

平成21年 3月31日現在

研究種目：基盤研究（C）  
 研究期間：2006～2008  
 課題番号：18560345  
 研究課題名（和文） 超伝導カオスジェネレータ「ジョセフソン・テトロード」の  
 秘匿通信応用  
 研究課題名（英文） Application of Superconducting Chaos Generator “Josephson  
 Tetrode” to Secret Communication  
 研究代表者  
 吉森 茂 (YOSHIMORI SHIGERU)  
 拓殖大学・工学部・教授  
 研究者番号：00167024

研究成果の概要：5個のジョセフソン接合で出来た超伝導4端子デバイス「ジョセフソン・テトロード」のカオス発生デバイスとして特性を詳細に数値解析によって明らかにした。その成果に基づいて、2個のジョセフソン・テトロードによるカオス同期達成条件を詳細に調査した。さらに、ジョセフソン・テトロードの秘匿通信への応用として、乱数生成デバイスとしての可能性を理論的に検証し、サンプリング時間や閾値の最適化を行うことにより、100Gbps以上の高速で乱数を生成できることを理論的に明らかにした。

## 交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2006年度	1,200,000	0	1,200,000
2007年度	1,100,000	0	1,100,000
2008年度	1,100,000	330,000	1,430,000
年度			
年度			
総計	3,400,000	330,000	3,730,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：電気電子工学・電子デバイス

キーワード：電子デバイス、超伝導デバイス、ジョセフソン接合、カオス、秘匿通信

## 1. 研究開始当初の背景

(1)超伝導臨界温度が窒素の液化温度である77[K]を超える高温超伝導物質が発見されてから20年以上経過した。現在のコンピュータより遙かに高性能なコンピュータの実現が期待されたが、未だ開発に至っていない。超伝導デバイスとしてジョセフソン接合が提案されてから40年以上が過ぎ、電圧標準やSQUIDなどへその特長を発揮して実用化が進んでいるが、超伝導の特長を活かし切っているとは言えない状況である。

(2)超伝導現象が低温環境でしか起きないことが超伝導技術の発展を阻害している大きな要因ではあるが、逆に低温環境を利用して新しい超伝導デバイスの応用分野、例えば秘匿通信への応用を切り開いていく。低温環境では熱雑音が小さく、カオス現象の発生やその制御、応用に有利な点を活かす研究開発が必要である。

## 2. 研究の目的

(1)本研究では、5個のジョセフソン接合から成るジョセフソン・テトロードを提案する。この超伝導デバイスの特長は、外部回路を用いることなく単独でカオス発振を生じしめることができる点にある。構造的には4端子素子であり、テトロードという名前の由来になっている。

(2)5個のジョセフソン接合はいわゆる弱結合型とよばれるタイプの素子であり、良く知られたRSJモデルを用いてその特性を解析できる。よって本研究では、RSJモデルに基づくジョセフソン・テトロードの等価回路及び回路方程式を導出し、ジョセフソン・テトロードの動作を詳細に解析する。

(3)RSJモデルに基づく等価回路及び回路方程式を用いて解析することで、カオス発生条件を明らかにした後、2個のジョセフソン・テトロードによるカオス同期の可能性についても理論的に調査することを目的とした。

(4)カオス同期が達成できることが明確になれば、秘匿通信への応用についても道が開けることから、ジョセフソン・テトロードのカオス発振波形をデジタル信号処理することにより、疑似乱数の生成を試み、その品質について詳細に解析することも研究の目的とした。

## 3. 研究の方法

(1)最初にジョセフソン・テトロードの等価回路表現を導出した。ジョセフソン・テトロードは5個のジョセフソン接合から出来ているが、これらのジョセフソン接合は弱結合型に分類される素子であり、静電容量が非常に小さくのでRSJモデルを用いてその特性を記述できる。

(2)次にジョセフソン・テトロードの回路方程式を導出した。等価回路が得られると容易に回路方程式を導出できるが、そのままでは理論解析を行うことはできない。ジョセフソン・テトロードを構成する5個のジョセフソン接合の内、独立して動作する素子は3個であり、残りの素子の電流電圧特性はこれら3個の接合の特性から決定される。よって、回路方程式を3個の独立変数(接合間電圧)の時間微分について解き、それらを用いてジョセフソン・テトロードの特性解析を行う。

(3)ジョセフソン・テトロードの特性解析に用いる三元連立常微分方程式は数値的に解析する。よって本研究では Runge-Kutta-Gill

法を用いることとした。ジョセフソン・テトロードを構成する5個のジョセフソン接合の臨界電流値及び正常抵抗値を変化させ、さらに各接合に流れる電流を変化させて特性解析を行う。

(4)1個のジョセフソン・テトロードについてカオス発振条件を導いた後、2個のジョセフソン・テトロードを結合させてカオス同期現象を達成できるか数値解析によって調査する。2個のジョセフソン・テトロードを1個の抵抗で一方向に結合させるモデルを作り、回路方程式の導出及び数値解析プログラムの開発を行った。

(5)ジョセフソン・テトロードの秘匿通信への応用可能性を検証するために、カオス発振波形から疑似乱数の生成に関する数値解析実験を行った。ジョセフソン・テトロードの3個の独立変数(接合間電圧)から1個を選び、0と1のデジタル符号に変換するための閾値電圧及びサンプリング周波数の最適化を行った。

## 4. 研究成果

(1)本研究で提案したジョセフソン・テトロードの構造図(模式図)及びRSJモデルに基づく等価回路を図1及び図2に示す。

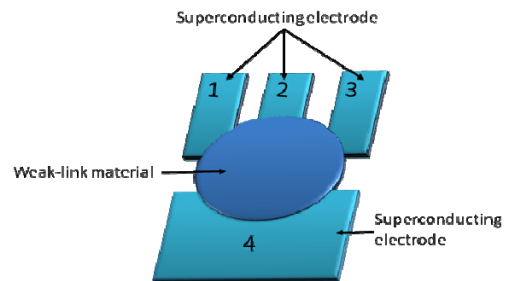


図1. ジョセフソン・テトロードの構造図

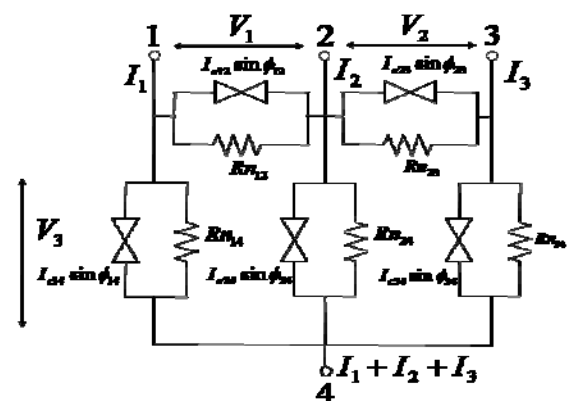


図2. ジョセフソン・テトロードの等価回路

本研究では、図2に示す $V_1$ 、 $V_2$ 、 $V_3$ を3個の独立変数（端子間電圧）に選んだ。 $I_1$ 、 $I_2$ 、 $I_3$ は駆動電流であり、独立して設定する。

(2) ジョセフソン・テトロードでカオス発振が可能かどうか検証するために、次のように各パラメータを設定した。正常抵抗  $R_{n14}$  を可変とし、 $R_{n12}=1.0\Omega$ 、 $R_{n23}=R_{n24}=10.0\Omega$ 、 $R_{n34}=5.0\Omega$ 、 $I_1=I_2=I_3=1.1(\text{mA})$ とした。正常抵抗  $R_{n14}$  の値によって、準周期波形やカオス発振波形を得ることができた。カオス発振波形の一例を図3に示す。 $R_{n14}=0.65\Omega$ の時の解析結果である。

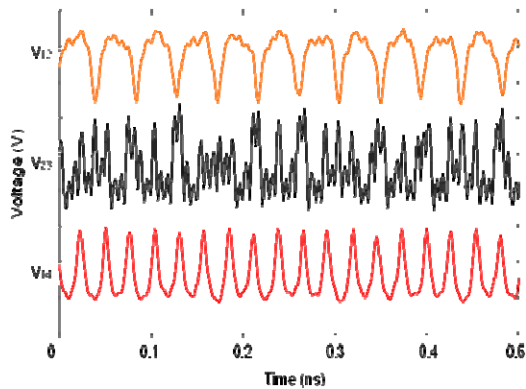


図3. カオス発振波形の例

図3の波形がカオス発振波形であることは三次元アトラクタ及び分岐図からも確認した。

(3) 単一のジョセフソン・テトロードでカオス発振波形を得ることができたことから、次に2個のジョセフソン・テトロードを用いてカオス同期の達成条件を詳細に調査した。

図4に2個のジョセフソン・テトロードが結合している構造図を示す。

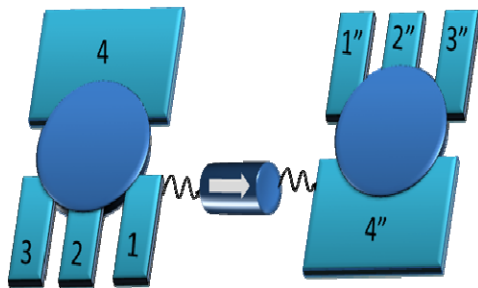


図4. 相互結合しているジョセフソン・テトロードの構造図

本研究では1個の抵抗を用いて一方に

結合しているモデルを考えた。図4において左側のジョセフソン・テトロードを Master、右側を Slave と呼ぶこととする。

$R_{n14}=0.45\Omega$ 、結合定数 0.0031 のときの Master と Slave の発振波形 ( $V_{23}$ ) と相関図を図5に示す。

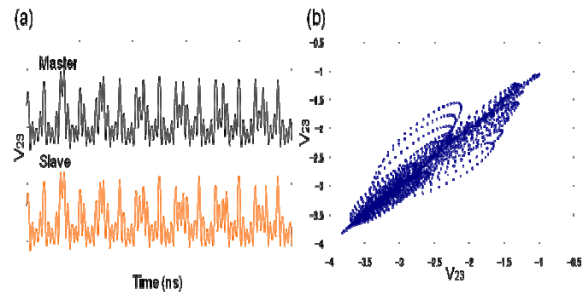


図5.  $R_{n14}=0.45\Omega$ 、結合定数 0.0031 のときの Master と Slave の発振波形 ( $V_{23}$ ) と相関図。(a)は発振波形で(b)が相関図

この場合、Master と Slave はカオス同期していない。

次に  $R_{n14}=0.45\Omega$ 、結合定数 0.0005 のときの Master と Slave の発振波形 ( $V_{23}$ ) と相関図を図6に示す。

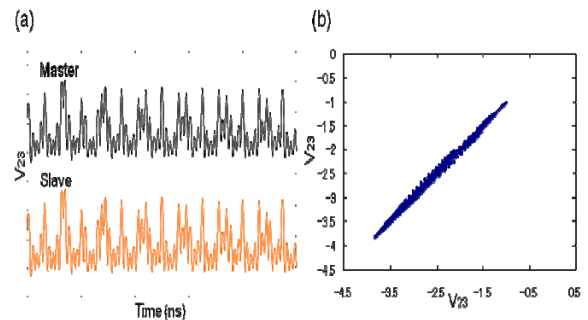


図6.  $R_{n14}=0.45\Omega$ 、結合定数 0.0005 のときの Master と Slave の発振波形 ( $V_{23}$ ) と相関図。(a)は発振波形で(b)が相関図

この時、Master と Slave はカオス同期しているといえる。カオス同期の達成は、図7に示すリヤプノフ・スペクトルからも確認できる。

このように結合定数によってカオス同期が達成できるか否かが決定されることが明らかになった。

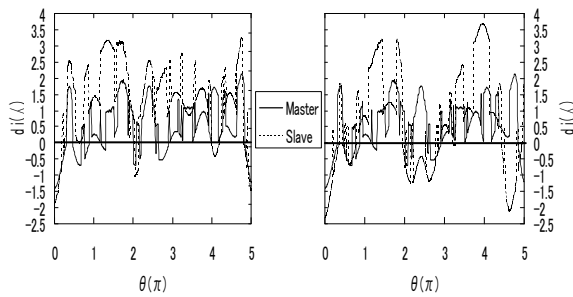


図7. リヤプノフ・スペクトルによるカオス同期達成の検証。(a)カオス同期時、(b)カオス非同期時

(4)図3に示すカオス発振波形をデジタル信号処理することによって疑似乱数を生成できるかについても検討した。図3の3つの電圧波形の中で最もカオス的な波形である $V_{23}$ を選ぶことにした。サンプリング時間を1psとして、閾値電圧を変化させてデジタル乱数を生成し、0と1の出現頻度を調べた。乱数の品質の検証にはNIST(米国標準局)の評価システムが使われるが、この評価システムで最も重要なのが0と1の出現頻度であり、丁度50%ずつにならなければならない。本研究の結果は以下の通りである。

- ①規格化閾値電圧=-2.5のとき、0の出現率72%、1の出現率28%
  - ②規格化閾値電圧=-3.0のとき、0の出現率49%、1の出現率51%
- ここで、規格化とはジョセフソン接合の $I_c R_n$ 積によって規格化した値であるという意味である。

## 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)

[雑誌論文] (計8件)

- ① Shigeru Yoshimori, Takehito Shimizu and Atsushi Uchida, "Analysis of Attenuation of HTS Strip Line using Time-Dependent-Ginzburg-Landau Equation", *IEEE Trans. Appl. Super.*, 2009年8月号掲載予定(掲載は決定済み)、査読あり
- ② A. Uchida, K. Amano, M. Inoue, K. Hirano, S. Naito, H. Someya, I. Oowada, T. Kurashige, M. Shiki, S. Yoshimori, K. Yoshimura, and P. Davis, "Fast physical random bit generation

with chaotic semiconductor lasers," *Nature Photonics*, Vol.2, No.12, pp.728-732(2008)、査読あり

- ③ 大和田 功, 山本 徹, 内田 淳史, 吉森 茂, 吉村 和之, 村松 純, 後藤 振一郎, ピーター ディビス: "半導体レーザーを用いた共通信号入力によるカオス同期の数値解析", *電気学会論文誌C*, Vol.128, No.5, pp.768-774 (2008)、査読あり
- ④ K. Amano, D. Narimatsu, S. Sotome, S. Tashiro, A. Uchida and S. Yoshimori, "Fractal dimension of chaotic light scattering in regular polyhedral mirror ball structure", *Physical Review E*, Vol.76, pp.(046213)1-6, 2007、査読あり
- ⑤ T. Yamamoto, I. Oowada, H. Yip, A. Uchida, S. Yoshimori, K. Yoshimura, J. Muramatsu, S. Goto, and P. Davis, "Common-chaotic-signal induced synchronization in semiconductor lasers," *Optics Express*, Vol.15, No.7, pp.3974-3980 (2007)、査読あり
- ⑥ S. Sano, A. Uchida and S. Yoshimori, "Dual synchronization of chaos in Mackey-Glass electronic circuits with time-delayed feedback", *Physical Review E*, Vol.75, No.1, pp.(016207)1-6, 2007、査読あり
- ⑦ 内田淳史, 吉森茂, ロイ ラジヤン: "レーザーにおけるコンシステンシー", *レーザー研究*, Vol.35, No.1, pp.38-42, 2007、査読あり
- ⑧ A Uchida, K. Mizumura and S. Yoshimori, "Chaotic dynamics and synchronization in microchip solid-state lasers with optoelectric feedback", *Physical Review E*, Vol.74, No.6, pp.(066206)1-6, 2006、査読あり

[学会発表] (計8件)

- ① I. Oowada, H. Ariizumi, M. Li, A. Uchida, S. Yoshimori, K. Yoshimura, and P. Davis, "Experimental and numerical analysis on common-chaotic-signal induced synchronization in semiconductor lasers with optical feedback," *Dynamics Days in Asia Pacific 5 (DDAP5 2008)*, Nara, Japan, September 9-12, 2008、審査あり
- ② M. Saiful, A. Uchida and S. Yoshimori, "Chaos synchronization in Josephson Tetrode", *Dynamics Days in Asia Pacific 5 (DDAP5 2008)*, Nara, Japan, September 9-12, 2008、審査あり
- ③ T. Shimizu, A. Uchida and S. Yoshimori, "Analysis of attenuation of HTS stripline using time-dependent-Ginzburg-Landau equation", *Applied Superconductivity*

- Conference(ASC 2008)*, Chicago, USA, August 17-22, 2008、審査あり
- ④ K. Amano, D. Narimatsu, S. Sotome, S. Tashiro, A. Uchida, S. Yoshimori, " Analysis of fractal dimension of light scattering in polyhedral mirror-ball structures", *The European Conference on Lasers and Electro-Optics and The International Quantum Electronics Conference 2007 (CLEO/Europe-IQEC 2007)*, Munich, Germany, June 17-22, 2007、審査あり
- ⑤ N. Arihara, A. Uchida and S. Yoshimori, "Electro-dynamical Analysis on Optimization of Off-Axial DC Magnetron Sputtering Target for High Tc Superconducting Thin Film Deposition", *International Superconductive Electronics Conference(ISEC 2007)*, Washington DC, USA, June 11-15,2007、審査あり
- ⑥ I. Oowada, T. Yamamoto, H. Yip, A. Uchida, S. Yoshimori, K. Yoshimura, J. Muramatsu, S. Goto, and P. Davis, "Synchronization in semiconductor lasers subject to a common chaotic drive signal," *The 15th IEEE International Workshop on Nonlinear Dynamics of Electronic Systems (NDES 2007)*, Tokushima, Japan, July 23-26, 2007、審査あり
- ⑦ H. Yip, S. Sano, A. Uchida, and S. Yoshimori, "Multiple basins of consistency in a driven Mackey-Glass electronic circuit", *2006 International Symposium on Nonlinear Theory and its Applications (NOLTA 2006)*, Bologna, Italy, September 11-14, 2006、審査あり
- ⑧ H. Yip, S. Sano, A. Uchida, and S. Yoshimori, "Multiple basins of consistency in a Mackey-Glass electronic circuit driven by chaos and noise signals", *International Workshop on Synchronization: Phenomena and Analyses 2006*, Tokyo, Japan, October 3-6, 2006、審査あり

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

吉森 茂 (YOSHIMORI SHIGERU)

拓殖大学・工学部・教授

研究者番号：00167024