

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成24年 6月 1日現在

機関番号：12612

研究種目：基盤研究（B）

研究期間：2009～2011

課題番号：21360040

研究課題名（和文） 量子電流標準に向けた高精度電流整数倍器の研究

研究課題名（英文） Study on a high-precision current multiplier applicable to the quantum current standard

研究代表者

島田 宏 (SHIMADA HIROSHI)

電気通信大学・情報理工学研究科・准教授

研究者番号：60216067

研究成果の概要（和文）：量子電流ミラー効果を原理とし Al/Al₂O₃/Al からなる微小 Josephson 接合の1次元配列を用いた微小電流の10倍器を試作し、10倍器動作を得た。ただし、その増倍精度は必ずしも高くは無く、その改善のために接合列間を強結合化した素子の作製プロセスを確立し、強結合化し精度向上が期待できる微小電流10倍器を試作した。一方、強結合化した量子電流ミラー素子の特性評価を行い、結合容量と電流転写精度との定量的な関係を見出した。さらに、強結合ミラー素子では、従来見出されていなかった誘引先接合列0バイアスでの電流誘引を見出し、その極性が磁場を印加することで伝導担体が Cooper 対から準粒子（あるいは電子）に変わると同極性から逆極性に変化するという新奇現象を見出した。

研究成果の概要（英文）：A small-current 10-time multiplier using one-dimensional arrays of small Al/Al₂O₃/Al Josephson junctions and based on the quantum-current-mirror effect have been fabricated and tested. It showed the expected 10-time current multiplication function. The accuracy of the multiplication, however, was not good. It was most likely due to the small coupling capacitance. In order to substantially improve the accuracy, a fabrication process of a large coupling capacitance between the arrays has been successfully installed. A 10-time current multiplier with strong coupling has been fabricated using the process. A strongly coupled quantum-current-mirror devices were also fabricated and tested, and the quantitative relationship between the strength of the coupling and accuracy of the current duplication has been obtained. In such devices current induction with 0 bias voltage on the secondary array has been observed for the first time. Moreover, novel reversal of the induced current was observed: the direction of the induced current was the same as the primary current (input current) while applied magnetic field was small and Cooper-pair tunneling was dominant, and it changed to the opposite direction when applied magnetic field was large and quasiparticle (or electron) tunneling was dominant.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
平成21年度	6,900,000	2,070,000	8,970,000
平成22年度	5,500,000	1,650,000	7,150,000
平成23年度	2,000,000	600,000	2,600,000
年度			
年度			
総計	14,400,000	4,320,000	18,720,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：応用物理学・工学基礎；応用物理学一般

キーワード：量子電流標準、微小ジョセフソン接合列

1. 研究開始当初の背景

電気量の計量標準のうち周波数が現在最も高い精度を実現している（不確かさ 10^{-14} ～ 10^{-15} ）。そこで、1980年代末から研究が盛んになった単一電子トンネリング現象とそれを基礎とした単一電子素子の分野では、その当初から、高精度の固定周波数 f の印加電圧に同期して電子を1個ずつ運び、 $I = ef$ の直流電流を発生させる電流標準器を作ることが1つの目標になった。実際、米国国家標準局（NIST）では、単一電子ポンプで 10^{-8} 程度の不確かさをもつ 0.5pA 程度までの電流の発生に成功している。しかし同時に、電流値をそれ以上大きくすると、原理的に精度が急速に低下することも示された（Appl. Phys. Lett. **69** (1996)1804）。0.5pA という電流値は、実用にも、また周波数、電圧、電流間のいわゆる量子トライアングルの検証実験にも小さすぎる。そこで、実用的な標準電流を作る1つの方途として、この高精度電流を、精度を保ったまま増幅する高精度電流増倍器を開発することが考えられた。

2. 研究の目的

本研究では、研究代表者が見出したメゾスコピックな大きさの Josephson 接合の配列間に起こる精度の高い電流転写現象（量子電流ミラー効果）を応用し、このような Josephson 接合の配列を基本構成要素とし、単一 Cooper 対トンネリングに基づく、独自の計量学的な精度をもつ微小電流の整数倍器を実現することを目的とした。

3. 研究の方法

本研究では、電流の転写・増倍精度の検証の為に極低温電流比較器システムの構築、微小電流整数倍器の設計・動作実証、より大きな電流転写領域を得るために大きな超伝導ギャップをもつ超伝導材料の導入とそのため真空成膜装置の構築を柱として研究を行った。

初年度～第2年度で3000:3000の巻き数をもつ極低温電流比較器を、産業技術総合研究所の協力を得て作製し、SQUID システムを導入して、設計値 $1\text{fA}/\text{Hz}^{1/2}$ の差異電流感度の電流比較システムを準備した。また、同じ時期に大きな超伝導ギャップをもつ超伝導材料として、当初予定した Nb に代わりより使いやすい V 薄膜を作製するための電子ビーム蒸着装置を導入し、試料室が独立した効率のよい成膜装置を整備した。

しかし、初期に作製した Al 製の微小電流

整数倍器の電流増倍精度が非常に低く、接合列間を強く結合した素子の作製が必須となり、研究の方向が強結合素子の作製・評価にシフトした。その分研究進捗が予定より遅れることとなった。強結合型の素子を作製するために、Al 薄膜表面を厚くプラズマ酸化するための加温プラズマ酸化装置を作製した。

素子作製は、電気通信大学の研究設備センター先端研究設備部門のクリーンルーム、フォトリソグラフィ装置、電子線リソグラフィ装置、および電界放射型の走査電子顕微鏡を主として用いて行った。また、素子の特性評価には、信号ラインに適切なノイズフィルタを施した最低温度 80mK の簡易型の希釈冷凍機を用いた。

4. 研究成果

(1) Al 製の微小電流の整数倍器

量子電流ミラー効果、微小電流2倍器の直接の発展として、微小電流の10倍器の設計・作製を行った。従来、接合には dc-SQUID 型の並列2接合を用いており、また、接合間の電極には結合用に対向接合列に向かう突起状電極を付けていた。しかし、微小 Josephson 接合の単純な1次元配列においても電流転写現象がほぼ遜色なく実現することを見出し、素子作製上の歩留まりを考慮して、2次側（出力側）接合列として単純な接合配列5本2組を1次側（入力側）の1本の接合列の両側に配置した素子を作製した（図1）。5本ずつ2組の接合列は外部回路にて並列接続され、入力電流が各接合列に転写された場合には、外部回路に入力電流の10倍の電流取り出されることになる。

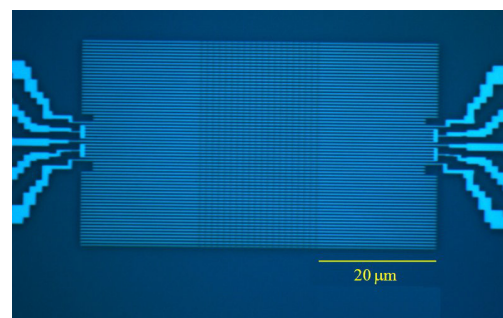


図1. Al製の微小電流10倍器。微小 Josephson 接合20個からなる配列が11本並んでいる。中央で左右に配線が施されている部分が素子（中央左右それぞれ3本の配線が10倍器につながっている）。11本の中央が入力用の1次接合列。その上下に5本ずつ束になった出力用の2次接合列が配されている。

希釈冷凍温度での測定の結果、この素子は、各接合列のいわゆる Coulomb 閉塞の閾電圧付近の設定電圧を各接合列に印加した場合には、入力電流に対しておよそ 10 倍を示す出力電流を得ることが明らかになった (図 2)。つまり、原理的に微小電流の整数倍器が当初見込んだ方式で実現できることが示された。(この結果は、2011 年、超伝導 100 周年国際会議にて発表。)

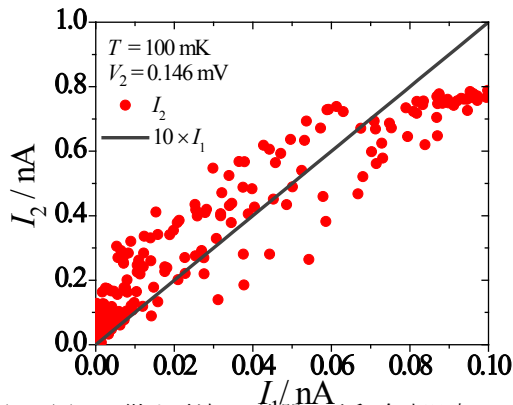


図 2. 図 1 の微小電流 10 倍器の希釈冷凍温度での測定例。横軸 I_1 が入力電流、縦軸 I_2 が出力電流。実線は、理想的な 10 倍器動作を示す直線。

また、この方式での電流の増幅限界を調べるために、入力接合列の片側に 10 本 1 組の接合列を配した素子を作製し (図 3)、電流の増倍率を測定した。

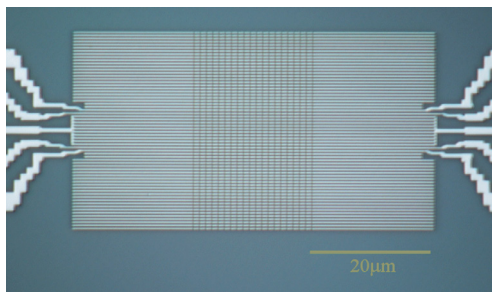


図 3. 中央に束ねられた 10 本の接合列が並び、その上下に単独の接合列が並ぶ素子。単独の接合列を 1 次配列とし、そこに流す電流の増倍率を測定した。

その結果、最大増幅率は 7 倍との結果が得られ、この方式の単純な拡張では、入力接合列の両側に 7 本ずつの接合列を配することにより最大 14 倍までの増幅が得られるだろうとの結論を得た。

電流整数倍器の基本原則としては、以上の結果は有用であったが、図 2 の結果は、電流の増倍精度がきわめて悪いことを示している (増倍誤差の標準偏差 120 pA)。電流の転写あるいは整数倍の精度の向上が計量学的

な応用には必須であり、当初予定した極低温電流比較器による電流の計量学的な比較を行うにも、電流の転写精度の点でより有用性が期待される素子を見出す必要があった。図 1 の素子が従来の転写誤差 1% 以下のミラー素子等と異なるのは、接合列間の結合容量を意図的に作製していない点であり、結合容量 C_c 、接合容量 C として、 $C_c/C \approx 0.01$ と従来の 1/10 程度になっていた点であった。そこで、予定を変更し、これまで作製されていない強結合型の電流ミラー素子 ($C_c/C > 1$) を作製し、その電流転写特性の検証を行った。

(2) 強結合型の量子電流ミラー素子

プラズマ酸化により表面を強く酸化した Al 板を接合間電極の数だけ用意し、図 4 のようにその上に接合間電極に張り出しを設けた微小 Josephson 接合列を 2 本形成する。これによって、2 本の接合列の向かい合う電極同士を Al/Al₂O₃/Al からなる平行平板コンデンサ 2 個の直列接続で結合した。このような素子で C_c の値がおよそ 1~3 fF の間の素子を複数個作製した。

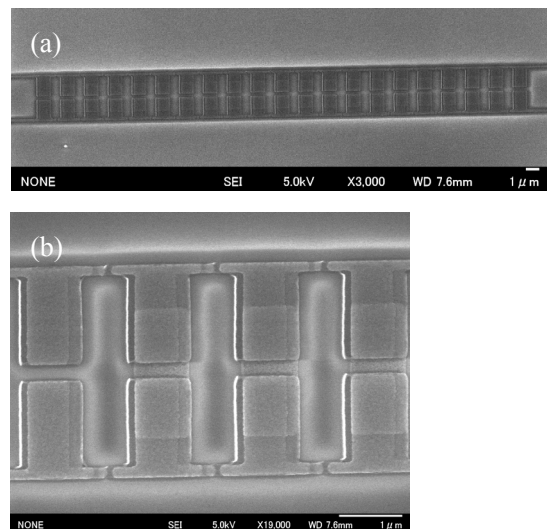


図 4. 強結合型の量子電流ミラー素子。(a) 全体図、(b) 拡大図。接合間電極が中央に伸びた下に、表面をプラズマ酸化し厚い酸化膜を形成した Al 板が敷かれ、各電極と平行平板コンデンサが形成されている。向かい合う電極間は 2 個の平行平板コンデンサで結合されている。直列 2 個の結合容量の大きさは 1~3 fF。接合容量はおよそ 1 fF。

それらの素子について、電流の転写精度を電流値の差異の標準偏差 σ によって評価した。その結果が図 5 であり、明らかに結合容量の増加と共に σ が減少することが見出された。なお、図 5 の測定結果は、計測器の系統誤差を含むものであり、電流転写現象そのものの σ 値はより小さいものと期待できる。そこで、電流整数倍器の作製指針として、結合容量を

増加し強結合化を図ることとした。

さらに、後述するように、この強結合型の電流ミラー素子では、電流転写あるいは誘引現象に関して、これまで見出されていない新奇現象を発見するに至った。

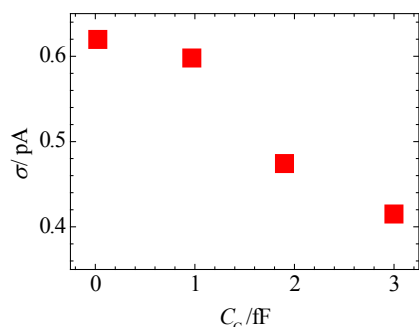


図5. 接合列間の結合容量と電流の転写ずれの標準偏差の関係。結合容量が大きくなるとずれの標準偏差が小さくなる。なお、電流の転写ずれには、測定器の系統誤差が含まれている。

(3) 強結合型の電流整数倍器

強結合型の電流ミラー素子についての研究結果を受けて、強結合型の微小電流の整数倍器を設計・作製した。素子作製の容易さを鑑みて、結合容量は、プラズマ酸化により表面に厚い酸化膜を作製した Al 板を接合列をまたいで 11 個の向かい合う接合間電極の下に敷き、接合間電極の形状は単純なものとした。100mK 程度の低温で帯電効果が十分に働きかつ電流増倍動作をするよう電極形状の微調整、個々の接合のトンネル抵抗値の調整等を経て、作製した素子例を図6に示す。現時点で最終的な動作確認までに至っていないが、高い電流増倍精度での電流の 10 倍器動作が期待できる。

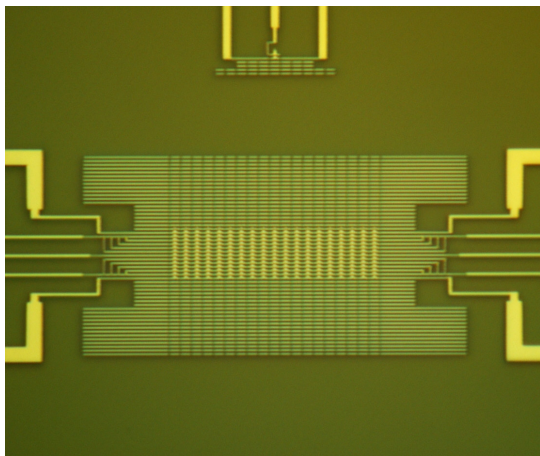


図6. 強結合型の微小電流 10 倍器の試作例。上に見えるのは、結合容量評価用の単一電子トランジスタ。

(4) 高転移温度の超伝導金属の導入

これまでの研究で、電流ミラー効果で電流転写が可能な電流の大きさには素子固有の最大値があり、それは各接合の Josephson 結合エネルギー E_J に非線形に強く依存していることを見出している (図7)。したがって、電流の転写領域を拡大するためには各接合の E_J を大きくすればよい。 E_J は、超伝導ギャップの大きさ Δ と接合のトンネル抵抗 R_T について、 $E_J \propto \Delta/R_T$ という依存性を持つ。Al 製の素子については、電流転写現象が起きうる範囲の R_T でほぼ最小値までの素子が実現している。さらに転写電流域を拡大するには、電極材料に、より Δ の大きな材料を用いる必要がある。

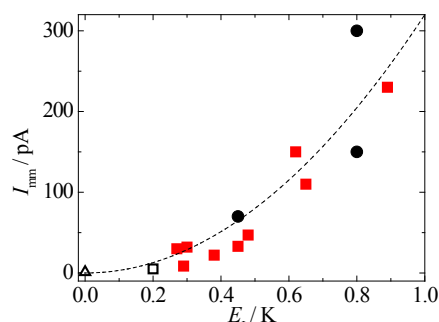


図7. Al/Al₂O₃/Al 接合からなる量子電流ミラー素子における Josephson 結合エネルギー E_J と最大転写電流 I_{mn} の関係。

当初、バルクの超伝導転移温度が 9.50K で $\Delta=3.05\text{meV}$ の Nb をそのような材料の候補として導入することを考えたが、まずより扱いやすくバルクの転移温度 5.38K で $\Delta=1.6\text{meV}$ と Al の約 5 倍である V を導入することに変更した。

Mo 製のハースナイラーを用いた電子ビーム蒸着によると、線幅 100nm 程度の細線にしても V の転移温度として 5K 程度のものが得られることが分かった。そして、接合としてベース電極に Al を用いその酸化膜をトンネル障壁とした Al/Al₂O₃/V で電流ミラー素子を作製し、その特性評価を続行中である。

(5) 強結合型の電流ミラー素子における新奇現象

量子電流ミラー効果では、2 本の接合列それぞれに適切なバイアス電圧を印加してはじめて電流の転写現象が発生する。本研究で作製した強結合型の電流ミラー素子においては、一方の接合列のバイアス電圧を 0 μV に固定した場合にも他方の接合列の電流によって、この接合列に電流を誘引できることが明らかになった。このような現象は、常伝導の微小トンネル接合列では見出されていたが、電極が超伝導の微小 Josephson 接合列に関してははじめて見出されたことであった。

さらに、その誘引電流の極性は誘引元の電流と同極性であり、磁場を印加することによって、その極性が逆極性へと転換することも見出された (図 8)。

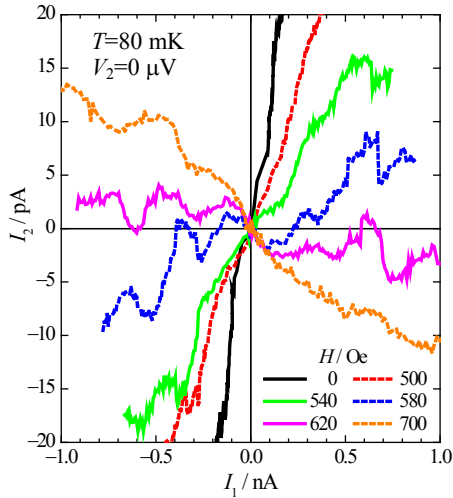


図 8. 強結合型電流ミラー素子における誘引先 0 バイアスでの誘引電流 I_2 の 1 次電流 I_1 に対する依存性。印加磁場がパラメータとなっている。この磁場範囲で誘起電流の方向反転が起こる。

図 9 (a) は、電流誘引係数の磁場依存性を表す。およそ 500 Oe から 700 Oe にかけて誘引電流の極性が反転していくのが明瞭にわかる。一方図 9 (b) は単一の接合列の電流電圧特性にみられる有意の電流の発生する閾電圧の磁場依存性である。この依存性は、伝導担体の素性を反映するものとして、従来から知られている。およそ 500 Oe 以下では超伝導の Cooper 対がトンネル伝導を担い、600 Oe 以上では準粒子 (あるいは電子) がトンネル伝導を担うことが示される。したがって、図 9 (a) の誘引電流の極性変化は Cooper 対間では同方向の電流誘引が起こるのに対し、人粒子あるいは電子間では逆方向の誘引電流が起こることを示している。

準粒子あるいは電子による逆方向の電流誘引については、1990 年代に研究がなされ、電子・正孔対のトンネル伝導を基本的な機構として理解されている。本研究での結果もそれに基づき、有限温度の効果、電流による電極電子系の実効温度の上昇、電荷揺らぎの効果を検討して理解できる。

一方、Cooper 対による同方向の電流誘引については、これまでのこのような現象を示唆する理論・実験いずれの研究もなく、全く新奇なものである。

(なお、この結果については、2011 年、第 26 回低温物理学国際会議にて発表し、論文誌に投稿中である。)

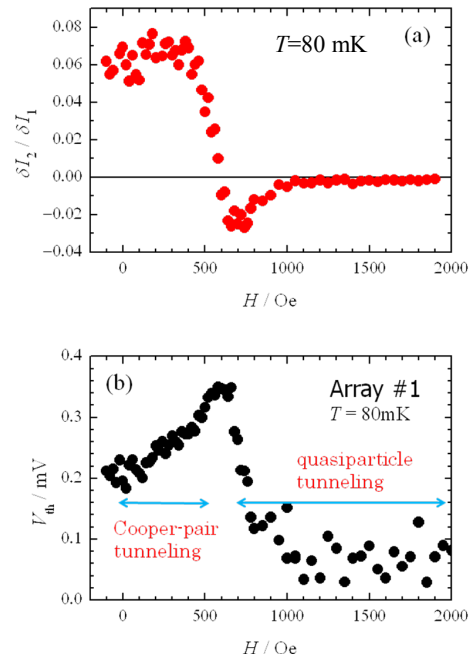


図 9. (a) 強結合型電流ミラー素子における電流誘引係数の磁場依存性。(b) 1 本の接合列の電流電圧特性における閾電圧の磁場依存性。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[学会発表] (計 5 件)

1. 石田千尋、水柿義直、島田宏、微小ジョセフソン接合列間の電流誘引現象 (日本物理学会第 67 回年次大会、2012.3、関西学院大学、西宮)
2. Srinivas Gandrothula、水柿義直、島田宏、Current steps in a mesoscopic Josephson junction embedded in a Josephson-junction network (第 59 回応用物理学関係連合講演会、2012.3、早稲田大学、東京)
3. Srinivas Gandrothula、Yoshinao Mizugaki、Hiroshi Shimada: The Quantum Current Mirror Based 10-Time Current Multiplier (Superconductivity Centennial Conference 2011, 2011.9, The Hague, the Netherlands)
4. Hiroshi Shimada、Chihiro Ishida、Yoshinao Mizugaki: Current Induction in Strongly Coupled Arrays of Small Josephson Junctions (The 26th International Conference on Low Temperature Physics, 2011.8, Beijing China)
5. Srinivas Gandrothula、水柿義直、島田宏、10-time current multiplier based on the Quantum Current Mirror (第 58 回応用物理学関係連合講演会、2011.3、神奈川工科大学、厚木)

〔その他〕

本研究に関連した修士論文

[電気通信大学大学院 情報理工学研究科
先進理工学専攻]

(平成 21 年度)

石田千尋、強く容量結合した微小 Josephson
接合列における電流誘引現象の研究

6. 研究組織

(1) 研究代表者

島田 宏 (SHIMADA HIROSHI)

電気通信大学・情報理工学研究科・准教授

研究者番号：6 0 2 1 6 0 6 7

(2) 研究分担者

水柿義直 (MIZUGAKI YOSHINAO)

電気通信大学・情報理工学研究科・教授

研究者番号：3 0 2 8 0 8 8 7