

令和 3 年 6 月 14 日現在

機関番号：33907

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2018～2020

課題番号：18K04291

研究課題名（和文）磁性ジョセフソン接合を用いた超伝導任意位相差素子の実現とその回路応用

研究課題名（英文）Realization of superconducting phase elements with arbitrary values using magnetic Josephson junctions and their applications to superconducting circuits

研究代表者

赤池 宏之（Akaike, Hiroyuki）

大同大学・工学部・教授

研究者番号：20273287

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,400,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、超伝導回路技術に有効となる超伝導位相シフト技術を開発させるため、超伝導スピントロニクス素子である磁性ジョセフソン $\pi$ -接合を用いた任意位相差素子の実現を目指して素子特性の検討を行った。さらに、本素子を超伝導回路へ導入したときの効果について調査するとともに、導入時の位相極性制御が重要であることを明らかにした。また、素子小型化に有効な大きな磁場侵入長を持つNbTiNを用いて新たな接合技術を開発した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

超伝導位相シフト技術は、超低消費電力性を特長とする超伝導集積回路や量子コンピュータに使われる超伝導量子回路において、非常に重要な技術となりうる。本研究で検討した素子は、従来のジョセフソン $\pi$ -接合単体では位相シフト量が $\pi$ となるのに対して、 $\pi/2$ 程度のものから $\pi$ 程度のものまで種々の位相シフト量を実現できる。本成果は、この素子の実現可能性や回路への適用可能性を示すものであり、超伝導位相シフト技術の発展につながることから、その学術的意義は大きい。

研究成果の概要（英文）：In this study, we investigated characteristics of the superconducting phase shift elements with arbitrary values based on magnetic Josephson  $\pi$ -junctions to develop superconducting phase shift technologies which are useful for superconducting digital circuits. Furthermore, we studied the effects of an introduction of the elements on the operation and performance of the circuits, and found that control of the polarity of the phase shift of them is crucial. We also developed a novel Josephson tunnel junction with a superconducting NbTiN material which has a long magnetic penetration depth effective in miniaturization of the elements.

研究分野：超伝導エレクトロニクス

キーワード：超伝導デバイス 超伝導集積回路 磁性ジョセフソン接合 デバイス作製技術 窒化物超伝導体

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

## 1. 研究開始当初の背景

超伝導単一磁束量子回路は、将来の高度情報機器に必須な高速性と高エネルギー効率性を併せ持つ電子回路技術として期待されている[1]。この回路は、超伝導ループ内の磁束が量子化されるという超伝導現象の特徴を活かし、磁束量子1個分となる単一磁束量子(SFQ)を利用する回路である。回路の構成に際しては、ジョセフソン接合を挟み込んだ超伝導ループを用い、入力信号に応じてジョセフソン接合をスイッチさせ、ループのSFQの出入りを制御する。SFQは時間幅数ps、波高値数mVの電圧パルスであるため、SFQ回路は高速性に加え低消費電力性を大きな特長とする。近年は、低電力性を追求した断熱回路など、超低電力SFQ回路の検討が精力的に行われている。これはICT機器の消費電力が今後急激に増大することが予想される現在、特に省電力性は重要となるからである。

このような超伝導回路の高性能化は、半導体技術に見られるスケーリング則に該当するものが存在し、従来はその微細化技術の向上によりなされてきた。また、絶対温度4K付近での動作となる現在の超伝導体ニオブ(Nb)による集積回路技術に対して、より高温で動作を可能とする窒化Nbなど高い臨界温度を持つ超伝導体による集積回路技術も高性能化の一手段であり、その開発が検討された。

それに対して、近年、新たな試みとして、従来はその物性上の特性から使用を避けてきた磁性材料を超伝導デバイスに取り込もうとする検討が活発化してきた。一例として、磁性材料の磁化から生じる磁場を超伝導回路と結合させる方法を研究代表者らは提案した[2]。磁場が回路内の超伝導ループと結合するとき、超伝導電子の振る舞いを表す超伝導巨視的波動関数の位相シフトが起こる。この位相シフトを回路の動作制御や省電力化に応用するのである。このような位相をシフトさせる素子のことを超伝導位相シフト素子(PSE)と呼ぶ。ただし、磁化を利用するPSEの場合、磁束をループに鎖交させる必要性からループ面積の縮小化に限界がある。さらに、他のループへの漏れ磁束の懸念もあり、将来的な回路全体の小型化・集積化の観点から限界が生じる。この限界を打破するPSEが、磁性ジョセフソン接合である。この接合は、ジョセフソン接合の障壁層に強磁性体を用いたもので、電流の流れていない基底状態において、超伝導電極間の巨視的波動関数の初期位相差が $\pi$ となる。つまり、超伝導ループにこの $\pi$ -接合を挿入すると、それだけで $\pi$ の位相シフトを生じるのである。接合技術として、 $\pi$ -接合の検討がされ始めてきている状況[3]を考慮すると、この $\pi$ -接合によるPSEおよびPSE技術のさらなる発展が重要と考えられる。

## 2. 研究の目的

本研究では、超伝導集積回路の高性能化に向けた超伝導PSE技術の発展を目的として、基底状態で0から $\pi$ までの位相差をもつPSEを検討する。なお、この素子は、超伝導ループに $\pi$ -接合や通常の接合(0-接合)を含み、基底状態において回路パラメータに応じて任意の位相差を持つため、任意位相差素子と呼ぶことにする。また、この任意位相差素子の超伝導回路への応用を検討し、その効果を明らかにする。また、デバイス作製技術の検討として、窒化物系超伝導体を用いた接合技術の検討を行う。任意位相差素子は超伝導ループの構造を持つことになるが、そのループを小さくするには超伝導材料の磁場侵入長が大きい方が好ましい。この点を考慮し窒化物系材料に着目した。

## 3. 研究の方法

本研究の主要な項目は、以下の2つとなる。

### (1)数値計算による任意位相差素子の特性検討とその応用

任意位相差素子は、超伝導ループ内に $\pi$ -接合1つを持つ構造を基本として、そこに通常のジョセフソン接合(0-接合)を加えて構成する。この素子構造において、素子へのバイアス電流0の基底状態で、0から $\pi$ までの位相差を実現すべく構成回路要素の回路パラメータの検討を行った。検討に際しては、回路シミュレータのWinS[4]を用いた。また、バイアス電流供給下での振る舞いを明らかにするとともに、超伝導単一磁束量子回路への応用を検討した。

### (2)窒化物超伝導体による超伝導接合技術の検討

現在の超伝導集積回路は、制御性や均一性が高く高品質なジョセフソン接合を作製できるため、Nbを用いた回路技術となっている。Nbは磁場侵入長が約90nm程度であり、これが素子や回路のインダクタンスの寸法を決めることになる。一方、NbNやNbTiNなどの窒化物材料は200-350nmと長く、同じインダクタンス値を実現するための素子寸法をNbに比べ半分程度にできる。そこで、超伝導材料としてNbTiNを選択し、その回路作製技術の検討を行った。NbTiNはNbNに比べ、下地材料の結晶性の影響を受けにくく、適用範囲が広いためである。また、トンネル障壁層としては、ハフニウム酸化物を新たに検討した。このトンネル障壁層は、Nb接合では他研究機関で実績があるものの、窒化物系接合では世界で初めての試みとなる。ハフニウム(Hf)に着目した理由は、Hfの状態密度及び抵抗率を考慮すると、NbTiN上に堆積したHfとの界面に

おける波動関数への影響が比較的小さく、接合の高い臨界電流密度につながる可能性があるからである。従って、アンダーダンプ型ジョセフソン接合を目指す際に、この素子構造は重要となる可能性がある。

#### 4. 研究成果

##### (1) 数値計算による任意位相差素子の特性検討とその応用

任意位相差素子の構造として、超伝導ループに  $-1$  接合 1 個含む  $-1$  接合 SQUID 及び、超伝導ループに  $-1$  接合および  $0$  接合を含む  $0-1$  接合 SQUID を検討した。

$-1$  接合 SQUID では、ループインダクタンス  $2.0 \text{ pH}$  の条件下で、 $-1$  接合の枝路のインダクタンスを変化させたときの素子の位相差を見積もった。その結果、インダクタンスの増加に伴い、ほぼ線形に位相差が減少し、 $0 \text{ pH}$  のとき最大  $0.67$ 、 $2.0 \text{ pH}$  のとき  $0$  となった。ただし、接合の枝路のインダクタンス  $0 \text{ pH}$  という条件は、現実的にはあり得ない。そこで、妥当なインダクタンス値としては  $-1$  接合の枝路  $0.5 \text{ pH}$ 、他方を  $1.5 \text{ pH}$  として、 $-1$  接合のジョセフソン臨界電流値を  $0.3 - 0.6 \text{ mA}$  で変化させたときの位相差を見積もった。その結果、 $0.43 - 0.58$  となった (図 1)。この結果から、 $-1$  接合 SQUID はおよそ  $1/2$  位相シフトとして、機能する可能性があることがわかった。そのほか、バイアス電流を加えたときの位相差などを見積もった。なお、この  $1$  接合 SQUID は、素子の構造上、SFQ の通過を許さず、受動 PSE としてのみ機能するが、 $1/2$  PSE として期待できる。

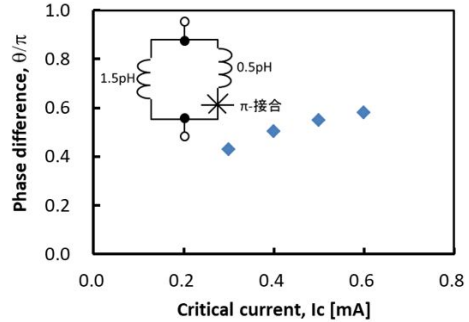


図 1.  $-1$  接合 SQUID の位相差特性

$0-1$  接合 SQUID においても、上記  $1$  接合 SQUID と同様にループインダクタンス  $2.0 \text{ pH}$  の条件下で、各接合の枝路のインダクタンスを変化させたときの素子の位相差を見積もった。その結果、 $-1$  接合を含む枝路のインダクタンスの増加に伴い、線形に位相が減少する傾向がみられ、 $0 \text{ pH}$  の時  $0.7$ 、 $2.0 \text{ pH}$  の時  $0.3$  程度となった。次に、 $-1$  接合の枝路  $0.5 \text{ pH}$ 、他方を  $1.5 \text{ pH}$  として、 $0$  接合の臨界電流  $0.3 \text{ mA}$  下での  $-1$  接合の臨界電流を変化させたときの効果を調べた。その結果、図 2 に示すように、 $0$  接合の臨界電流値を超える場合において、位相差  $0.6$  以上となり、臨界電流依存性が緩やかとなった。一方、 $0$  接合臨界電流値より小さくなると、位相差が急激に減少した。また、 $0$  接合臨界電流値を変化させたときも評価し、位相差  $1/2$  以上の PSE として機能することが分かった。バイアス電流を加えたときの素子のスイッチング特性も評価し、回路パラメータにより位相差のジャンプが変化することが分かった。

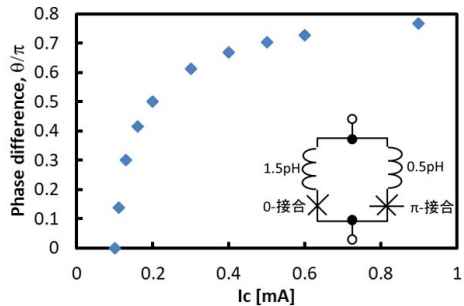


図 2.  $0-1$  接合 SQUID の位相差特性

次に、任意位相差素子を SFQ 回路に導入することを検討した。ここでは、超低消費電力性が特徴の断熱型量子化磁束パラメトロン (QFP) 回路 [5] に着目し、まずは回路シミュレータ付属の PSE を用いて、回路特性を評価した。その結果、PSE の効果として、励起電流の低減が確認された。実際、 $0.6$  弱の PSE を挿入することにより、励起電流の大きさを  $1/5$  程度にできることを確認した。これは、磁性体 PSE を用いた時 [6] と同程度であり、有効なものと思われる。次に、任意位相差素子の  $-1$  接合 SQUID を用い、回路動作を評価した。その結果、任意位相差素子を回路内に挿入したのみでは、回路の正常動作は確認できなかった。これは、素子で発生する位相差の極性が制御されていないことに起因することが分かった。そこで、極性の制御を行うことにより、PSE 素子を用いた時と同じ結果が得られた。これらのことから、任意位相差素子あるいは PSE 素子を用いることにおいて、その位相差のみでなく、その極性制御が必須となるという重要な知見が得られた。

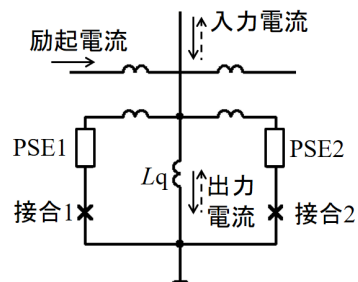


図 3. QFP 回路への応用

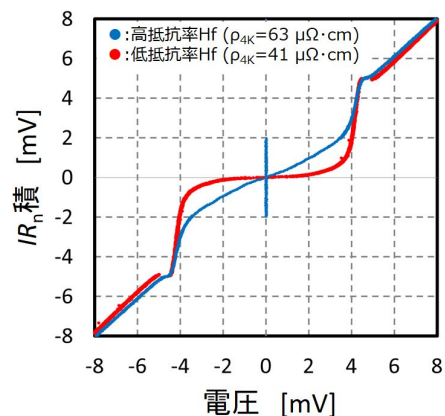


図 4. 単独接合の電氣的特性 (@4.2K)

##### (2) 窒化物超伝導体による超伝導接合技術の検討

NbTiN/Hf-HfO<sub>x</sub>/NbTiN 接合の作製に際して、成膜

法としてスパッタリング法を用い、同一真空中で三層膜を形成した後、接合に加工した。特性を 4.2K で評価した結果、良好な接合特性を得ることに成功した。また、良好な接合特性を得るには、障壁層となる Hf の膜質が重要となることが分かった。実際、抵抗率の違う 2 種類の Hf 膜を用意した結果、図 4 に示すように、抵抗率の低い Hf 薄膜を用いた方がよいことが分かった。また、接合特性の Hf 膜厚依存性をはじめ、集積回路応用で重要となる接合特性均一性を評価した。均一性に関しては、磁束トラップ等によると思われる接合臨界電流の抑制がランダムに見られ必ずしも十分とは言えないが、今後の研究に期待したいと思う。また、HfO<sub>x</sub> トンネル障壁の接合容量を評価した。その結果、従来の AlN や MgO トンネル障壁に比べ、約 1.5-2 倍程度の値を持つことがわかった。この結果から、大きな接合容量やアンダーダンプ特性の接合が適した応用[6]には、本接合が重要なものとなる可能性が示唆された。

#### <引用文献>

- K.K Likharev et al., IEEE Trans. on Appl. Supercond., vol. 1, pp.3, 1991
- S. Taniguchi et al., Journal of Applied Physics, Vol. 54, pp. 043101, 2015
- H. Ito et al., Applied Physics Express, vol. 10, no. 3, pp. 033101, 2017.
- A. V. Ustinov et al., J. Appl. Phys., vol. 94, no. 8, pp. 5405–5407, Oct. 2003.
- N. Takeuchi et al., Supercond. Sci. Technol., vol. 26, pp. 035010, 2013.
- 岩下颯斗他, 信学技報, SCE2017-11.
- N. Takeuchi et al., Supercond. Sci. Technol., vol. 28, pp. 015003, 2015.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 2件 / うち国際共著 1件 / うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 H. Akaike, K. Munemoto, Y. Sakakibara, A. Fujimaki	4. 巻 29
2. 論文標題 Fabrication of NbTiN Josephson junctions with thermally oxidized Hf tunnel barriers	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 IEEE Trans. on Appl. Supercond.	6. 最初と最後の頁 1102605
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/TASC.2019.2906278	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 赤池 宏之	4. 巻 55
2. 論文標題 ジョセフソン 接合を用いた超伝導位相シフトとその回路応用	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 大同大学紀要	6. 最初と最後の頁 1-6
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 K. D. Pomorski, H. Akaike, A. Fujimaki, K. Rusek	4. 巻 38
2. 論文標題 Relaxation method in description of RAM memory cell in RSFQ computer	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 COMPEL - The international journal for computation and mathematics in electrical and electronic engineering	6. 最初と最後の頁 395-414
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1108/COMPEL-06-2017-0242	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

〔学会発表〕 計2件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 赤池 宏之、藤巻 朗
2. 発表標題 位相シフトとして 接合rf-SQUIDを用いた量子化磁束パラメトロン
3. 学会等名 第67回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 H. Akaike, K. Munemoto, Y. Sakakibara, A. Fujimaki
2. 発表標題 Fabrication of NbTiN Josephson junctions with thermally oxidized Hf tunnel barriers
3. 学会等名 2018 Applied Superconductivity Conference (国際学会)
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関