外部からの Excitation 電流 I_x を流した時に、2 つのジョセフソン接合のどちらかがスイッチし、左右どちらかのループに磁束が保持され状態が決まる。このときどちらのループに磁束が保持されるかは、Input 電流 I_{in} の向きによって決定される。左右の磁束が入るループにより Output 電流 I_{out} の正負が決定され、これをそれぞれ“0”状態と“1”状態として表現している。

3. 定数セル

定数セルは Excitation 電流が流れた時、常に“0”か“1”のどちらかの状態を出力するセルである。常に同じ出力を得るために定電流源を用いる方法では、回路面積の増大や配線の複雑化といった問題があるため、我々は定数セルを非対称な AQFP 回路により実現している。定数セルは 2 つの buffer と branch を組み合わせることによって、図 2 のように“0”定数セルを用いることで AND ゲート、“1”定数セルを用いることで OR ゲートを作成することができる。

図 3 は“0”定数セルの回路図を示している。非対称 AQFP 回路による定数セルは図 3 のように通常の AQFP 回路から入力を除いた形になっている。左右のインダクタンス L_1, L_2 や、結合係数 k_1, k_2 といったパラメータを非対称にすることで、Excitation 電流が流れた時、必ず決まった方のループに磁束が入り、常に同じ出力を得ることができる。図 3 では右側のループに磁束が入り、“0”を出力しているが、Excitation 電流を図 3 と逆向きに流すことで右側のループに逆向きの磁束が入り、“1”を出力する“1”定数セルになる。このように、全く同じ回路で“0”定数セルと“1”定数セルを作成することができる。

今回我々は各パラメータの非対称度合いによる動作マージンの比較を行った。また、最適化したパラメータで動作実証を行ったので、それらについて報告する。

謝辞

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 CAVITY において作製された。本研究は JSPS 科研費基盤研究(S) (26220904)の助成を受けたものである。

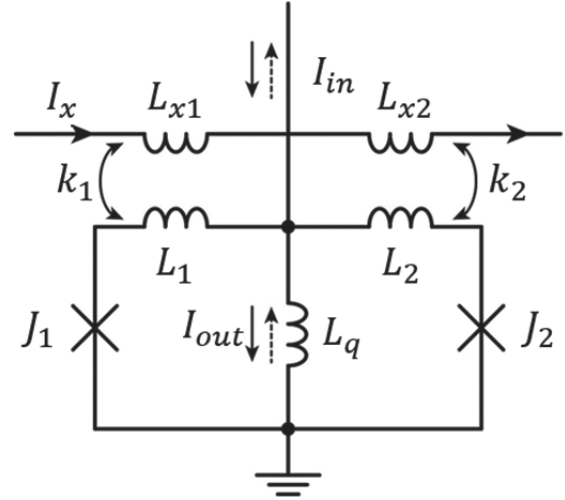


Fig.1 Circuit schematic of an AQFP gate

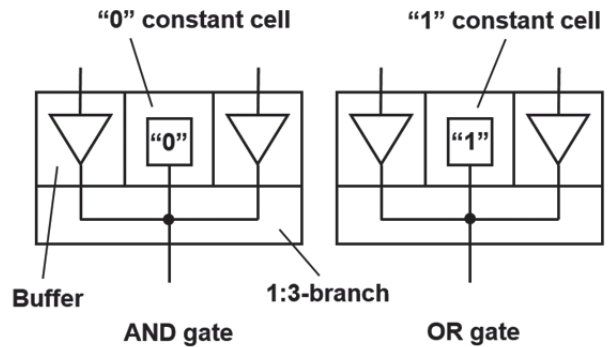


Fig.2 Constant cells in an AND/OR gate

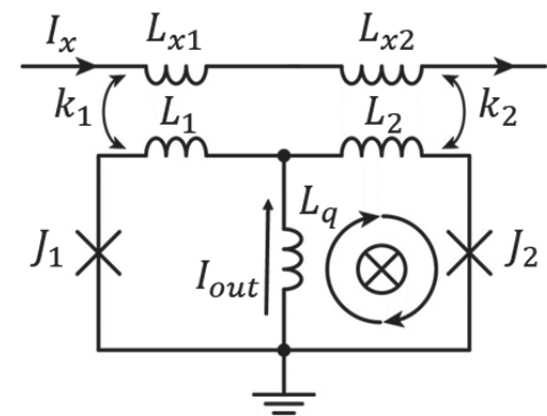


Fig.3 Circuit schematic of a “0” constant cell

参考文献

1. N. Takeuchi, et al.: Supercond. Sci. Technol., Vol. 26 (2013) p.035010
2. N. Takeuchi, et al.: J. Appl. Phys., Vol. 117 (2015) p.173912

動的な内部リセット機構を備えた LR バイアス単一磁束量子回路の設計と動作検証

Design and Test of LR-biased Single Flux Quantum Circuit with Dynamic Resetting Mechanism

山梨 裕希, 堤 隆太, 清水 勝太, 吉川 信行(横浜国立大学)

YAMANASHI Yuki, TSUTSUMI Ryuta, SHIMIZU Shota, YOSHIKAWA Nobuyuki (Yokohama National University)

E-mail: yamanasi@ynu.ac.jp

1. はじめに

単位電力あたりの計算効率を高めるために、超伝導単一磁束量子 (SFQ) 回路をさらに低電力化する研究が広く行われている。低電力 SFQ 回路は直流バイアス回路と交流バイアス回路に大別できる。数十 GHz の高速動作を考えた場合は直流バイアス回路が適する。

我々は回路のバイアス供給部に大きなインダクタンスと微小抵抗を用い、回路の駆動電圧を低減させた LR バイアス SFQ 回路の研究を行ってきた[1]。LR バイアス SFQ 回路や、似た動作原理を持つ低電圧駆動 SFQ 回路[2]の動作速度は、回路駆動後のバイアス電流の初期化時間で決まる。これらの回路では、駆動電圧を下げるとバイアス電流初期化時間は長くなるため、低電力性と高速動作性の間にはトレードオフの関係が存在する。

このトレードオフの関係を打破すべく、我々は回路動作後のバイアス電流の初期化がジョセフソン接合のスイッチングにより行われる、動的な初期化機構を持つ SFQ 回路を研究している[3]。本発表では、動的な初期化機構を持つ SFQ 回路による回路設計と、その高速動作検証について述べる。

2. 低電力 8 ビットシフトレジスタの設計

動的な初期化機構を持つ SFQ 回路では、回路動作後にバイアス回路内に留まろうとする磁束量子が、バイアス回路内のジョセフソン接合のスイッチングにより回路外に逃がされることにより、バイアス電流の素早い初期化が行われる。図 1 にこのバイアス電流初期化機構を持つシフトレジスタセルのレイアウトを示す。回路は産総研 2.5 kA/cm² Nb 標準プロセス 2 (AIST-STP2) の仕様に乗っ取って設計した。設計バイアス電圧は 0.125 mV であり、これは従来 SFQ 回路の標準バイアス電圧値である 2.5 mV の 1/20 の値である。このシフトレジスタセルを 8 個接続し、8 ビットシフトレジスタを設計した。8 ビットシフトレジスタの前後には、高速テスト用に通常の SFQ 回路で構成された 8 ビットシフトレジスタを接続し、オンチップクロック発生回路を用いて高速での回路の測定を行えるようにした。

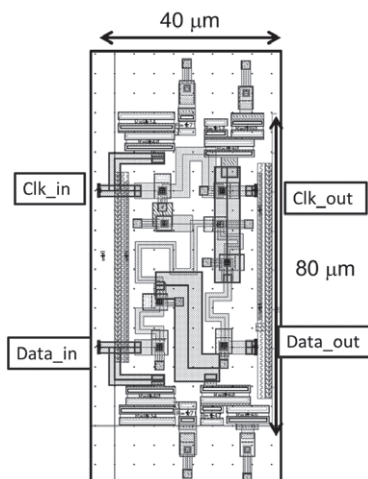


Fig.1 Mask layout of 1-bit shift register cell.

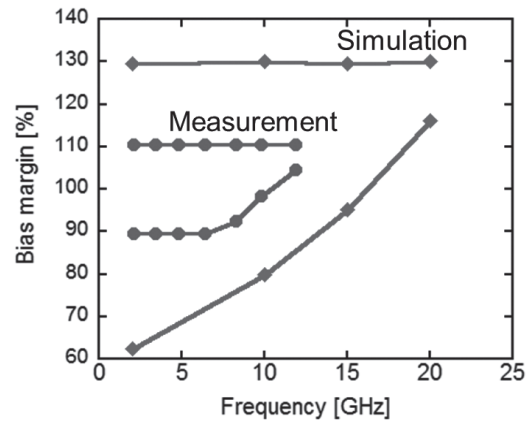


Fig.2 Dependences of measured and simulated dc-bias margins of the 8-bit shift register on the operation frequency. The bias margin is normalized by the normal bias voltage, 0.125 mV.

3. 8 ビットシフトレジスタの高速測定結果

図 2 に 8 ビットシフトレジスタの高速測定で得られたバイアスマージンの動作周波数依存性を示す。図 2 には回路シミュレーションにより得られた特性も比較のために載せている。測定されたマージンはシミュレーションに比べ狭くなった。測定された最高動作周波数は 12.3 GHz であった。マージンの外側の領域では出力に 1 ビットのずれが観測された。これは出力観測用シフトレジスタへの入力タイミングがずれたためと考えられ、作成された回路の信号伝搬時間が回路シミュレーションとは異なる可能性が示唆される。これについては測定方法の改善を含め、より詳しい検討が必要である。

4. 結論

動的な初期化機構を持つ SFQ 回路の高速動作検証を目的に、動作電圧を従来 SFQ 回路の 1/20 に低減させた 8 ビットシフトレジスタの設計と高速測定を行った。高速動作テストの結果、12.3 GHz までの正常動作が確認できた。測定結果から、設計回路の信号伝搬が回路シミュレーションと異なる可能性があることがわかった。

謝辞

本研究は JSPS 科研費 26220904 の助成を受けたものである。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. Y. Yamanashi, et al.: IEEE Trans. Appl. Supercond., Vol. 17 (2007) p.150
2. M. Tanaka, et al.: Jpn. J Appl. Phys., Vol.51 (2012) p.053102
3. 佐藤紘史他: 応用物理学会春季学術講演会, 東海大学, 2015 年 3 月.

低温下におけるパッケージ-ホルダ間の接触抵抗の特性

Properties of Contact Resistance between a Package and its holder at a Low Temperature

伊藤 雄記, 藤巻 朗(名大院)

Ito Yuki, Fujimaki Akira (Nagoya University)

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

1. 研究背景

超伝導集積回路は、低消費電力化が推し進められており、すでにマイクロプロセッサなどで高速・低消費電力の特性を活かした応用に適用可能となっている。我々のグループでも、超伝導検出器の読み出し回路やその後段の信号処理回路に超伝導集積回路を用いている。¹⁾

このような応用では、冷凍機下での動作が求められる。また、超伝導集積回路の汎用化に向けて小型冷凍機を用いる際に、それ自体の冷却能力が低いために、ジュール熱などの抑制が必要となってくる。しかし、これらは冷却能力に深刻な影響を与えているにも関わらず、発生源が特定できていないという状況にある。ジュール熱については様々な所で接触抵抗が発生しており、それらが原因ではないかと考えられる。そこで、最初にパッケージ-ホルダ間での接触抵抗を測定した。そこでは、しばしば接触不良が起きており、大きな接触抵抗が発生している可能性が考えられる。

2. 実験

実験をするにあたって、端子間を短絡させるパッケージ(プリント基板)を作製した。また、それを受けるホルダ側には、1つの端子に対して電流線と電圧線を設けることで、四端子測定ができるようにした。Fig.1にそれぞれの器具を載せる。なお、被測定物は、2つの接触抵抗が直列している。測定は、室温ならびに液体窒素下において行った。また、使用頻度の違う3つのパッケージとホルダ側においてカプトン処理、レジスト処理をした二つを用意した。今回の実験では、経時変化による接触抵抗の変化とホルダ側の処理による違いなどを測定した。Fig.2に処理部分の模式図を載せる。それぞれの処理加工の意図は、抑えつけの際の弾性を確保するためであり、ばねのアシストとして機能する。また、マウントする際の押しつけの力は、一定の値にして実験を行った。

3. 結果

今回の実験では、総じて低温にすることで接触抵抗値が増加するということが分かった。この増加の原因は、明確ではないが、熱収縮による押しつけの力の低下によるものと考えられる。Fig.3は、低温における接触抵抗値を処理加工別に示した図である。この図より、処理加工によって低温における振舞いが違うことが分かった。カプトン処理をしたものでは、低温下における抵抗値が、加工なしに比べて最大で2桁ほどオーダーが違っている。また、レジスト処理についても加工なしに比べて、抵抗値が小さい結果になった。この理由として、処理加工が、低温下における熱収縮による影響を緩和させたと考える事が出来る。さらに、測定回数が増えるごとに抵抗値が増加していることも分かった。これについては使用頻度の違うパッケージを用いることで、抵抗値の経時変化がパッケージ側にあるのか、ホルダ側にあるのかの考察を行った。結果としては、パッケージの使用頻度による抵抗値の変化は見られなかった。これは、経時変化の原因がホルダ側にあるということを示唆している。これについては、さらに考察を続けるつもりであるが、おそらくホルダ側のバネ位置の変化によるものではないかと考えている。また、ここで、実装を想定した場合の接触抵抗の許容値について議論してみる。実装を考慮した場合、

接触抵抗値はおおよそ $10\text{m}\Omega$ である必要がある。今回の結果では、接触抵抗1つあたりの常温値は、 $10\text{m}\Omega$ 程度であり、低温では、 $25\text{m}\Omega$ 程度である。これは、許容値と同等程度である。しかし、低温にした場合に接触抵抗が増加することも考慮すると、加工による優位性についてさらに明確にする必要があると考えている。今後、バネ位置の変化について調べるほか、処理加工の明確な優位性を示していく予定である。

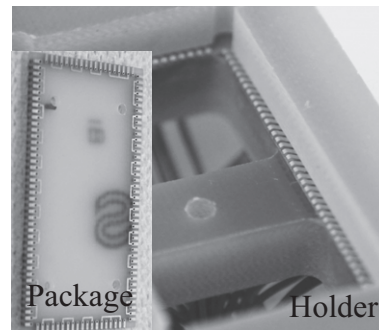


Fig.1 The images of package and holder

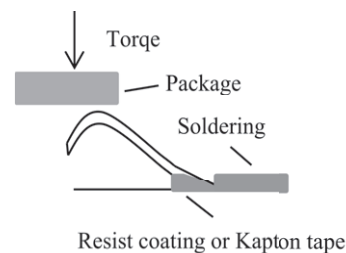


Fig.2 Enlarged view of the contact portion

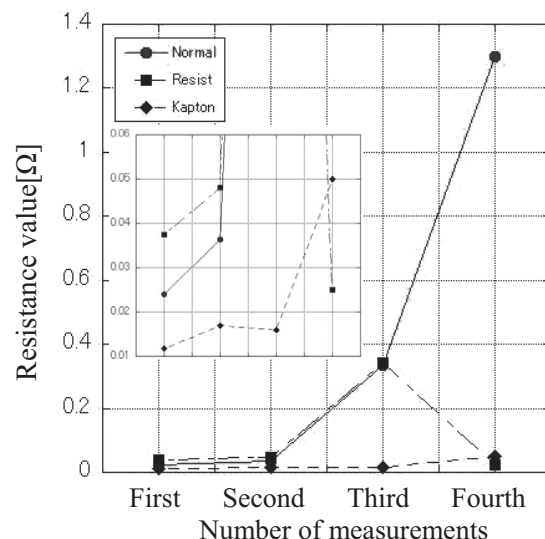


Fig.3 Aging of the contact resistance values in low temperature

謝辞

本研究は、JST-ALCAによって支援されている

参考文献

- 1) A.Fujimaki, The Institute of Electronics, Information and Communication Engineers(2014)

極低温用セミリジッドケーブルの開発状況

Development of semi-rigid cables for low temperature experiments

久志野 彰寛(久留米大);笠井 荘一(コアックス)
 KUSHINO Akihiro (Kurume University); KASAI Soichi (COAX CO., LTD.)
 E-mail: kushino@med.kurume-u.ac.jp

1. はじめに

超伝導遷移やジョセフソン接合等を利用した極低温検出器は、材料分析、自然科学をはじめ、さまざまな分野での応用を目指し、開発が進められている[1][2]。超伝導素子からの信号を正確に読みだすには、中心導体が外部導体によって完全シールドされた、セミリジッドケーブルと呼ばれる同軸ケーブルによる配線が有効である。我々は、外部導体、中心導体にいくつかの金属材料を用い、セミリジッドケーブルの作製を進めてきた(Table 1)。外径 0.86mm のケーブルの熱伝導および高周波特性を中心に報告する。

Table 1 Measured semi-rigid cables

	Center conductor (diameter in mm)	Outer conductor (outer diameter in mm)
1	Beryllium-Copper (0.20)	Beryllium-Copper (0.86)
2	Brass (0.20)	Brass (0.86)
3	CuNi (0.20)	CuNi (0.86)
4	Ag plating CuNi (0.20)	CuNi (0.86)
5	Nb (0.20)	Nb (0.86)
6	NbTi (0.20)	NbTi (0.86)
7	CuNi clad NbTi (0.20)	NbTi (0.86)
8	Phosphor-Bronze (0.29)	Phosphor-Bronze (1.19)
9	SUS304 (0.20)	SUS304 (0.86)
10	Ag plating SUS304 (0.20)	SUS304 (0.86)
11	NbTi (0.20)	CuNi (0.86)

Insulator : PTFE, CuNi : Cu-30% Ni, NbTi : Nb-47%Ti

2. 高周波用セミリジッドケーブル

高周波信号に対応可能な極低温用セミリジッドケーブルには、熱伝導が悪く、高周波領域での減衰が少ないことが重要である。キュプロニッケル、ステンレス 304、真鍮、ベリリウム銅といった、比較的低熱伝導率の合金を外部および中心導体に用いたセミリジッドケーブルを作製し、更に減衰率を下げるため、中心導体に銀メッキを施す試みも行ってきた。しかしながら、常伝導合金にはウィーデマン-フランツ則が成り立つため、材料の抵抗値で決まる減衰率と低熱伝導を両立させることは困難である。そこでニオブやニオブチタン等の超伝導体を用いることで、高周波までフラットな減衰特性と低熱伝導をあわせ持つセミリジッドケーブルを開発した[3]。

3. ローパスフィルタ型セミリジッドケーブル

中心導体に超伝導体と常伝導合金を適当な厚みで組み合わせると、高周波における表皮効果と、両者の電気抵抗の違いからローパスフィルタを構成できる。中心導体にニオブチタンとキュプロニッケルを用いたセミリジッドケーブルを作製し(Fig.1)、評価を行った。

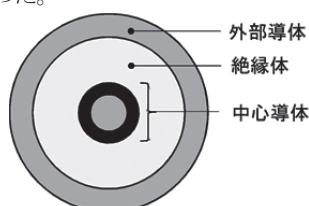


Fig.1 Cross section of a filter-type semi-rigid cable

4. セミリジッドケーブルの作製と測定

セミリジッドケーブルは、ダイスと潤滑油を用いた引き抜きにより作製した。熱伝導度は、断熱消磁冷凍機内で 1K から 9K 付近にて定常熱流法を用いて測定した。減衰率の取得は、対象となるセミリジッドケーブル 1m をコイル状に巻き、インジウムを介して 3K の冷却ステージに接触させた状態でを行い、別々に取得した、室温から 3K までの計測系による減衰率を後で差し引いた。

5. 測定結果および今後の課題

熱伝導度に関してはニオブを用いた場合に引き抜き加工による熱伝導への影響が見られたが、他に関しては概ね文献値から予想されるものであった(Fig.2)。ローパスフィルタ型の高周波特性では、中心導体のキュプロニッケルの厚みを変えることでカットオフ周波数が変化することが確認されたが、予測に比べ減衰の仕方が緩やかであり(Fig.3)、キュプロニッケルの厚みをコントロールしきれていないものと考えている。

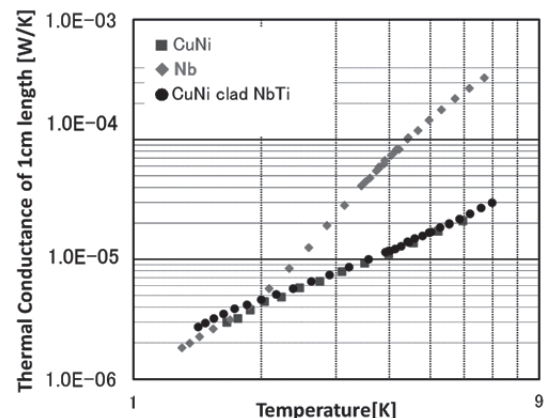


Fig.2 Thermal conductance of semi-rigid cables

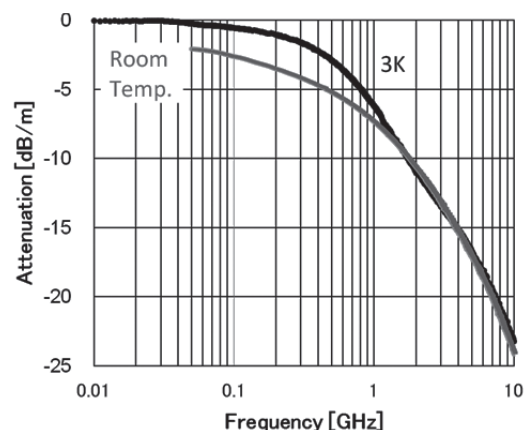


Fig.3 Attenuation of a filter-type semi-rigid cable

参考文献

1. S. Hatakeyama, et al.: J. Low Temp. Phys., Vol. 176 (2014) p.560
2. H. McCarrick, et al, et al.: Rev. Sci. Instrum., Vol. 85 (2014) p.123117
3. A. Kushino, et al.: J. Supercond. Nov. Magn., Vol. 26 (2013) p.2085

高温超伝導 SQUID を用いた金属管のリモート非破壊検査手法の開発 -その1-

Development of remote NDE method for metallic pipes using HTS-SQUID -No. 1-

廿日出好, 小林 奉樹, 中家 早紀 (近畿大学)
 HATSUKADE Y., KOBAYASHI T., NAKAIE S. (Kinki Univ.)
 E-mail: hatsukade@hiro.kindai.ac.jp

1. 緒言

原子力発電所などの過酷な環境で用いられる配管や格納庫は、人が容易にアクセスできない部分が多い。このような箇所に発生する減肉やひび割れなどの欠陥は早期検出が大変困難であり、大事故を引き起こす可能性がある。一方、我々は、DC~MHzまでの広い測定帯域と半導体センサより2-3桁以上の超高感度特性を有する高温超伝導(HTS)SQUID 磁気センサを用いた非破壊検査の研究を行ってきた[1]。本研究では、上記のようなプローブでの直接アクセスが困難な配管などの構造物に対し、HTS-SQUID と超音波振動を組み合わせたリモート・非接触式の非破壊検査技術の開発を提案する。ここでは、磁性金属配管に打撃によりアコースティックエミッション(AE)波を発生させ、AE 波に由来する配管の振動による磁気信号をHTS-SQUID で計測し、上記検査技術の実現可能性を実験的に調べた。

2. 振動由来磁気計測のための SQUID 非破壊検査装置

Fig.1 に示すような、HTS-SQUID, クライオスタット一体型パルス管冷凍機, SQUID 駆動回路, データロガー, 制御・記録用 PC などから構成される SQUID 非破壊検査装置を構築した。用いた配管は、直径 50 mm, 厚さ 2 mm, 長さ 2 m の商用の SUS パイプであり、管の一端をハンマーで打撃することで振動(AE 波)を発生させる。AE 波による振動そのものを計測し、SQUID 信号との比較、もしくは SQUID 信号の加算平均を求めるためのトリガー用センサとして、NF 回路設計ブロックの AE センサ AE-900S-WB を 2 個用いた。SQUID は ISTEK/SRL 製の小型 HTS-SQUID グラジオメータで[2]、平面 1 次微分型検出コイルの一つのコイルの大きさは 1 mm×1 mm である。HTS-SQUID は冷凍機により約 63 K に冷却して、SQUID 駆動回路で駆動した。SQUID のホワイトノイズレベルは約 100 $\mu\Phi_0/\text{Hz}^{1/2}$ であった。AE センサ、および SQUID 出力電圧は、NI-DAQ により 50 kHz のサンプリング周波数で計測し、PC に記録した。今回は加算平均などの処理は行わなかった。

3. SUS パイプの振動由来の磁気信号検出実験

上記装置を用いて、ハンマーによるパイプ端の打撃点を $x = 0$ m とし、SUS パイプの中央で $x = 1$ m の場所ともう片方の端の $x = 2$ m の場所に AE センサを設置した。SUS パイプの一端をハンマーで打撃し、AE センサで AE 信号を計測し、SUS パイプにおける AE 波の伝搬速度を計測結果から計算した。この結果、本サンプルにおける振動の最初の波における伝搬速度は約 2000 m/s となった。次に、上記 2 個の AE センサの中間で、 $x = 1.5$ m の場所に、HTS-SQUID グラジオメータを dB_z/dx 成分の磁場勾配を計測する向きに、リフトオフ約 3 mm でパイプの中心軸上部に設置した。パイプ一端をハンマーで打撃し、AE 波信号を二つの AE センサで、振動由来の磁気信号を HTS-SQUID で計測した。測定結果の一例を Fig.2 に示す。図に示すように、打撃点と 1 m の距離にある No.1 の AE センサがまず波を計測し、次に 2 m の距離にある No.2 の AE センサが波を計測、その少し後に 1.5 m の距離に設置した SQUID でも振動由来の磁気信号を計測することができた。

No.2 の AE センサより打撃点に近い場所に設置した SQUID の方が遅れて信号を出力していることについては、今回用いた SQUID 駆動回路が比較的狭帯域であることに起因すると考え、以下のように周波数特性を調査した。ここでは、円形コイルを SQUID 近傍に設置し、一定振幅の交流電流を流して交流磁場を発生させ、周波数を 10 Hz へと 100 kHz まで変化

させて磁気信号を計測、信号の振幅と位相を求め、SQUID 駆動回路の周波数特性を調査した。この結果を Fig.3 に示す。今回の駆動回路は 60 Hz のノッチフィルタが内蔵されており、50~10 0Hz の信号は大きく減衰し、位相も変化していた。Fig.2 の AE センサの出力に現れている AE 波(数 10 kHz)が含まれる高い周波数の領域では、信号強度は減衰し、位相も大きく変化している。本装置のカットオフ周波数は約 2~3 kHz であり、このような周波数特性のため、SQUID 出力では AE センサ出力より少し遅れて信号が計測されたものと考えられる。

4. まとめ

今回、HTS-SQUID により、非接触・リモートで打撃振動に由来する磁気信号の発生を検出することができた。今後は、信号を安定させるため、磁歪式超音波発生装置を導入し、欠陥由来の磁気信号が計測できるかを調査する予定である。

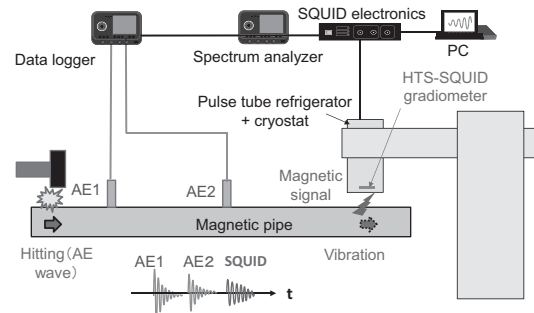


Fig.1 Schematic diagram of HTS-SQUID NDE system.

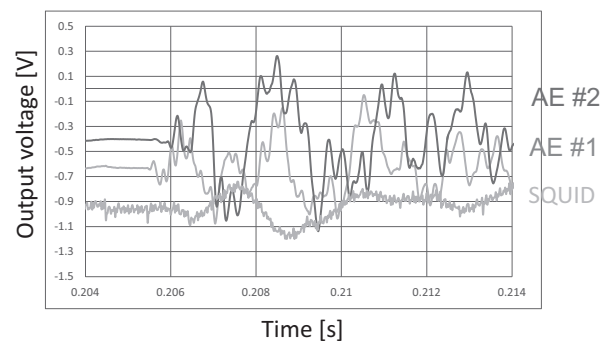


Fig.2 Output voltages of two AE sensors and HTS-SQUID measured after hitting of SUS pipe by hammer

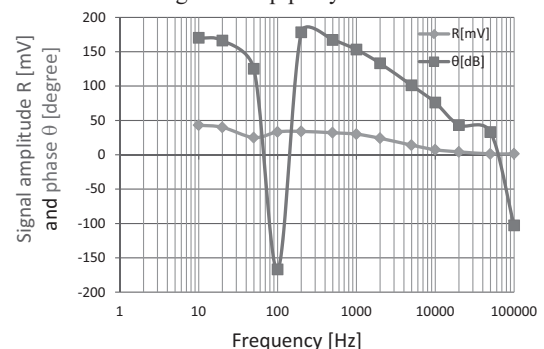


Fig.3 Dependency of SQUID amplitude and phase on frequency

参考文献

- [1] 廿日出好, 低温工学 47 (2012) 345.
 [2] S. Adachi, et al., Physica C 468 (2008) 1936.

SQUID による異なる寸法の PdNi パターン磁気特性評価

The evaluation of the magnetic properties of PdNi pattern of the different dimensions by the 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

単一磁束量子(SFQ)回路をはじめとして、超伝導回路は低消費電力性、高速動作性に優れているデバイスである。しかし、SFQ 回路では、SFQ を保持するための LI_c 積 (Φ_0) に制限があるため、微細化が難しい。それ故、超伝導回路を用いたメモリとしては数 Kbit に留まっている状況にある[1]。そこで我々は、超伝導回路の高機能化に向けて、磁性体に注目した。実際に我々は、磁性体の特徴である残留磁化や磁化反転を利用し応用することで、超伝導位相シフト[2]や AND-OR 切り替え回路[3]の動作を確認し、更なる高機能化に成功している。加えて、これまで我々は、磁性体として PdNi を選択し、PdNi の Ni 割合や膜厚を変化させることで、極低温下での PdNi の磁気特性を検討してきた。その結果、PdNi の Ni 割合を 7.5%、膜厚を 40nm にし、最小で 2mT の外部磁場を印加することで、4.2K において磁化反転を確認することができている[4]。この結果は、磁性体の極低温下におけるメモリ応用への可能性を示唆するものとなっている。

今回は、同種類の磁性体であっても、その寸法の違いにより磁気特性にどのような差異があるのかを確認するために、違う寸法の PdNi パターンを用意し、更なる検討を行った。

2. 実験手法

PdNi 磁気特性の評価は、縦型 dc-SQUID 上に PdNi 薄膜を堆積させ行った。この SQUID は Nb/AlO_x/Nb プロセスを用いて作製した。Fig. 1 は PdNi パターンを堆積させた SQUID の顕微鏡写真である。また、一つのチップ上には複数の SQUID が存在し、それぞれ SQUID と PdNi の寸法が違いため、その一覧を Table. 1 に示す。

今回は Ni 割合 7.5%、膜厚 50nm, 70nm の二種類の PdNi について、有磁場冷却 (FC) を用いたときの評価を行った。SQUID の 4.2K における外部磁場応答 (臨界電流閾値特性) に対し、FC 前後での閾値特性の磁場方向へのシフト量を得ることで各寸法の PdNi の磁気特性の差異を調査した。FC の際は、終了温度を 15K に固定し、開始温度を 15K~40K まで変化させて行った。

3. 結果と考察

二種類の PdNi について、30K~40K の FC 開始温度において、全 SQUID の PdNi の磁化が確認された。しかし、15K~20K の FC 開始温度では、PdNi の磁化の効果は見られなかった。Fig. 2 は、FC 開始温度を変化させたときの、膜厚 50nm の PdNi の磁化による閾値特性のシフト量を見積もったものである。Y 軸は SQUID の閾値特性における一周期分 (Φ_0) に対するシフト量とした。Fig. 2 からは、FC 開始温度を上げるにつれてシフト量が増えており、PdNi 長さが長くなるにつれてもシフト量が増えていることが分かる。更に Fig. 2 のプロットから、FC における特性として、原点を通る線形の直線のように変化しているように思われる。この特性には磁性体の寸法・形状による反磁界の効果が反映されており、今回得られた結果は線形近似できることから、本検討における寸法・形状を持つ PdNi パターンでは、反磁界の影響はほぼ無いということ、及び磁化の大きさがパターン内で均一であることを示していると思われる。また、膜厚 70nm の PdNi についても同様なグラフが描けている。

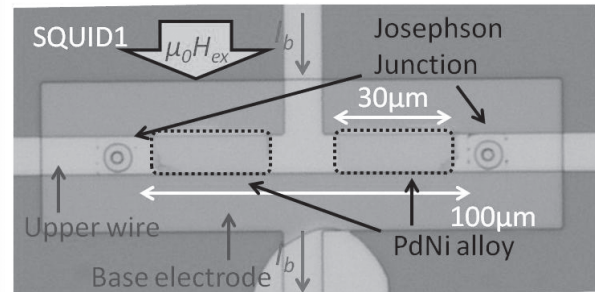


Fig. 1 Microphotograph of dc-SQUID (SQUID#1)

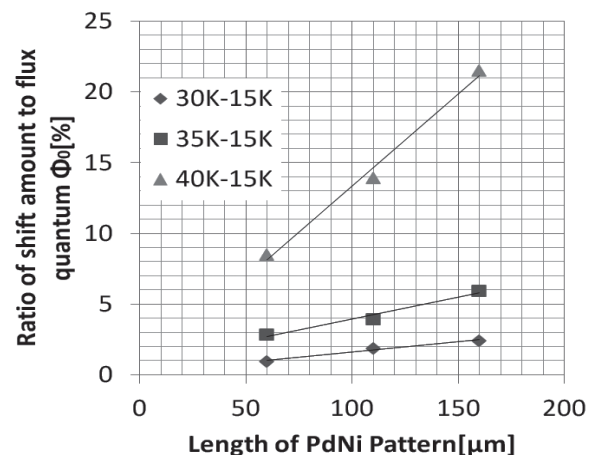


Fig.2 Magnetic effects of PdNi patterns with different dimensions

Table.1 Dimensions of dc-SQUIDs and PdNi patterns

SQUID	SQUID		PdNi pattern	
	Distance between JJs[μm]	Width of upper wire[μm]	Length[μm]	Width [μm]
#1	100	10	60(30 × 2pcs)	10
#2	150	10	110(55 × 2pcs)	10
#3	200	10	160(80 × 2pcs)	10

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

- S. Nagasawa, et al. "High-frequency clock operation of Josephson 256-word × 16-bit RAMs," IEEE Trans. Appl. Supercond., vol. 9, no. 2, pp. 3708-3713, Jun. 1999.
- S. Taniguchi, et al.: Jpn. J. Appl. Phys. 54, 043101(2015)
- 第 76 回応用物理学会春季学術講演 谷口他 14a-A2-2
- K. Ishikawa, et al.: Abstracts of CSSJ Conference, Vol.91 (2015)

ポイントコンタクト分光法を利用した金属内への水素吸蔵過程の解明

Development of hydrogen absorption method in metals using quantum tunneling

河江 達也, 高田 弘樹, 稲垣 祐次 (九州大学工学部); 橋爪健一 (九州大学総理工); 家永 紘一郎 (東工大理工)
 KAWAE Tatsuya, TAKATA Hiroki, INAGAKI Yuji (Dept. of Applied Quantum Physics, Kyushu University);
 HASHIZUME Kenichi (Dept. of Advanced Energy Engineering Science, Kyushu University);
 IENAGA Koichiro (Tokyo Institute of Technology)
 E-mail: t.kawae.122@m.kyushu-u.ac.jp

1. はじめに

近年、水素エネルギー社会の実現へむけて金属等に対する水素の吸蔵・拡散のダイナミクスが盛んに研究されている。これを解明する上で最も重要になる点が、トンネル効果の関与を明らかにすることである。水素原子は最も軽い元素であり、金属中水素はトンネル効果など強い量子性を有することが指摘されている[1]。したがって低温でもトンネル効果によって水素吸蔵・拡散が進行する可能性がある。

我々は非弾性電子分光法を用いた新たな水素検出法を開発し、金属ナノコンタクト内への水素吸蔵の直接観測実験を行っている[2]。電子の平均自由行程より十分に小さくかつ短いナノコンタクトへ電圧を印加すると、電子はエネルギーの散逸なく加速される(弾道電子)。この弾道電子は結晶格子や金属中水素との衝突でフォノンや水素を励起するため、微分伝導度に変化が生じる。そこで、この弾道電子を用いてトンネル効果による金属内への水素吸蔵・拡散を検出する。

前回の学会では、 $T=18\text{K}$ という低温でもバイアス電圧を印加したとき、トンネル効果によってPd金属内に水素が侵入することを報告した[2,3]。今回の学会では、金属Vにおける実験結果を報告する。

2. 実験装置

ナノコンタクト作成には Mechanical Controllable Break Junction 法 (MCBJ 法) を用いた。MCBJ 法では、図1左図に示すようにピエゾ素子に電圧を印加することで、金属細線を引き伸ばしていきナノコンタクトを作製する。低温・真空中でこの手法を用いることで、安定した接点、清浄な表面の作成が可能となる。また、実験装置は二重断熱管構造になっており、内側断熱管にはベローズ機構付き MCBJ 装置が組み込まれており、液体水素中でのナノワイヤ制御実験が可能となっている。これにより液体水素中で測定を行なうことができ、ジュールヒーティングの効果を抑制できる。

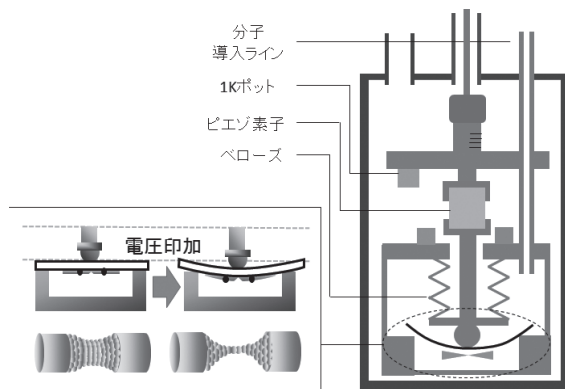


図1: MCBJ法の原理(左図)と本実験で用いるベローズ付き MCBJ 実験装置の模式図 (右図)。

3. 実験結果

図2(a)は液体水素導入前(破線)と液体水素導入後4000分経過時(実線)に、Vナノコンタクトで得られた dI/dV 特性を示している。水素導入前から信号は大きく変化し、ナノコンタクトへの水素吸蔵が起きたことがわかる。この時、コンタクト部への印加電圧を $V \leq 80\text{mV}$ に制限しており、この印加電圧の条件では図中赤線で示す信号で変化が飽和した。そこで、より高電圧($V > 100\text{mV}$)の印加を行ったところ、図2(b)に示す信号へと変化が生じた。この変化はより高濃度の水素吸蔵に伴って生じていると我々は考えている。本講演では、本結果についてより詳細に報告する。

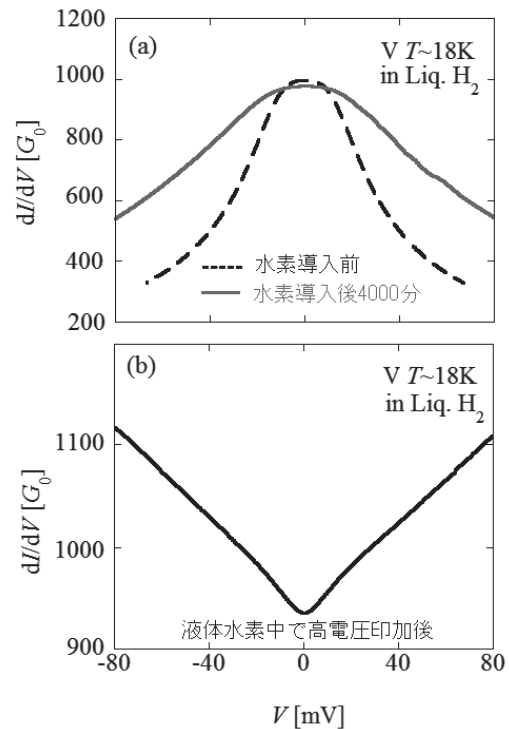


図2: (a) Vナノワイヤへ水素を導入することによる dI/dV 信号の時間変化。図中点線は水素導入前の信号。実線は水素導入後4000分後の信号を表す。(b) Vナノコンタクトに100mVの電圧をかけた後の dI/dV 信号の時間変化。

参考文献

1. Y. Fukai, The Metal-Hydrogen System, 2nd ed. (Springer, Berlin, 2005).
2. K. Ienaga, H. Takata, Y. Onishi, Y. Inagaki, H. Tsujii, T. Kimura, and T. Kawae, Appl. Phys. Lett. 106 021605 (2015).
3. 河江 達也, 高田 弘樹, 家永 紘一郎, 稲垣 祐次, 2015年度春季低温工学・超電導学会, 3D-a07.

加圧液体窒素の急減圧時における沸騰挙動の観測

Observation of boiling behavior of pressurized liquid nitrogen under rapid depressurized conditions

田中 順也, 武田 実(神戸大); 山城 一藤, 新郷 正志, 神谷 祥二(川崎重工業)

TANAKA Junya, TAKEDA Minoru (Kobe Univ.); YAMASHIRO Kazuto, SHINGO Masashi, KAMIYA Shoji (KHI)

E-mail: 159w516w@stu.kobe-u.ac.jp

1. はじめに

現在、化石燃料の枯渇やそれに伴う地球温暖化の問題に加え、2011年の福島原子力発電所事故による原子力エネルギーの信頼性が低下する中で、安全で豊富な再生可能エネルギーに注目が集まっている。再生可能エネルギーは地球規模で広く分布しており、海外での余剰な再生可能エネルギーにより水素を大量に製造し、水素を極低温の液体状態(沸点 20 K)のまま海上輸送するプロジェクト⁽¹⁾が進んでいる。しかし、液体水素を海上輸送する場合、輸送による振動等から気化することで容器内の圧力が上昇し、最悪の場合には破裂の危険性が考えられる。このため、ガス放出用の圧力逃し弁(安全弁)を取り付けることにより、破裂の危険を避けることができるが、圧力逃し弁が作動した際の急減圧時における状態変化(沸騰挙動)は未だ明らかになっていない。

本研究では、液体水素の貯蔵・運搬用容器の基準圧力・温度・積み付け制限値、安全弁の設計値を把握するための予備的研究として、加圧液体窒素(沸点 77 K)を用いて急減圧時における沸騰挙動を観測し、その減圧特性、温度特性、蒸発特性を調べることで、沸騰状態を解明することを目的とする。

2. 実験装置

実験装置の写真を Fig.1 に示す。実験装置は光学クライオスタット、圧力計、流量計、データロガー、高速度カメラ等から構成されている。蒸発ガスラインには、流量調整用のニードル弁、容器出口の開閉弁として電磁弁を使用した。

光学クライオスタットは、断熱真空槽、液体窒素槽(10.0 L)、液体水素槽(13.6 L)、サンプル槽(3.8 L)、光学観測窓、ニードル弁等で構成されている。主な素材は SUS304 で、高さ 1200 mm、外径 300 mm である。クライオスタットの下部には光学観測窓が 4 箇所設けられており、サンプル槽内の様子を光学観察できるようになっている。サンプル槽内部温度は T 型熱電対で測定できる。

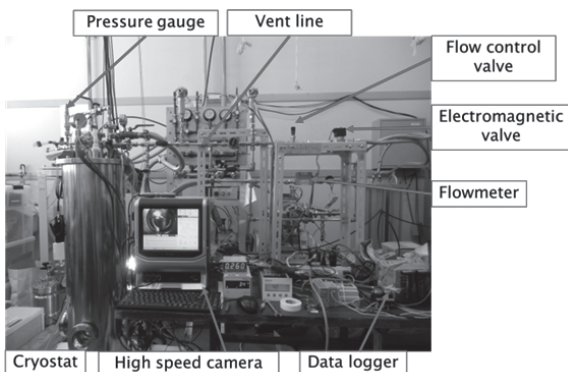


Fig.1 Photograph of experimental apparatus.

3. 実験方法

サンプル槽に液体窒素を一定量補充し、電磁弁を閉として、サンプル槽を密封する。ヒーター、もしくは自然入熱による加熱を行い設定圧力まで上げる。撮影用ライトを点灯し高速度カメラにて撮影を開始する。電磁弁を開とし、サンプル槽の密封を解く。以上の方法により、減圧試験を行った。

沸騰挙動は初期の液体状態に依存するので、加熱方法を変えることで、液体状態を飽和と成層に変化させた。また、減圧直前の圧力を 0.4 MPaG と 0.2 MPaG、減圧速度をニードル弁の回転数を変えることで流量計数 C_v を 0.16、0.10、0.02 と変化させ、様々な条件下での試験を行った。

4. 実験結果と考察

Fig.2 に高速度カメラにより撮影したクライオスタット内部の沸騰の様子を示す。減圧前圧力の比較を行うために、液状態は飽和状態、流量係数 C_v は 0.16 の液状態で、圧力を 0.4 MPaG と 0.2 MPaG とした。設定圧力 0.4 MPaG では主に容器に沿って気泡が発生するが、0.2 MPaG では容器中央から発生した。この結果から、設定圧力により気泡の発生状況が変わることが分かった。また、気泡の発生箇所も異なると思われる。

次に液状態の比較を行うために、飽和と成層の比較を行った。減圧前の成層の多くが飽和温度より低く沸騰しないサブクール状態であったためか、この状態で減圧試験を行った結果、成層では壁面から突沸が発生し、蒸発流量が少なかった。

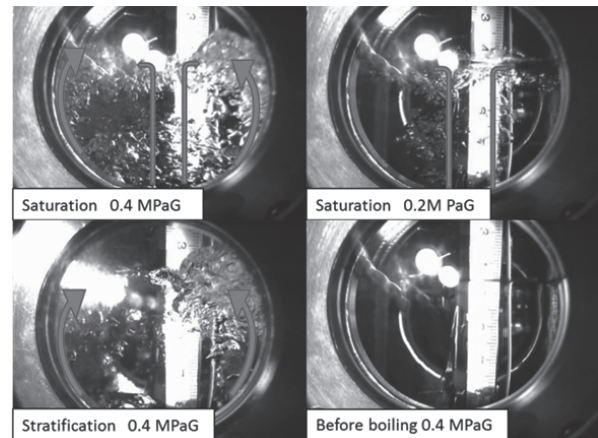


Fig.2 Direction of rapid boiling.

5. まとめ

沸騰現象は減圧前圧力、液状態によってその挙動が変わることがわかった。これは容器の形状にも関係していると考えられる。また、液状態は蒸発流量にも影響を及ぼしていた。今後の課題としては、今回の実験で測定できなかった気泡発生地点の観測、液体ヘリウム、液体水素の減圧試験による、極低温液体の沸騰挙動の観測が挙げられる。

謝辞

本研究の一部に対して、科研費基盤研究 A(24246143)の援助を受けました。ここに感謝の意を表します。

参考文献

- (1) S. Kamiya *et al.*: Study on Introduction of CO₂ Free Energy to Japan with Liquid Hydrogen, Physics, Procedia **67**(2015)11-19.

液体水素用外部加熱型 MgB₂ 長尺液面センサーの個体差性能評価

Individual difference performance evaluation of external-heating-type MgB₂ long level Sensor for liquid hydrogen

瀨浦 隆昌, 前川 一真, 山崎 瑛也, 武田 実(神戸大); 松野 優, 藤川 静一(岩谷産業); 熊倉 浩明(NIMS)

HAMAURA Takaaki, MAEKAWA Kazuma, YAMAZAKI Teruya, TAKEDA Minoru (Kobe Univ.);

MATSUNO Yu, FUJIKAWA Shizuichi (Iwatani Corp.); KUMAKURA Hiroaki (NIMS)

E-mail: 155w521w@stu.kobe-u.ac.jp

1. はじめに

現在、究極のクリーンエネルギーといわれる水素エネルギーが注目を集めている。水素エネルギーを大量輸送するためには、密度が大きい液体水素(沸点 20 K)にすることが有効と考えられる。そこで、本研究では、超伝導体である MgB₂(二ホウ化マグネシウム)を用いた液体水素用の外部加熱型液面センサーの研究を行っている^[1]。

本研究では、液体水素運搬船用の長尺液面センサーの開発を目指して、その予備的研究として、作製した 5 本の長尺液面センサーの性能評価を行い、個体差について調べることが目的とする。

2. 超伝導MgB₂液面センサー

超伝導物質は臨界温度以下になると電気抵抗がゼロになる性質を持つ。液体水素は、今回センサーに使用する MgB₂ 線材の臨界温度(32 K)に比べ沸点が低いため、MgB₂ 線材を液体水素内に入れると超伝導状態になる。一方、液体水素に触れていない上部では常伝導状態になる。このことを利用して、液体水素の液面の位置測定が可能となる。本研究では外部加熱型を採用し、液面センサーとして MgB₂ 線材(長さ 500 mm、直径 0.32 mm)のまわりに 2 mm 間隔でヒーター線(マンガニン線)を螺旋状に巻いたものを 5 本(A1, A2, B1, B2, C)作製した。

3. 実験方法

性能評価として、静的液面検知特性と熱応答性を調べた。まず、静的液面検知特性については、センサー 5 本に対して測定電流を 10 mA、ヒーター入力値を 3 W、6 W、9 W とし、それぞれ液面が 500 mm から 0 mm になるまでの各液面位置でのセンサー出力電圧をデータロガーで記録した。また、各液面位置にて、測定電流を反転させてその両方を記録した。なお、各ヒーター入力値に対して 2 回ずつ計測を行った。

熱応答性については、センサー測定電流を 10 mA に設定し、ヒーター入力値を 3 W、6 W、9 W、12 W、15 W としてセンサー出力電圧を測定した。まず、ヒーター電源をスタンバイ状態にし、データロガーでセンサー出力電圧の収集を開始し、5 本のセンサーのヒーター電源を順にオペレート状態にした。なお、計測の再現性の確認のため、2 回ずつ計測を行った。

4. 実験結果と考察

(1)静的液面検知特性

Fig.1 に測定電流 10 mA、ヒーター入力値 6 W における液面位置とセンサー出力電圧の関係を示す。Fig.1 より、5 本すべてのセンサーで近似直線の相関係数は 0.999 以上となっており、個体差はかなり小さいと言える。センサー A1 だけが他より少し高い電圧値を示し、近似直線の式による有効液面検知長さも他と少し離れた値を示していたが、これはセンサー作製過程でのセンサー電圧端子間距離の誤差によるものと考えられる。なお、ヒーター入力値 3 W、9 W においても同様の結果を示していた。

(2)熱応答性

Fig.2 に測定電流 10 mA、ヒーター入力値 6 W におけるセ

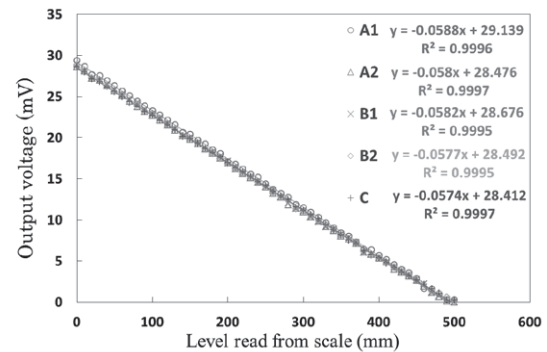


Fig1. Relationship between liquid level and sensor output voltage at a heater input of 6W.

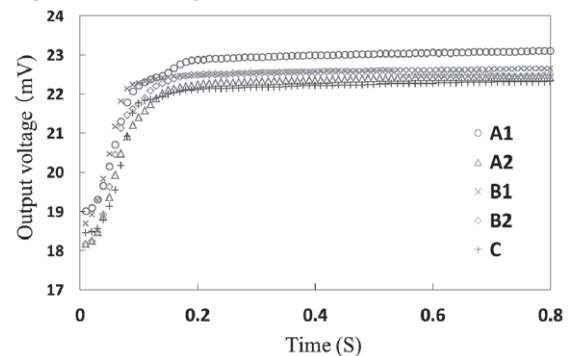


Fig.2 Relationship between time and sensor output voltage at a heater input of 6W.

ンサー出力電圧と時間の関係を示す。瞬間的にヒーターを入力した後の応答時間は平均約 0.18 秒と非常に短く、個体差も非常に小さかった。静的液面検知特性の実験結果と同様にセンサー A1 については他のセンサーより高い電圧値を示し、グラフも他と異なった曲線を描いているが、応答時間に大きな差はなかった。また、ヒーター入力値 3 W から 9 W までは応答時間は徐々に短くなって行ったが、それ以上ではほとんど変化がなかった。

5. まとめ

今回行った個体差性能評価試験の結果、液面センサーの個体差は無視できるほど小さかった。よって、量産も可能であると考えられる。今後は、練習船深江丸を用いた実証航海実験を行い、より正確で安全な液面計の研究・開発を行なっていく予定である。

謝辞

本研究の一部に対して、科学研究費基盤研究 A (24246143) の援助を受けました。ここに感謝の意を表します。

参考文献

1. K. Maekawa, *et al.*: J. Cryo. Super. Soc. Jpn., **50** (2015) pp.368-373.

液体水素用外部加熱型 MgB₂ 液面センサーから気体水素への熱伝達Heat transfer from external-heating-type MgB₂ liquid hydrogen level sensor to gas hydrogen

山崎 瑛也, 武田 実(神戸大学);

YAMAZAKI Teruya, TAKEDA Minoru (Kobe University);

E-mail: 142w534w@stu.kobe-u.ac.jp

1. はじめに

近年のエネルギー問題や環境問題を受けて、クリーンエネルギーの一つである水素に注目が集まっている。水素を大量に貯蔵・輸送する観点から、液体にしてタンクで運ぶのが望ましい。その際に液面を正確に把握するための高精度な液面センサーが必要となる。そこで本研究では、超伝導 MgB₂ (二ホウ化マグネシウム) 液面センサーの研究開発を行うと同時に、実用化に向けて解析ソフト ANSYS を用いてセンサーを大型化した際のシミュレーション解析を行ってきた[1,2]。正確にシミュレーション解析を行うには様々な計算が必要となるが、重要な計算の一つとしてセンサーから気体水素への熱伝達がある。しかし、極低温下における水素の熱伝達の文献は少なく、また本研究の液面センサーは MgB₂ 線材の外側にヒーターを巻いた外部加熱型なので、従来の熱伝達モデルを当てはめるのは難しい。そこで本研究では、外部加熱型 MgB₂ 液面センサーから気体水素への熱伝達率の測定を最終目標とし、その前段階としてヒーターとして使用しているマンガン線から気体水素への熱伝達率の測定を目的とした。

2. 実験装置

本実験では、クライオスタットのサンプル槽内に発熱体となるマンガン線を設置し、四端子法を用いて発熱体抵抗を測定することで、抵抗率の温度依存性から発熱体温度を算出し熱伝達率の計算に使用した。また、サンプル槽内に Cernox 温度計を3カ所取り付け、同様に四端子法で抵抗を測定してクライオスタット内の温度を測定した。

Fig. 1 に発熱体試験装置の図と写真を示す。マンガン線(直径 0.2 [mm]、長さ 43.2 [mm])を発熱体として使用した。またマンガン線の張力が熱収縮によって変化しないよう装置上部にばねを取り付け、間に絶縁リングを設置することによりばねへの導通を防いだ。さらにホルダーの上部と下部に絶縁体(GFRP)を設置することにより、マンガン線のみが電流が流れるよう工夫した。

3. 実験結果と考察

真空引きを行ったサンプル槽に、気体水素を 0 [MPaG]まで封入し、外側から液体窒素で冷却することで熱伝達特性の評価実験を行った。

Fig.2 に気体圧力 0 [MPaG]下で気体水素温度を 120 [K]から 77 [K]まで下げた時の熱伝達特性を示す。気体水素温度が低下すると、それに伴い熱伝達率も減少する結果が得られた。また、各印加電流の熱伝達率を比較すると、電流値が大きいほど熱伝達率が上昇することが分かった。

次に-0.03 [MPaG]、-0.05 [MPaG]とサンプル槽内の圧力を減圧変化させた際の熱伝達特性を調べた。Fig.3 に印加電流 0.7 [A]の条件下で気体水素温度を 120 [K]から 77 [K]まで下げた時の熱伝達特性を示す。サンプル槽内の圧力が低いほど、熱伝達率は減少するという結果が得られた。

4. まとめ

超伝導液面センサーの外部ヒーターとして使用するマンガン線を試験体とした実験を行い、印加電流と圧力をパラメーターとして低温下における熱伝達特性と気体水素の温度との関係性を調べた。

謝辞

本研究の一部に対して、科研費基礎研究 A(24246143)の援助を受けました。ここに感謝の意を表します。

参考文献

1. H.Nara, *et al.*: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 86 (2012) p.144.
2. M.Takeda, *et al.*: ICEC24-ICMC2012 (2013) pp.311-314.

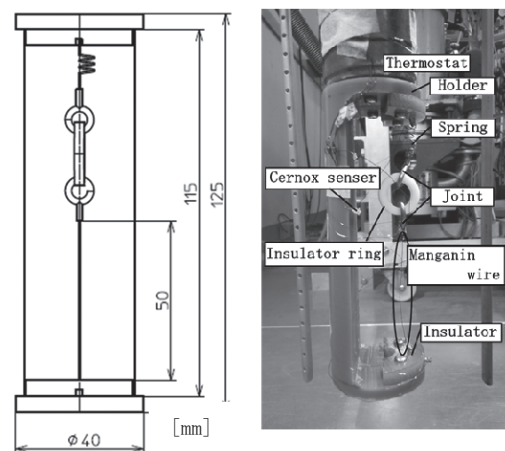


Fig.1 Schematic and photo of test heater device.

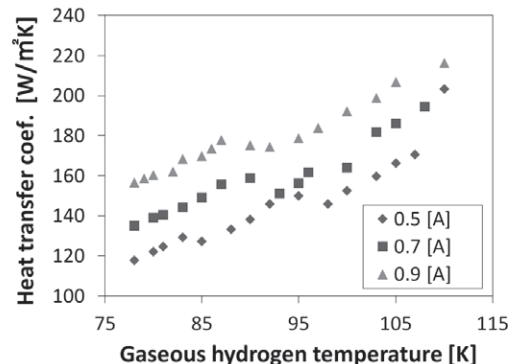


Fig.2 Heat transfer characteristics lowered from 120[K] to 77[K] (0 [MPaG]).

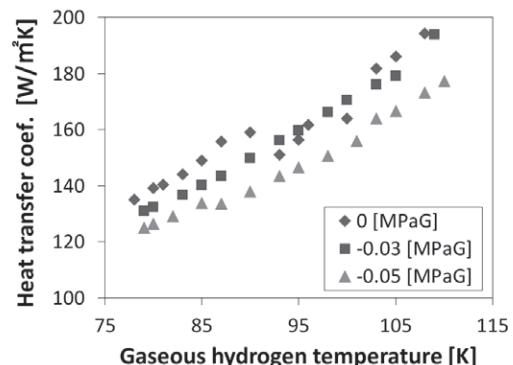


Fig.3 Heat transfer characteristics lowered from 120[K] to 77[K] (0.7 [A]).

ヘルムホルツ共鳴を利用した液体水素液面計に関する実験的研究

Experimental study on liquid hydrogen level gauge using Helmholtz resonance

中納 暁洋(産総研); 西津 貴久(岐阜大学)

NAKANO Akihiro (AIST); NISHIZU Takahisa (Gifu University)

E-mail : a.nakano@aist.go.jp

1. はじめに

これまで我々は微小重力下で使用可能な液量計測装置を開発するため、ヘルムホルツ共鳴現象を利用した音波による液量計測手法の開発を進めてきた[1]。市販のスピーカを計測センサーとしても利用することから比較的低コストで液量計測装置を組み込むことができる。この技術を地上での産業用として展開できないかと考え、貯槽の中に液面計としての小型ヘルムホルツ共鳴器を設置し、液面位置の計測を行うことを試みた。なお、地上での応用では既存技術との競合という観点から、現状においてまだ有効な計測方式が確立されていない特殊な分野での利用が望ましい。今後の発展性も考慮し、近い将来構築される水素社会を見据え、液体水素に対するヘルムホルツ共鳴現象を利用した液面計の開発を試み、その有効性の確認及び問題点の把握を行うことにした。

2. 実験装置

実験装置の全景写真とヘルムホルツ共鳴器の概略を Fig. 1 に示す。全景写真中、中央に見えるのが水素液化装置で、トランスファーチューブを介し必要な量の液体水素を写真右側に見えるガラス製クライオスタット内に供給し実験を行った。このクライオスタット内に液面計としてのヘルムホルツ共鳴器が設置されている。共鳴器は2011年春季の本会議で報告した液体窒素で試験を行ったものを使用した[2]。共鳴器は液体が入る計測管部、ネックチューブ部、スピーカを納めた共鳴空間部の3つの部位から成る。スピーカは市販のFOSTER社製334495を採用した。周波数をスイープさせた音波をスピーカから発信させると同時にスピーカボイスコイルのインピーダンス計測を行い、音響データを取得した。得られた音響データに対しFFT解析を行い、共鳴周波数から計測管内の液体量、更に液面位置を求めた。一方、計測管の外側面に目盛りを付けており、クライオスタット側面のスリットから液面の位置が読み取れるようにしている。クライオスタット内の圧力は圧力トランスデューサでモニターし、全ての実験はほぼ大気圧下で行った。

3. 実験結果

液体水素温度環境下で初めてヘルムホルツ共鳴を捉えることに成功した。本実験で得られた音響データとFFT解析結果の一例を Fig. 2 に示す。Fig. 2a は共鳴器の計測管の底から42.0cmの所に液面があった時に5秒間で200Hzから3kHzまで周波数をスイープさせた際のスピーカボイスコイルのインピーダンス計測から得られた音響信号を表す。Fig. 2b はそれに対してFFT解析を行った結果である。周波数約936Hzの所にヘルム

ホルツ共鳴が捉えられていることが分かる。

クライオスタット内の気相部では大きな温度勾配が形成されていることから、共鳴周波数から計測管内の液体量 V_L を求めるにはその温度勾配に起因する音速の変化を考慮しなければならない。液体が計測管の最下点にある状態で得られる共鳴周波数を参照周波数 f_0 とし温度勾配がある場で V_L を求める導出式を以下に示す。

$$V_L = \frac{V_2(V_1 + V_2) \left\{ f^2 - (C/C_0)^2 f_0^2 \right\}}{V_1 f^2 + V_2 \left\{ f^2 - (C/C_0)^2 f_0^2 \right\}} \quad (1)$$

目盛りから読み取った V_L と共鳴周波数から $(C/C_0)^2$ を f の関数として求め、式(1)を基に現実の系で使用できるよう修正した式に代入して求めた V_L が Fig. 3 中の実線である。キャリブレーションを必要とするが、液体水素においても本計測手法を用いて液体量、及び液面の位置を求めることは可能である。

4. まとめ

液体水素環境下において初めてヘルムホルツ共鳴現象を捉えることに成功し、液体量・液面位置の計測が可能であることを示すことができた。但し、実用には解決すべき課題が多々あり、当日はそれら問題を含め研究結果を詳しく解説する。

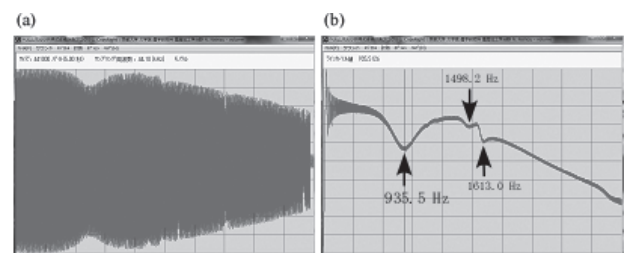


Fig. 2 An example of obtained experimental result.

(a) Recorded sound signal. (b) Power spectra obtained from the FFT analysis.

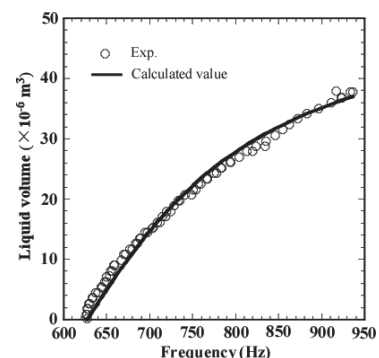


Fig. 3 Relation between Helmholtz resonance frequency and liquid volume.

参考文献

1. A. Nakano, et al.: Cryogenics, 46 (2006) pp.126-131
2. A. Nakano, et al.: Abstracts of CSSJ Conference, 84 (2011) p.23.

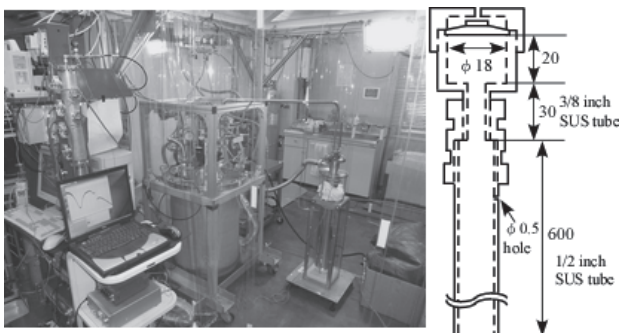


Fig.1 Whole view of the experimental set-up and schematic of the resonator.