

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 8 日現在

機関番号：12612
 研究種目：基盤研究(B)
 研究期間：2012～2014
 課題番号：24340067
 研究課題名(和文) 微小ジョセフソン接合システムにおけるクーパー対トンネリングの非局所相関の研究

 研究課題名(英文) Study of nonlocal correlation of Cooper-pair tunnelings in systems of small Josephson junctions

 研究代表者
 島田 宏 (Shimada, Hiroshi)

 電気通信大学・情報理工学(系)研究科・准教授

 研究者番号：60216067

 交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,200,000円

研究成果の概要(和文)：微小Josephson接合の1次元接合列では、100 kHz-170 GHzの周波数帯の高周波の照射によってCoulomb閉塞が弱まりコンダクタンスが誘引されること、また、接合列間には電流の非局所的な長距離相関が観測されるが、これは、この高周波応答に基づき、一方の接合列の電流がその大きさの1/2乗に比例する交流電圧を他方の接合列に発生させることを仮定すると定量的に説明できることを実験的に示した。また、環境インピーダンス制御した接合列でBloch振動が明瞭に観測できること、環境インピーダンス内のCooper対のトンネル過程が非局所的な相互作用によって接合列に定電流構造をもたらすことを示した。

研究成果の概要(英文)：We have experimentally shown that application of high-frequency radiation in a range 100 kHz-170 GHz to an array of small Josephson junctions weakens its Coulomb blockade of Cooper-pair tunneling and induces conductance in the array. There exists a correlation between currents in two arrays of small Josephson junctions separated by a distance of the order of 10 μm . We have demonstrated that this can be understood quantitatively if we assume that a current in one array induces an ac voltage in the other array the magnitude of which is proportional to the square root of the current in the first. We have also investigated I-V characteristics of an array of small junctions connected to SQUID arrays which serve as its environmental impedance. We showed a clear Bloch oscillation when the environmental impedance was large as well as current plateaus superposed. The latter has turned out due to a kind of nonlocal interaction of the tunnelings in the SQUID arrays and those in the junction array.

研究分野：低温物性

キーワード：微小ジョセフソン接合 電流ドラッグ 電流ミラー 非局所相関 ブロッチ振動 JQPサイクル

1. 研究開始当初の背景

微小 Josephson 接合の 1 次元配列間で生じる直流電流の転写現象 (量子電流ミラー効果)¹⁾ を調べる中で、研究代表者は、2 本の配列中の電流相関が 10 μm 以上の距離に亘る非局所的な性質を持つことに気づいた (図 1)。これは、1 次元微小 Josephson 接合列で電流の生じるクーロン閉塞の閾電圧近辺で、Cooper 対トンネリングと電磁場との結合があり、電磁波を介した電流の相関が発生するのだろうと予測した。このような微小 Josephson 接合系と電磁場との結合効果は、これまでほとんど認識されていないが、大きな Josephson 接合の交流 Josephson 効果に双対な効果として位置づけられることが予想できた。そこで、この効果を十分に明らかにすることが、基礎科学の観点および、その応用可能性の観点から重要であると考えられた。

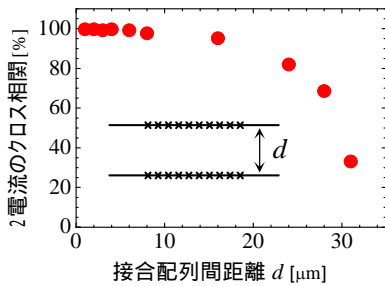


図 1 . 2 本の 1 次元微小 Josephson 接合列中の電流のクロス相関の接合列間距離依存性

2. 研究の目的

本研究では、接合 1 次元配列を初めとする微小 Josephson 接合システムにおける Cooper 対トンネリングと電磁場との相互作用の基礎過程を明らかにすることを主たる目的として行った。

3. 研究の方法

Al/AIO_x/Al 接合からなる微小 Josephson 接合配列の電磁波照射に伴う直流応答の変化を調べた。このために、希釈冷凍機に高周波ラインを導入し、40 mK 程度の温度で試料に 30 kHz ~ 3 GHz の高周波を照射する測定系を構築した。より高い周波数領域の調査 (~ 170 GHz) には、大きな Josephson 接合を隣接配置してその交流 Josephson 効果を利用した。また、微小 Josephson 接合列間の長距離電流誘引現象を幅広いパラメータについて調べ、その特徴を抽出した。その際、接合の Josephson 結合エネルギーを増大させる目的で電極材料に V を導入した。長距離電流誘引については、「高周波電磁波を媒介した位相拡散によるコンダクタンス誘引」をその機構として定量的にモデル化した。

研究目的の発展として取り組んだ素子の電流電圧特性に現れる定電流構造については、環境インピーダンスを制御した微小 Josephson 接合列について行った。定電流構造

の発生機構を探るために、最小システムとして接合の大きさの異なる二重接合の中央電極に SQUID 列リードを付加した素子も作製し、その直流特性を調べた。

4. 研究成果

(1) 接合列間の長距離コンダクタンス誘引

2 本の微小 Josephson 接合列中のトンネル電流の長距離誘引については、包括的な特性評価を行い、次のような結果を得た。10 μm オーダーで離れた 2 本の微小 Josephson 接合列では、一方の接合列 (2 次接合列) の Coulomb 閉塞電圧は、他方の接合列 (1 次接合列) の電流値の 1/2 乗に依存して小さくなる [図 2(a)]。また、微小 Josephson 接合列が印加マイクロ波の振幅に比例して Coulomb 閉塞電圧が減少するという Liou らの研究結果²⁾ に基づいて、1 次接合列の電流は、その大きさの 1/2 乗に比例する交流電圧を 2 次接合列にもたらすというモデルを指摘した [図 2(b)]。その比例係数 (誘引係数) を γ とする。実験結果は、接合列の単位接合として dc-SQUID 構造を用いた場合の実験結果であり、 f 値は SQUID への磁束フィリング因子である。図 3(a) は、 γ が $f = 0.5$ に向かって増大すること、すなわち、接合の、位相ではなく電荷支配が強くなるほど、接合列間の相互作用が強くなることを示している。また、誘引係数 γ は、距離と共に $d \leq 30 \mu\text{m}$ では、 d^{-1} に依存して、またそれ以上では $d^{-0.5}$ に依存して減少するという結果を得ている。これらの結果の一部は台湾国立中興大学グループとの共同研究として行った。

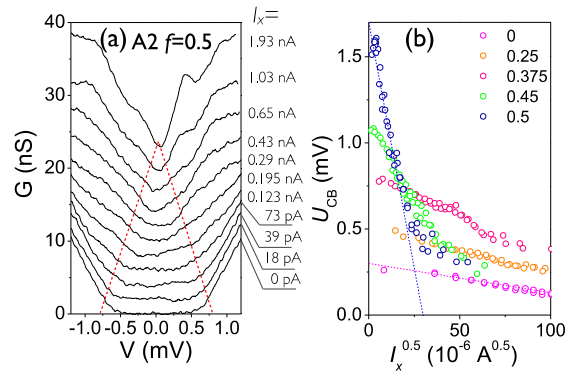


図 2 . 1 次接合列の電流 I_x による 2 次接合列のクーロン閉塞領域の減少 . (a) 微分コンダクタンス特性, (b) 閉塞領域 U_{CB} の I_x 依存性

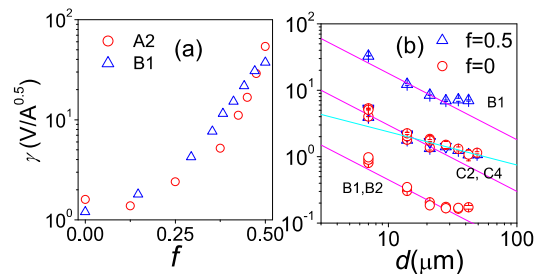


図 3 . 誘引係数の (a) 磁束フィリング因子 f 依存性, (b) 接合列間距離 d 依存性

(2) 接合列のマイクロ波応答

微小 Josephson 接合の 1 次元配列 (20 接合) について希釈冷凍温度での高周波応答を調査した。これは、接合列中の電流間の非局所相関が電磁波を介して起こると考えた場合、何らかの高周波帯域で接合列が特性変化をすることが予想されたからである。希釈冷凍機に高周波ラインを組み込み、バイアス T を介して高周波を印加しつつ直流特性の測定を行った。照射周波数 30 kHz ~ 3 GHz で照射パワー P を変えて、接合列の直流 I - V 特性の変化を調べた。図 4 は、その結果をまとめたものである。 I - V 特性のゼロバイアス・コンダクタンスの周波数特性を -75 dBm ~ -55 dBm の入射パワーについてプロットしてある。およそ 300 kHz に鋭い閾周波数があり、それ以上の周波数で、 $P \geq -65$ dBm ではおよそ一定のコンダクタンスを示す。一方 $P \leq -60$ dBm では 350 kHz および 1 GHz のみに強い応答が見られる。

本研究の研究期間中に、同様の研究結果が台湾中興大学グループから発表された²⁾。彼らは、coplanar 導波路の電場中に接合列を置き、マイクロ波照射に伴う I - V 特性の変化を 10 MHz ~ 20 GHz までの広い周波数範囲で調べている。彼らの結果は、周波数 10 MHz 以上の本研究の結果と定性的に一致しており、接合列のマイクロ波感受性は、彼らの解釈に従えば、接合の位相拡散による効果とみなせる可能性がある。

しかし、本研究ではじめて見出したより低周波領域にある閾周波数の存在は、単純な位相拡散では説明できない。より進んだ解釈を必要としており、さらなる研究が必要である。

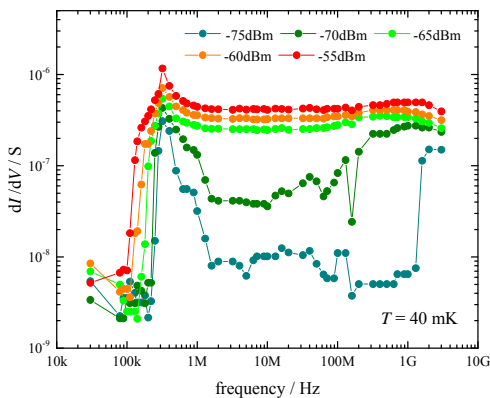


図 4 . 微小 Josephson 接合列のゼロバイアス・コンダクタンスの照射高周波の周波数依存性

大きな Josephson 接合からの放射による電流誘引現象

オン・チップのマイクロ波源として [図 5 (a) 挿入図]、大きな Josephson 接合の交流 Josephson 効果を利用し、マイクロ波照射実験を 0 ~ 170 GHz の範囲で行った。接合列への固定電圧バイアス条件下での電流誘引特性

を調べた。図 5 (a) がその結果であり、単一の大きな Josephson 接合の電流によっても接合列に電流誘引が起こるが、同図 (b) に示すように、直流 Josephson 効果による電流では接合列には電流を誘引しないことも明らかになった。単一接合に電圧が発生し、交流 Josephson 効果が起こってはじめて電流誘引が起こる。特に図に「ac Josephson」と示した領域で見取れるように、この領域では、10 ~ 20 pA の電流がバイアス電圧すなわち発生周波数にあまり依存せずに誘引されている。このことは、(2) で述べたマイクロ波によるコンダクタンス誘引が、170 GHz までおよそ強い周波数特性を持たずに続くことを示している。

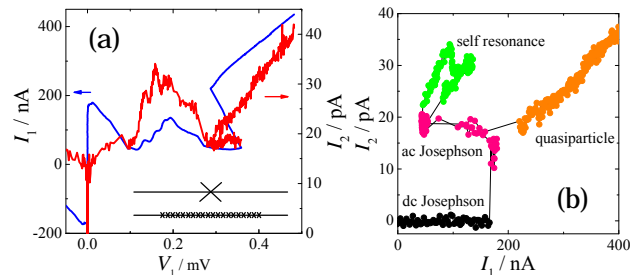


図 5 . 大きな Josephson 接合の交流 Josephson 効果による接合列への電流誘引 . (a) 大きな接合の電流電圧特性 I_1 - V_1 と接合列への誘引電流 I_2 , (b) 大きな接合の電流 I_1 と誘引電流 I_2 の関係

(3) 微小 Josephson 接合列における Bloch 振動

本研究の開始当初、接合列で発生する高周波が隣接単一 Josephson 接合に定電流構造をもたらすという予備的な結果を得ていた。しかし、その後の研究でこれは環境インピーダンスの制御に用いていた SQUID 列リードによってもたらされることが明らかになった。

定電流構造を追求する場合、単一接合では構造の電圧幅が小さくなることが予想され、必ずしも有利ではない。そこで、SQUID 列リードのついた微小 Josephson 接合列の電流電圧特性について、定電流構造の特性を調べることを行った。

その過程で接合列における擬電荷空間での Bloch 振動を明瞭に観測することに成功した。図 6 がその結果であり、SQUID 列の磁束フィリング因子を 0.5 に近づけると接合列が急峻な負微分抵抗を示すようになった。観測された負微分抵抗値および閉塞電圧幅の最大値は、 -14.3 M Ω と 0.39 mV であり、これらは単一接合で観測された値³⁾ のそれぞれ約 30 倍および約 10 倍であり、制御した定電流構造を発生するのに好適な舞台であることが明らかになった。また、この Bloch 振動特性を電荷ソリトン・モデルに基づいて明らかにした。

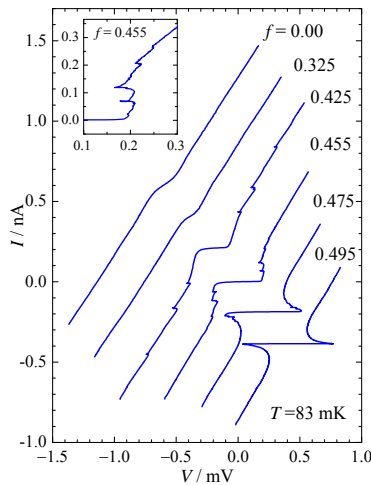


図6 . 環境インピーダンスを制御した微小 Josephson 接合列の IV 特性の変化, 挿入図は $f = 0.455$ における定電流構造の拡大図

図6の結果には、予備的な単一接合についての実験で観測していたと同様の定電流構造が $0.41 \leq f \leq 0.485$ の範囲で観測された。これは、詳しい解析の結果、環境インピーダンスを制御している SQUID 列の IV 特性の電流ピークに付随して発生することが明らかになった。これは、SQUID 列での Cooper 対トンネル過程と接合列での Bloch トンネル過程との間の一種の相互作用と考えられた。

異なる接合のトンネル過程間の相互作用

上に述べた定電流構造の発生機構（あるいは異なる回路要素内でのトンネル過程間の相互作用）を調べるために、この系と同様の最小系として、大きさの異なる2重接合の中央電極に SQUID 列リードが付加された素子 [図7(a)] について、この現象を調べた。大きな接合で Cooper 対トンネルが起こり、小さな接合でこれとは別種の準粒子トンネルが起こる過程について相互作用を調べた。これは、従来 Josephson 準粒子 (JQP) サイクルとして知られているトンネル過程について、それぞれの接合のトンネル伝導を分離して観測することに相当する。結果として、これまで認識されていないトンネル過程間の相互作用を見出した。

これは、一方の接合で Cooper 対の共鳴トンネルが起こり [図7(b)]、引き続いて他方の接合で準粒子トンネルが発生する際に、Cooper 対から帯電エネルギー程度のエネルギーが一種の回路内光子として放出され、他方の接合の準粒子トンネルの閾電圧が低下する [図7(c)] という現象である。このような内部相互作用は、複数の微小接合からなる素子で普遍的に起こり得る現象であろうと推察される。(1), (2)で述べたのとは別種の、素子内あるいは回路内でのトンネル過程間の非局所的な相互作用になっている。

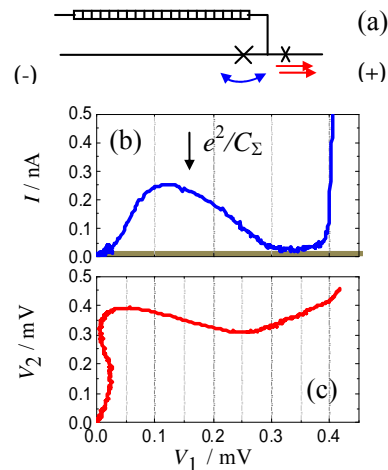


図7 .(a)素子の概念図,(b) JQP 大きな過程における接合の電流電圧特性,(c) 大きな接合で Cooper 対電流が流れる際の小さな接合の準粒子トンネル閾電圧からの電圧低下

(4)V 電極を用いた素子の特殊性

電流の非局所相関の特徴を調べる際に、接合の Josephson 結合エネルギーを増大させる目的で超伝導転移温度の高い V を電極材料に導入し、Al/AlOx/V 接合からなる諸素子を作製した。ところが、この接合は V 電極の超伝導ギャップ内に準粒子状態密度が存在するという特殊性を持つことが明らかになった。このため、低バイアス時にも Cooper 対トンネルと準粒子トンネルが容易に併存し、この接合を単一電荷素子に用いた場合には、特性にこの特殊性を反映した特徴が現れる。超伝導単一電子トランジスタ (SSET) についてこの特殊性を、特性の定量的な評価を通して明らかにした。これは本研究の付加的な成果である。図8は V/Al/V-SSET のスタビリティ・ダイアグラムの測定結果と理論モデルであり、従来の SSET と比較すると、ジョセフソン・準粒子サイクルおよび準粒子トンネルの閾電圧が V の超伝導ギャップ分低くなっている。

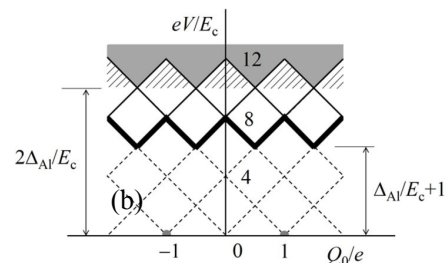
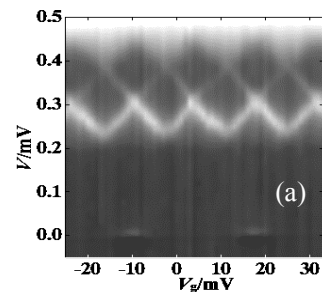


図8 .(a) V/AI/V-SSET の微分コンダクタンスの $V-V_g$ 平面でのグレイスケール・プロット . 明るい部分が高いコンダクタンスを示す . (b)同 SSET のスタビリティ・ダイアグラムの理論図 .

本研究では、以上のような成果を挙げたが、当初計画した研究内容の中で、微小 Josephson 接合列が放出すると考えられる輻射の直接検出を達成することはできなかった。これについては、今後の課題としたい。また、上記の研究成果は、この報告書作成時点で、必ずしも全て論文として公表してはいない。それらは、逐次論文化して公表していく。

[参考文献]

- 1) H. Shimada and P. Delsing, Phys. Rev. Lett. **85**, 3253 (2000).
- 2) S. Liou *et al.* Europhys. Lett. **108**, 67003 (2014).
- 3) M. Watanabe and D. B. Haviland, Phys. Rev. Lett. **86**, 5120 (2001).

5 . 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 5 件)

武田晃一、宮脇健至、ガンドロシュラ・スリニワス、石田千尋、萩原彩乃、水柿義直、島田宏、「量子電流ミラー効果に基づく高精度な電流整数倍器の実現に向けた研究」IEICE Technical Report, SCE2014-49, 1~6 (2015), 査読無。

H. Shimada, K. Miyawaki, A. Hagiwara, K. Takeda, and Y. Mizugaki, “Characterization of Superconducting Single-Electron Transistors with Small Al/AIO_x/V Josephson Junctions”, Superconductor Science and Technology **27**, 115015-1~8 (2014), 査読有, DOI: 10.1088/0953-2048/27/11/115015.

K. Takeda, C. Ishida, S. Gandrothula, Y. Mizugaki, and H. Shimada, “Precision improvement of the current multiplier based on the quantum current-mirror effect”, Japanese Journal of Applied Physics **53**, 023101-1~7 (2014), 査読有, DOI: 10.7567/JJAP.53.023101.

Hiroshi Shimada, Chihiro Ishida, and Yoshinao Mizugaki,

“Drag Current Reversal in Capacitively Coupled Arrays of Small Josephson Junctions”, Physical Review Letters **109**, 196801-1~5 (2012), 査読有, DOI: 10.1103/PhysRevLett.109.196801.

Srinivas Gandrothula, Kenta Nakamura, Masashi Takiguchi, Yoshinao Mizugaki, and Hiroshi Shimada,

“Current Multiplication Using Arrays of Small Josephson Junctions”, Japanese Journal of Applied Physics **51**, 123101-1~5

(2012), 査読有, DOI: 10.1143/JJAP.51.123101.

[学会発表] (計 14 件)

松原明志、水柿義直、島田宏、「二重微小 Josephson 接合における接合間のトンネル過程の相互作用」、日本物理学会 70 周年次大会、2015 年 3 月 21 日 (早稲田大学)。

島田宏、鹿取俊介、出口智明、水柿義直、「微小 Josephson 接合における Bloch 振動と電流プラトーの観測」、日本物理学会第 70 周年次大会、2015 年 3 月 21 日 (早稲田大学)。

武田晃一、宮脇健至、ガンドロシュラ・スリニワス、石田千尋、萩原彩乃、水柿義直、島田宏、「量子電流ミラー効果に基づく高精度な電流整数倍器の実現に向けた研究」、電子情報通信学会超伝導エレクトロニクス研究会、2015 年 1 月 22 日 (機械振興会館)。

宮脇健至、水柿義直、島田宏、「微小な Al/AIO_x/V 接合を用いた超伝導単一電子トランジスタ」、第 75 回応用物理学会秋季学術講演会、2014 年 9 月 19 日 (北海道大学)。

武田晃一、水柿義直、島田宏、「量子電流ミラー効果における電流誘引過程の非局所性」、日本物理学会 2014 年秋季大会、2014 年 9 月 9 日 (中部大学)。

S. Gandrothula, S. Katori, T. Deguchi, Y. Mizugaki, and H. Shimada, “Observation of Bloch oscillation and current plateaus in an array of small Josephson junctions embedded in dc-SQUIDS network”, 3rd International Conference on Nanotek and Expo, 2013 Dec. 2, Las Vegas, USA (Best poster award 受賞)。

S. Gandrothula, S. Katori, T. Deguchi, Y. Mizugaki, and H. Shimada, “Observation of Bloch oscillation and current plateaus in an array of small Josephson junctions embedded in dc-SQUIDS network”, International Symposium on Nanoscale Transport and Technology, 2013 Nov. 27, Atsugi, Kanagawa.

K. Takeda, S. Gandrothula, Y. Mizugaki, and H. Shimada, “Towards precise current multiplication by use of linear arrays of small Josephson junctions”, International Symposium on Nanoscale Transport and Technology, 2013 Nov. 27, Atsugi, Kanagawa.

武田晃一、水柿義直、島田宏、「量子電流ミラー効果に基づく微小電流の整数倍器」、電子情報通信学会 2013 ソサエティ大会、2013 年 9 月 19 日 (福岡工業大学)。

島田宏、武田晃一、水柿義直、「微小ジョセフソン接合列間の量子電流ミラー効果に見られる二面性」、電子情報通信学会 2013 ソサエティ大会、2013 年 9 月 19 日 (福岡工業大学)。

出口智明、鹿取俊介、Srinivas Gandrothula、水柿義直、島田宏、「微小 Josephson 接合列

における Bloch 振動と電流プラトー」、第 74 回応用物理学会秋季学術講演会、2013 年 9 月 18 日 (同志社大学)。

H. Shimada,

“Current-Induction Phenomena in Capacitively Coupled Linear Arrays of Small Josephson Junctions”, Low Dimensional Science 2013 Conference, 2013 Sept. 9, Huisun Forest, Nantou, Taiwan (招待講演)。

武田晃一、Srinivas Gandrothula、水柿義直、島田宏、「微小 Josephson 接合列を用いた電流整数倍器の高精度化」、第 60 回応用物理学会春季学術講演会、2013 年 3 月 28 日 (神奈川工科大学)。

宮脇健至、萩原彩乃、小谷祥生、水柿義直、島田宏、「Al/AlO_x/V Josephson 接合を用いた単一 Cooper 対素子」、電子情報通信学会 2013 年総合大会、2013 年 3 月 22 日 (岐阜大学)。

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：60216067

(2) 連携研究者

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：30280887