

高温超伝導ジョセフソン素子からのカオス発生を利用した乱数発生回路の研究

代表研究者 島 影 尚 茨城大学 工学部 教授

1 はじめに

近年のインターネットの発展に伴い、高セキュリティの暗号システム構築が重要となってきている。現在、一般的には暗号システムに乱数が使用されているが、通常的应用においては、擬似乱数が多く使用されている。実際、セキュリティ応用においては高品質な乱数が要求されているが、ここで、高品質な乱数とは、無作為性、予測不可能性、再現不可能性をもった数列のことである。擬似乱数生成器は、どのようなプラットフォームにおいても簡単に実装可能であるが、出力される乱数は常にアルゴリズムの初期条件に依存するため、再現性の存在という問題点がある。一方で、物理乱数生成器は、抵抗やダイオードによる熱雑音、放射線、光子などの確率的な物理現象に依存する。したがって、物理乱数生成器から出力される乱数は、再現不可能性を持ち、セキュリティ応用に適している。しかしながら、一般に物理乱数生成器の生成速度は遅く、また、生成器自体が大きいことが課題となっている。新たな可能性のあるランダム現象の一つとして、カオス現象がある。カオス現象を利用した物理乱数生成器として、半導体レーザーカオスを用いたものが研究されており、12.5Gbit/s での乱数生成に成功している[1]。しかし、欠点としてレーザーの戻り光による周期性があり、これを完全に排除することはできない。一方で、カオス現象は、マイクロ波を照射したジョセフソン接合の電圧振動においても見られる。ジョセフソン接合におけるカオスは、これまでも多く研究されてきた[2-4]が、これらの研究の主な目的は、カオス理論を研究することや、ジョセフソン電圧標準においてカオスの発生を抑制することが目的であった。しかしながら、ジョセフソン接合によるカオス発振は、高品質な乱数源として応用できると期待される。実際、数値シミュレーションによってジョセフソン接合によるカオス発振から品質の良いホワイトノイズを生成することができると報告されている[5]。加えて、ジョセフソン接合からのカオスがランダム性の高い振る舞いをすることが示されている[6]。また、ジョセフソン接合は、GHz から THz 帯の発振器や検出器等としての研究が行われており、その電圧の発振速度が非常に高速であることが特徴である。ただ、ジョセフソン接合として従来使用されてきた材料は Nb などの金属系超伝導体であり、これらの冷却には冷媒に液体ヘリウムを用いることから、極低温使用の煩雑性があり、実際のジョセフソン接合からのカオス信号取り出しは行われてはいなかった。一方、YBaCuO (YBCO) などの高温超伝導体は、50K 程度まで動作温度を上げることが可能な材料であることから、高温超伝導体ジョセフソン接合が利用できれば、動作温度の高温化ができ、簡便な冷凍機で、乱数発生器の実現が期待できることとなる[7]。しかし、カオス信号は、ジョセフソン発振(高温超伝導体ではテラヘルツに達する)に付随するものであり、その高速性から信号取り出しは困難との認識がある。

本研究は、高温超伝導体によるジョセフソン接合からのカオス発振を実際の乱数発生に適用することを目的としたものである。本報告では、実際の YBCO 系ジョセフソン接合の使用を視野に入れたカオス発生シミュレーションの結果を示す。また、実際のカオス発生回路を想定した時に必要となるテラヘルツ発振器を高温超伝導材料である BiSrCaCuO (BSCCO) ジョセフソン接合からのテラヘルツ発振器の使用を検討していることから、その作製法の確立のための研究を行ったので、その結果を示す。

2 高温超伝導体を用いたカオス発生回路

2-1 ジョセフソン接合からのカオス発生シミュレーション

超伝導体を用いて作製されるジョセフソン接合は、鋭い非線形性を持つデバイスとして、電磁波検出器や、磁場検出器として応用されている。一般に、ジョセフソン接合は二つの超伝導電極の結合が弱い状態を、絶縁層などを用いて実現している。ジョセフソン接合は、B. D. Josephson が二つの超伝導間のトンネル電流を定式化され、以下の式に従う特性を示す[8]。

$$I = I_C \sin \phi \quad (1)$$

$$\frac{d\phi}{dt} = \frac{2eV}{\hbar} I_c \sin\phi \quad (2)$$

ここで、 I_c はジョセフソン接合の臨界電流、 I はジョセフソン接合間の電流、 ϕ は超伝導電極間の位相差、 e は電荷素量、 \hbar は換算プランク定数、 V は超伝導電極間の電圧である。ジョセフソン接合の静特性などのシミュレーションを行うために一般的に使われるモデルとして、Resistively Shunted Junction (RSJ) モデルがあり、本研究でもこのモデルを用いる。このモデルは、超伝導電流が流れる項と、常伝導電流が流れる項と、変位電流が流れる項が並列に構成されているものである。このとき全電流 I は次のように表される。

$$I = C \frac{dV}{dt} + \frac{V}{R} + I_c \sin\phi \quad (3)$$

ここで、 R は常伝導抵抗、 C は接合の持つ容量である。(3)式に(2)式の関係式を代入すると、

$$I = \frac{\hbar C}{2e} \frac{d^2\phi}{dt^2} + \frac{\hbar}{2eR} \frac{d\phi}{dt} + I_c \sin\phi \quad (4)$$

なる式を得る。与えられた電流 I に対して、 ϕ に関するこの

微分方程式は非線形で一般に解くことはできないが、数値計算によって解を求めることができる。この回路に対して、外部から電磁波を照射することにより、電流電圧特性上に不規則な信号が現れ、これがカオスとなる。我々のシミュレーションによるカオス発生の一例を図1に示す。低い直流電流の場所で、電流電圧特性上にスパイク状の電圧が不規則に現れていることが確認される。このスパイク状の特性の位置で得られた電圧波形からリアプノフ数を計算して、これがカオス状態となっていることは、確認している。ここでは、リアプノフ数と呼ばれる指数が計算され、それが正となる場合に、状態がカオスであるという判定となる

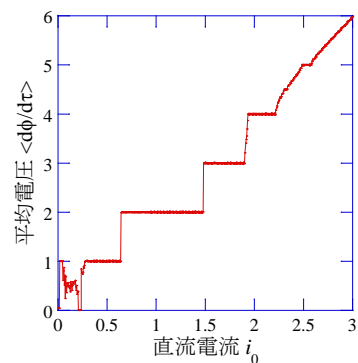


図1 ジョセフソン接合からカオスが発生する条件での電流電圧特性

2-2 ジョセフソン接合からのカオス発生

上記で説明したシミュレーションを行い、実際のカオス発生器を作製することが研究の最終課題であるが、本研究課題で提案する乱数発生器の構成を図2に示す。乱数発生器に汎用性の特徴を持たせるため、液体窒素温度程度での動作を目指して、超伝導体は、YBCOとBSCCOの高温超伝導体を用いる。カオス発生器の素子としては、YBCOを用いたジョセフソン接合を用いる。また、カオス発生のためには、高周波の照射が必要であるが、汎用的に使われている数10 GHz帯では、カオスの発生が難しく、テラヘルツ領域での発振が必要である。テラヘルツ発振器としてはBSCCOの固有ジョセフソン接合を用いる

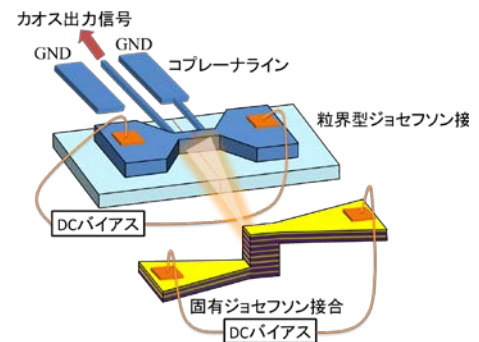


図2 カオス信号発生回路の構成図

(1) リアプノフ数によるパラメータの決定

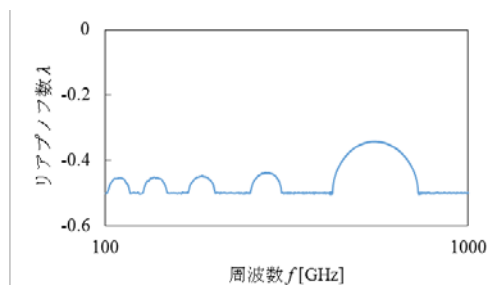
実際にカオスを発生させることができるジョセフソン素子を作製するために、実際の素子で使用することができるジョセフソン接合の抵抗値、静電容量値、臨界電流値、電流源からのバイアス電流値、マイクロ波の周波数、マイクロ波を照射することによって流れる高周波電流値を導出する。最初に、ジョセフソン接合の抵抗値、臨界電流値、静電容量値を決定する。これらの値はジョセフソン接合に使用する超伝導体の種類によって決まる。本研究で用いるYBCOにおいて作製されるジョセフソン接合では、臨界電流と抵抗の積はおよそ2 mVの値が得られる。本研究では、臨界電流値を $I_c = 1$ mA、抵抗値を $R = 2$ Ω の場合と臨界電流値を $I_c = 2$ mA、抵抗値を $R = 1$ Ω の場合の2パターンでシミュレーションを行った。ここで、ジョセフソン接合の静電容量値を表すパラメータとしてマッカンバー係数 β_C が定義されている。

$$\beta_c = \frac{2eI_c R^2 C}{\hbar} \quad (5)$$

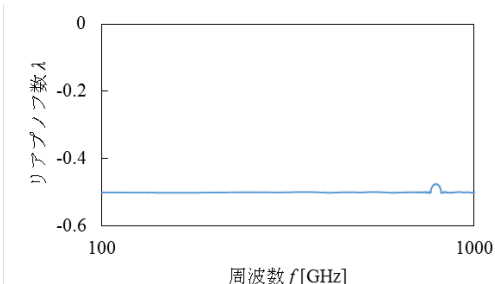
接合の形状やなどの要因で β_c は変化するが、一般の YBCO ジョセフソン接合では β_c はほぼ 1 の値であると報告されている。本研究では、 $\beta_c = 1$ として計算した静電容量値を使う。この時、容量値としては、それぞれ、 $C = 82.24$ fF、 $C = 164.4$ fF なる。バイアス電流値に関しては、最初の検討として、 $I_0 = 0$ mA とした。マイクロ波を照射に関しては、マイクロ波によりジョセフソン接合に誘起される電流値は、マイクロ波源と素子とのカップリングなどで変化するが、外部から制御することが可能であるので、本シミュレーションでは $I_{rf} = 1$ mA とした。マイクロ波の周波数に関しては、高温超伝導 BSCCO のジョセフソン接合からの電磁波放射を使用することを現状では想定しているために、100 GHz から 1 THz としてシミュレーションを行った。

決定したパラメータを用いて、周波数を変化させた時のリアプノフ指数の変化の様子を図 3 に示す。図 3(a) は $I_c = 1$ mA、 $R = 2$ Ω の場合で、図 3(b) は $I_c = 2$ mA、 $R = 1$ Ω の場合である。この結果から、どちらの場合もリアプノフ指数が正となる周波数を得ることはできなかった。しかしながら、(a) の場合のほうが、リアプノフ指数の値は大きく、正に近いので、これ以降のシミュレーションでは、臨界電流値と抵抗値は $I_c = 1$ mA、 $R = 2$ Ω とする。

ここで、使用周波数である 100 GHz から 1 THz において、リアプノフ指数が正になるようなパラメータを探すため、素子パラメータである素子抵抗値を変化させることを検討した。実際の素子を用いて、抵抗値を変化させる方法としては、ジョセフソン接合の上に直接金属を蒸着させ、抵抗を並列にシャントする方法が考えられる。本研究においては、抵抗値を 1.5 Ω 、1 Ω と減少させ、シミュレーションを行った。その場合の周波数-リアプノフ指数特性を図 4 に示す。しかしながら、結果によると、抵抗値の減少に伴い、リアプノフ指数の値の減少が起こり、リアプノフ指数が正となる周波数は見つからなかった。そこで、次に、素子パラメータである静電容量値の変化で、リアプノフ指数を変化させることができないかを検討した。実際の素子での容量変化に関しては、抵抗シャントとして金属でシャントすることと同様に、ジョセフソン接合の上に誘電体を蒸着し、さらにその上に金属を蒸着することを想定している。このことは、静電容量で接合をシャントすることに対応し、静電容量値は増加することとなる。まず、図 5 に静電容量値 2 倍におけるリアプノフ指数-周波数特性を示す。この結果からは、静電容量値を 2 倍にただけでは、リアプノフ指数が正となる周波数を得ることができないことが分かった。そこで、静電



(a) $I_c = 1$ [mA]、 $R = 2$ [Ω]



(b) $I_c = 2$ [mA]、 $R = 1$ [Ω]

図 3 周波数-リアプノフ指数特性

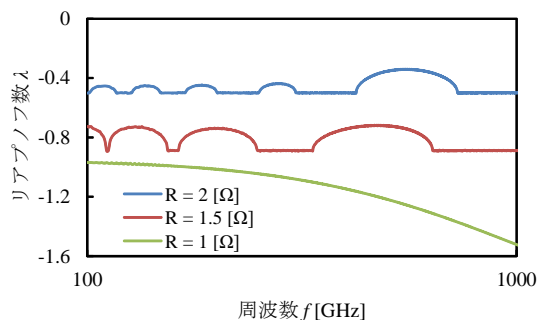


図 4 抵抗値を減少させたときの周波数-リアプノフ指数特性

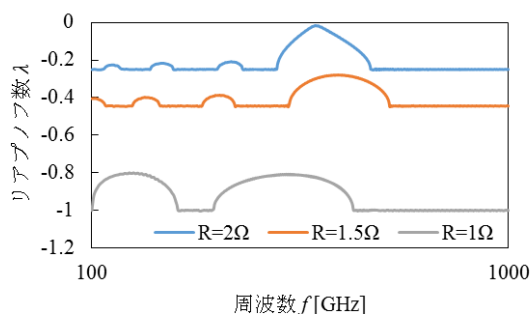


図 5 静電容量値が 2 倍における周波数-リアプノフ指数特性

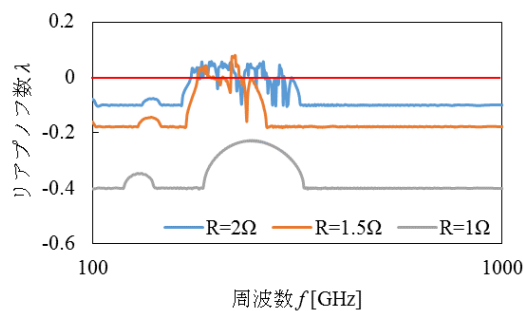


図6 静電容量値が5倍における周波数-リアプノフ数特性

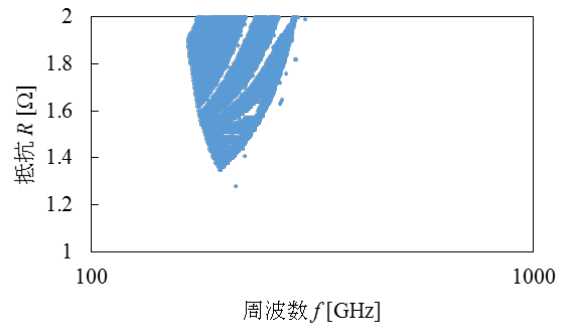


図7 静電容量値が5倍としたときの周波数-抵抗面におけるカオス発生領域

容量値を3倍、4倍、5倍とし、シミュレーションを行った。図6に静電容量値を5倍にした時の周波数-リアプノフ数特性を示す。これらの結果から、静電容量値が3倍以上になるとリアプノフ数が正となる周波数が現れ始めることが分かった。次に、図6の表記方法では、抵抗値を数種類しか表すことができないことに加え、リアプノフ数が正であることを判断することが難しかったため、より細かく抵抗値を設定し、カオス発生状態かどうかの判定を、シミュレーションにより行った。その結果として、縦軸を抵抗値、横軸を周波数としリアプノフ数が正である点をプロットしたものを図7に示す。ここで、静電容量値が、2倍、3倍、4倍のものも同様なシミュレーションを行ったが、図7は静電容量値が5倍のときのみの図である。リアプノフ数が正となる領域は、カオスが発生している領域と考えられるが、その領域において抵抗値の下限値が存在し、静電容量値が3倍のときは1.66 Ω、4倍のときは1.45 Ω、5倍のときは1.28 Ωとなった。傾向としては、静電容量の増加に伴って、下限値は小さくなっていくことがわかった。また、抵抗値が2 Ωのときのリアプノフ数が正である周波数の帯域幅を比較すると、3倍のときは79 GHz、4倍のときは115 GHz、5倍のときは119 GHzとなった。静電容量の増加は、カオス発生領域の周波数の帯域幅も大きくすることが分かった。また、抵抗の下限値の周波数を見てみると、3倍のときは270 GHz、4倍のときは230 GHz、5倍のときは212 GHzであり、静電容量の増加は、カオス発生領域を低周波数帯にシフトさせる傾向にあることも分かった。これらの結果から、実際の回路でカオス発生を行わせる場合には、照射電磁波の周波数の設定は非常に重要であることが示唆され、これらはBSCCO ジョセフソン接合の設計に重要な指針を与える結果であることがわかった。

(2) 電圧波形のパワースペクトル

リアプノフ数が正である周波数を用いて得られる電圧波形の時間変化から、フーリエ変換を行うことでそのパワースペクトルを計算したところ、リアプノフ数が正であったとしても、その電圧波形のスペクトルが理想的なホワイトノイズになるとは限らなかった。そこで、リアプノフ数の大きさが、電圧波形にどのような影響を与えるかの調査を行った。今回のシミュレーションでは、実際のカオス発生回路作製の上で静電容量の極端な増加は困難であることから、静電容量値が3倍におけるリアプノフ数の大きさとパワースペクトルの関係を調査した。静電容量値が3倍におけるリアプノフ数としては、シミュレーションを行った範囲ではあるが、最大値が0.095696、最小値は0.000003であった。この範囲を単純に3つの範囲 ($0.063795 < \lambda \leq 0.095696$, $0.031898 < \lambda \leq 0.063795$, $0.000003 < \lambda \leq 0.031898$) に分け、それらの特性を調べたところ、リアプノフ数が大きい領域は、比較的高周波側にある程度の帯域幅を持って存在していることが分かった。ここで、リアプノフ数の大きさの違いによるパワースペクトルへの影響を調査するために、3つの範囲の中から、それぞれリアプノフ数が一番大きな値における電圧波形のシミュレーションを行った。また、抵抗値と周波数に関してはこれに対応するように、 $\lambda = 0.095696$ のとき $R = 1.85 \Omega$ 、 $f = 265 \text{ GHz}$ 、 $\lambda = 0.063795$ のとき $R = 1.83 \Omega$ 、 $f = 265 \text{ GHz}$ 、 $\lambda = 0.031898$ のとき $R = 1.96 \Omega$ 、 $f = 267 \text{ GHz}$ とした。これらのパラメータを用いて、パワースペクトルのシミュレーションを行った。その波形を図8に示す。図8(a)は $\lambda = 0.095696$ の場合、図8(b)は $\lambda = 0.063795$ の場合、図8(c)は $\lambda = 0.031898$ の場合の波形である。これらは、電圧波形から得られたものであるが、得られた電圧のピークはmV程度の電圧であることは確認しており、これは、実際の回路からの出力としては、比較的に利用しやすいオーダーであることが分かった。パワースペク

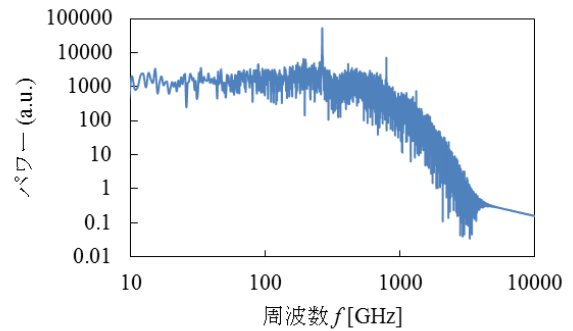
トルに関しては、 $\lambda = 0.095696$ の場合、照射周波数 265 GHz のピーク以下では、きれいなホワイトノイズとなっている。しかし、 $\lambda = 0.063795$ の場合のパワースペクトルは、周波数の増加とともに、パワーの増加が見られ、ホワイトノイズとして判断することが難しい。また、 $\lambda = 0.031898$ のパワースペクトルであるが、100 GHz 付近に少しのディップが存在してしまっただけ。以上のことから、リアプノフ数が大きい範囲における抵抗値と周波数を利用することにより、実際の素子で利用することが可能なパラメータでカオスを発生させることができると考えられる。

2-3 素子作製プロセスの確立

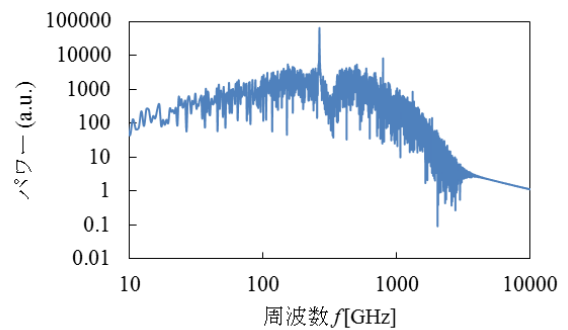
(1) BSCCO ジョセフソン接合の作製

上記で述べたシミュレーションにより得られた必要なパラメータを実現するためには、素子作製のプロセスの確立が必要である。本研究では、発振器として使用される BSCCO の固有ジョセフソン接合の作製プロセスの確立を行った。今まで、我々の採用していた接合作製プロセスは、接合作製にスパッタエッチングを用いていたので、スパッタエッチングにおけるサンプルが加熱により、接合の劣化が起こることが問題であった。その解決のために、新たな接合作製プロセスを構築し、安定性のよい素子作製となることを目指した。本研究では、スパッタエッチングを用いずに、希塩酸による BSCCO の絶縁化を用い、素子作製プロセスの構築を研究した。希塩酸改質とは、超伝導体 BSCCO を希塩酸に浸漬することによって、絶縁体 BiOCl に改質する現象である。希塩酸中でどのような化学反応機構によって BSCCO 単結晶が BiOCl 結晶へと変化するのかは明らかではないが、X 線回折(XRD)測定結果などから BiOCl であることが確認でき、さらに BSCCO と BiOCl の境界は原子レベルで整合性の良い界面を形成していると推察されている [9]。また、希塩酸の濃度が高い場合はウェットエッチングとなるので、接合への電極を付ける際には別の工程が必要となる [10]。実際に、BSCCO 単結晶をガラス基板にマウントし、希塩酸に浸漬したところ、BSCCO 単結晶の透明化現象が確認できた。また、希塩酸改質後は、結晶は絶縁化されていることを確認した。BSCCO 単結晶を希塩酸で改質する前とその後の結晶の顕微鏡写真を図 9 に示す。

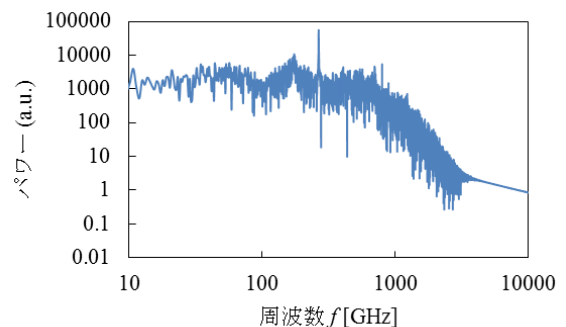
次に、BSCCO 単結晶によるジョセフソン接合（固有ジョセフソン接合）作製プ



(a) $\lambda = 0.095696$



(b) $\lambda = 0.063795$



(c) $\lambda = 0.031898$

図 8 得られた電圧波形から計算されたパワースペクトル

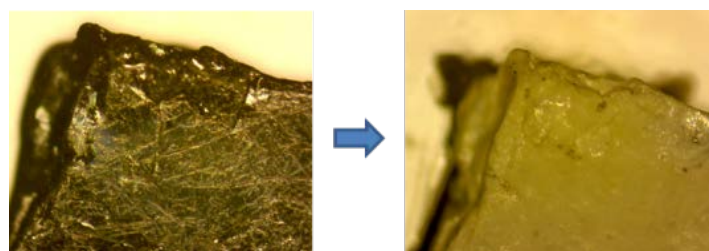


図 9 BSCCO 単結晶の希塩酸改質

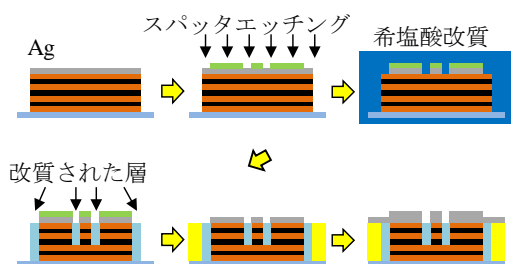


図10 BSCCO固有ジョセフソン接合作製プロセス

プロセスの概略を図10に示す。BSCCO単結晶とガラス基板の間にポリイミド樹脂を付けて、ホットプレート150℃で10分間ベークすることで、ガラス基板上にマウントし、スコッチテープで劈開を行う。次に保護膜としてAg薄膜を約800Å蒸着する。この際、劈開後のきれいな表面に不純物が付着しないように大気中への放置時間を短くする。その後、フォトリソグラフィ工程を経て、 $80 \times 250 \mu\text{m}^2$ の接合パターンを形成する。次に、エッチングを行い接合部以外のBSCCOの結晶表面を露出させる。そして、濃度0.1%の希塩酸に浸漬することで、接合部以外を改質により絶縁化し、メサ形の固有ジョセフソン接合が作製される。接合部の上のレジストをアセトンによって剥離し、単結晶とガラス基板との段差埋めを行う。次に、電極としての銀薄膜を約3400Å成膜し、フォトリソグラフィ工程を経て、電極パターンを形成する。再びエッチングすることで電極を形成することで固有ジョセフソン接合が完成する。このプロセスは、接合作製時にスパッタエッチングを行わないことから、我々の従来の素子作製プロセスに比べてエッチング時間が大幅に短いことが特徴である。完成した固有ジョセフソン接合の顕微鏡写真を図11に示す。上記で提案した作製プロセスにより作製された接合面積 $80 \times 250 \mu\text{m}^2$ のサンプルを3端子測定で行った抵抗-温度特性の測定結果を図12に示す。約85KでBSCCO単結晶のc軸方向の超伝導転移と考えられる急激な減少が観測された。残留抵抗は、3端子測定による接触抵抗の寄与分である。BSCCO単結晶の臨界温度が約86Kであることと比較すると、固有ジョセフソン接合作製プロセス中における単結晶の劣化はほとんどないことがわかった。次に、作製された固有ジョセフソン接合の電流-電圧特性の測定を15K測定温度で行った。図13にその結果を示す。金属系超伝導体で作製されたSIS(超伝導-絶縁層-超伝導層)ジョセフソン接合で得られるような典型的

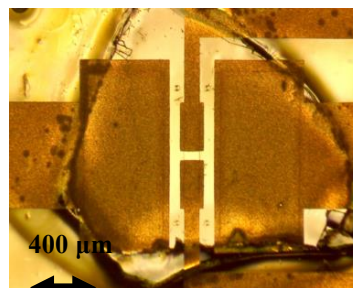


図11 作製したBSCCO固有ジョセフソン接合の顕微鏡画像

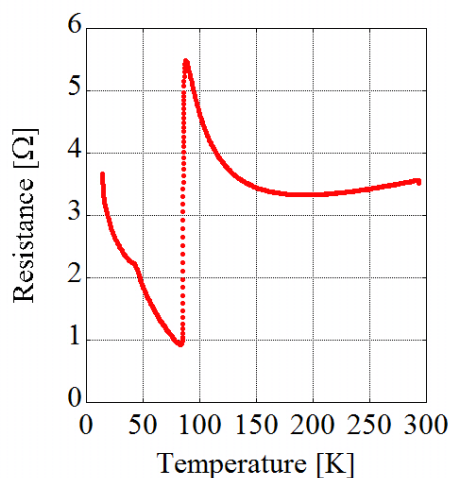


図12 BSCCO固有ジョセフソン接合の抵抗-温度特性

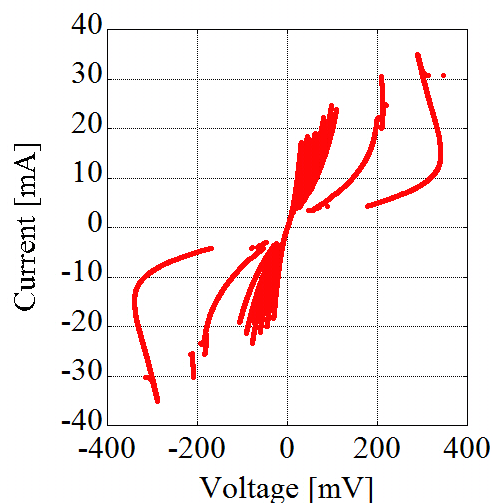


図13 BSCCO固有ジョセフソン接合の電流-電圧特性

なヒステリシス特性が観測された。電流変化時に電圧ジャンプが生じた後に電流を反転させることを複数回繰り返す測定法により、電流－電圧特性のブランチ構造を確認できた。したがって作製された接合は典型的な多接合の SIS ジョセフソン接合であることがわかった。観測された電圧ジャンプはギャップ電圧に対応しているが、スパッタエッチング法を用いた従来の作製プロセスで作製された素子に比べると、大きな値が得られた。これは、従来のものよりも高いギャップ電圧を持つ固有ジョセフソン接合が作製できたことに対応する。この高ギャップ化は、スパッタエッチングによる熱でのダメージがなくなったためと考えられる。SIS ジョセフソン接合において、ギャップ電圧値は素子自身の電磁波応答における上限応答周波数に比例していることが知られており、この高ギャップ化は、本研究で作製した固有ジョセフソン接合が THz デバイスとして応用が期待できるということを示唆している。次に、作製された固有ジョセフソン接合に含まれるジョセフソン接合のばらつきを評価した。固有ジョセフソン接合は、結晶内に内在するジョセフソン接合を用いていることから、一つ一つの接合は結晶の単位構造程度の大きさであるために、本質的に直列化が容易となっている。本研究課題で目標とする電磁波発振器としての固有ジョセフソン接合においては、直列の接合数は、発振のパワーに関連するものとなる。また、それぞれの接合の均一性は、それぞれの素子から発振する電磁波の均一性に関連するものであり、その評価は重要である。図 13 の電流－電圧特性の電圧ジャンプを調べたところ、作製した固有ジョセフソン接合の中には、接合が直列に約 21 個あると見積もれる。また、それぞれの電圧ジャンプ時の電流値が各接合の臨界電流を示しているため、電流－電圧特性から臨界電流のばらつきが評価できる。図 13 の電流－電圧特性から抽出した臨界電流のヒストグラムを図 14 に示す。接合の臨界電流のばらつきは比較的少ないものではあったが、24 mA 付近と 30 mA 付近の 2 か所に、ばらつきが集中している結果が得られた。この原因を調べるためには、作製した接合の顕微鏡観察などを現在検討中であるが、銀電極作製時のエッチングの影響や希塩酸改質で接合幅が二段になってしまったことなどを可能性として考えている。現在の接合数は、21 個と少ないものであるが、今後は、数 100 個程度の接合数の固有ジョセフソン接合作製を目指すこととなる。このような多数の接合では改質時間を長くすることとなるために、結果として、ばらつきが少なくなる可能性があるかと期待している。接合に関する今後の研究としては、均一性の問題解決や接合数の制御などがあるが、作製した固有ジョセフソン接合が THz 発振器としてどのような動作をするか、実験を通じて確認していくことも行う予定である。

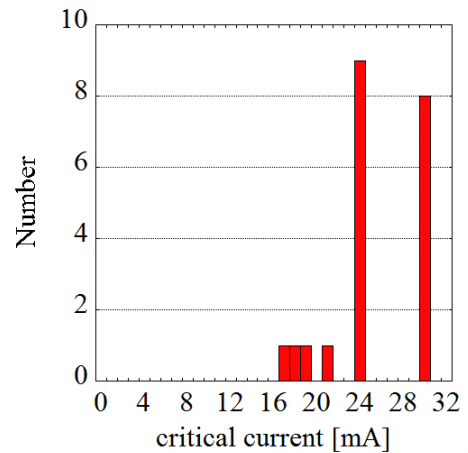


図 14 BSCCO 固有ジョセフソン接合の臨界電流ヒストグラム

(2) YBCO ジョセフ接合の作製

カオス発生のためのジョセフソン接合として利用するために、YBCO を用いた接合作製の研究を行っている。今までの我々の接合作製の手法は、接合パターンのエッチングにスパッタエッチングを使用していたが、プラズマに素子がさらされるなどにより素子の劣化が起こることや、垂直エッチング行えないなどの問題点があった。そのために、イオンビームエッチング法に変更することを進めている。本研究課題による支援をうけて、イオンビームエッチング装置の整備を進めている。現状では、イオンビーム出力のテストまで進んでおり、これを YBCO ジョセフソン接合作製に使用するよう現在プロセスを移行中である

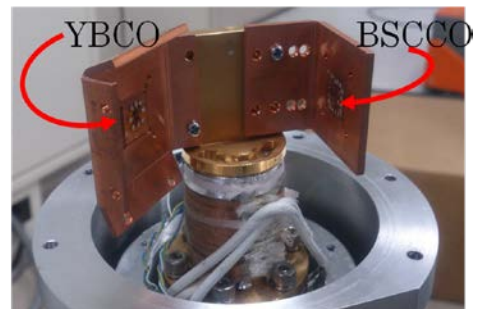


図 15 YBCO ジョセフソン接合と BSCCO 固有ジョセフソン接合の冷凍機への実装

2-4 カオス発生のための測定系の構築

カオス発生素子としての YBCO ジョセフソン接合と、発振器としての BSCCO の固有ジョセフソン接合を、実際に冷凍機内にセットし、同時に測定を行うシステムを構築した。システムの写真を図 15 に示す。作製された YBCO ジョセフソン接合と、発振器としての BSCCO の固有ジョセフソン接合を同一冷凍機内に実装し、ジョセフソン接合からのカオス信号発生の実験を今後行う。素子からのカオス信号を直接観測するため、素子からの信号取り出しのためのコプレーナ伝導線路を作製し、その測定を行うことを計画している。

3 むすび

本研究では、高温超伝導体によるジョセフソン接合からのカオス発振を実際の乱数発生に適用することを目的とし、実際の YBCO 系ジョセフソン接合の使用を視野に入れたカオス発生シミュレーションや、テラヘルツ発振器として動作させる目的で作製した BSCCO 固有ジョセフソン接合作製プロセスの研究を行った。実際の高温超伝導体を用いた YBCO ジョセフソン接合の使用を想定したシミュレーションを行い、実際に実現可能なパラメータで、カオス発生が可能との結論を得た。また、これらのシミュレーション結果を具現化するために、BSCCO と YBCO のジョセフソン接合作製の確立に取り組み、実際に実装ができる素子ができつつある結果が得られた。また、BSCCO 固有ジョセフソン接合からの電磁波発振を、YBCO ジョセフソン接合で受信する実験系の構築を行い、現在は、初期実験の準備を進めている。

本研究は、高温超伝導体を用いた高性能な乱数発生器実現に向けた基礎研究であるが、将来的な研究目標としては、簡便な冷凍機で動作する実際の乱数発生器を目指すことがあげられる。この実現のためには、接合の安定的な作製はもちろんであるが、素子からの電磁波発信信号の出力系の設計や構築など、多くの課題が残っている。本研究支援により、その目標に向けて、第一歩の研究が進められたことは、今後につながることであり、非常に有益な研究であった。

【参考文献】

- [1] I. Reidler, Y. Aviad, M. Rosenbluh, and I. Kanter, “Ultrahigh-Speed Random Number Generation Based on a Chaotic Semiconductor Laser,” *Phys. Rev. Lett.* 103, 024102, 2009.
- [2] Y. E. Ben-Jacob, I. Goldhirsch, Y. Imry, and S. Fishman, “Intermittent Chaos in Josephson Junctions,” *Phys. Rev. Lett.* 49, 1599, (1982).
- [3] M. Bartuccelli, P. L. Christiansen, N. F. Pedersen, M. P. Soerensen, “Prediction of chaos in a Josephson junction by the Melnikov-function technique,” *Phys. Rev. B*, 33, 4686, 1986.
- [4] Abraham, I.L. Atkin, A. Wilson, “Josephson voltage standard by controlling chaos,” *IEEE Trans. Appl. Supercond.* 9, 4166, 1999.
- [5] R. L. Kautz, “Using chaos to generate white noise,” *JAP*, 86, 10, p. 5794, 1999.
- [6] J. A. González, L. I. Reyes, J. J. Suarez, L. E. Guerrero, G. Gutiérrez, “A mechanism for randomness,” *Phy. Lett. A*, 295, 1, 25, 2002.
- [7] H. Shimakage, Y. Tamura, “Chaotic Oscillations in Josephson Junctions for Random Number Generation,” *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 25, 3, 2377240, 2015.
- [8] B. D. Josephson, “Possible new effects in superconductive tunneling,” *Physics Letters*, 1, 7, p. 251, 1962.
- [9] T. Kato, J. Chen, S. Sunaga, H. Mizumaru, T. Asano, H. Shimakage, K. Yasui, K. Hamasaki, “Characterization of $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+\delta}$ Stacks Fabricated by Acid Treatment Process,” *IEEE Trans. Appl. Supercond.* 21, p.172-175, 2011.
- [10] E. A. Vopilkin, A. V. Chiginev, L. S. Revin, A. N. Tropanova, I. Yu. Shuleshova, A. I. Okhupkin, A. D. Shovkun, A. B. Kulakov and A. L. Pankratov, “Quick and reliable technology for fabrication of stand-alone BSCCO mesas”, *Supercond. Sci. Technol.*, 28, 045006, 2015.

〈発 表 資 料〉

題 名	掲載誌・学会名等	発表年月
ジョセフソン接合からのカオス発生シミュレーションにおける素子パラメータ依存性	第77回応用物理学会秋季学術講演会	2016年9月14日
Simulations of chaos generation from Josephson junctions with various junction parameters	International Superconductivity Symposium	2016年12月15日
GHz帯電磁波照射によるジョセフソン接合からのカオス発生シミュレーション	電気学会東京支部茨城支所学術講演会	2016年12月17日
Simulations of chaos generation from Josephson junctions with various junction parameters	Journal of Physics: Conference Series	掲載決定