

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 22 日現在

機関番号：53901

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2013～2014

課題番号：25889063

研究課題名(和文) テラヘルツ波発振器を目指した固有ジョセフソン接合の同期現象に関する研究

研究課題名(英文) Synchronization of intrinsic Josephson junctions for THz electromagnetic wave oscillator

研究代表者

及川 大(Oikawa, Dai)

豊田工業高等専門学校・電気・電子工システム学科・助教

研究者番号：40707808

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,100,000円

研究成果の概要(和文)：テラヘルツ波発振器を目指した固有ジョセフソン接合の同期現象に関する研究に関して、先ず自己フラックス法を用いて良質な高温超伝導体単結晶の作成を試みた。フラックス剤の配合比率及び坩堝のアルミナ純度の最適化を行い、良質な配向面の大きい高温超伝導体単結晶を再現性よく作成することに成功した。ジョセフソン接合の同期現象には発熱の効果が大きく寄与していることに着目して、数値解析および発熱を無視できるパルス電流印加法を用いて発熱の効果を調べた。その結果、電流端子とジョセフソン接合との接触抵抗部分での発熱がジョセフソン接合の特性に大きな影響を及ぼす場合があることを明らかにした。

研究成果の概要(英文)：First, we have investigated crystal growth condition of high quality Bi-2212 single crystals using self-flux melting method. We have successfully optimized amount of flux and obtain high quality Bi-2212 single crystals. Then, Synchronization of intrinsic Josephson junctions involved self-heating effect deeply. These self-heating effects were investigated numerical simulations and pulse current measurement techniques. In the result, the effect of contact resistance between crystal and electrodes is measurable. So we have found this effect deteriorate Josephson junctions properties.

研究分野：電子物性

キーワード：高温超伝導 ジョセフソン接合

1. 研究開始当初の背景

近年注目されているテラヘルツ (THz) 電磁波とは光波と電波の中間に位置する波 $30 \mu\text{m} - 3\text{mm}$ の電磁波を指す. THz 波は光波の直進性と電波の透過性を併せ持つため, 通信, 医療, 非破壊検査など様々な分野での応用が可能であり, 有用な THz 電磁波発振器の開発が望まれている. 現在, 電磁波発振器として周波数の低い電波領域では半導体素子, 周波数の高い光波領域ではレーザーによって高出力の発振が可能となっている. しかしいずれの発振器も中間周波数の THz 帯において電磁波放射出力が低下してしまういわゆる THz ギャップが存在する.

近年, 高温超伝導体に内包する固有ジョセフソン接合を用いた THz 源が注目を集めている. 高温超伝導体は従来の金属系超伝導体よりエネルギーギャップが一桁高く THz 帯に位置しており後述する固有ジョセフソン接合を用いた THz 発振源の開発が期待される. 固有ジョセフソン接合を用いた THz 発振器には次のような利点がある.

(1) 周波数可変: 発振周波数が印加電圧のみに依存するため

(2) 作製が容易: 半導体に比べ繊細な行程が少ない

(3) 小型個体素子: 取り扱いが容易であり設置場所を選ばない

超伝導体発振器の場合, 極低温まで冷却しなくてはならないという課題は残るが材料分野における高温超伝導体の臨界温度の上昇, また, 冷凍機の小型化においてされる進展が見込まれている. 絶縁体 (I) を超伝導体 (S) で挟み込んだ SIS 接合は絶縁体が十分薄い (1 nm 以下) と, 両側の超伝導体が弱結合を形成し, トンネル効果により超伝導電流を担う電子対 (クーパー対) が電圧を生じることなく絶縁体を通過する. この接合をジョセフソン接合と呼ぶ. また本研究に用いる Bi 系高温超伝導体は結晶構造中に多積層のジョセフソン接合が内包されている (固有ジョセフソン接合). ジョセフソン接合には直流電圧を印加すると交流電流が生じる現象があり, その周波数は印加電圧のみに線形的に依存し 1 mV あたり約 0.5 THz の電磁波放射が可能である. しかし現在まで高出力化のため多積層された固有ジョセフソン接合の接合間の同期現象は明らかになっていない.

2. 研究の目的

THz 電磁波発振器に向けたジョセフソン接合の同期現象の解明のため, 先ず, 高温超伝導体単結晶の作製方法及び, 素子を微細加工する装置の整備を目的とする. また実験的及び数値解析的にジョセフソン接合の同期現象と深く関係のあるとされる自己発熱効果について調べることを目的とする.

3. 研究の方法

まず電気炉を用いた自己フラックス法に

よって良質な配向面の大きい Bi 系高温超伝導体 $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_y$ (以下 Bi-2212) 単結晶の作製方法の確立を行う. 作製された Bi-2212 単結晶を X 線回折装置及び蛍光 X 線分析装置によって結晶構造や組成分析を行う. テラヘルツ発振を目指す素子では, 多数のジョセフソンが同期動作することによる高出力化を期待し, 通常 500 接合以上の素子を用いる. それゆえに全接合が有限電圧状態に遷移した準粒子ブランチにおいてはジュール熱による発熱が顕著になり, それが性能劣化に繋がることが懸念される. その自己発熱が同期動作に密接に関係していると考え, 数値解析及び, 発熱の効果を制御可能なパルス電流印加法を用いて評価する.

4. 研究成果

本研究での主な結果と概要を以下に示す.

(1) 良質な Bi 系高温超伝導体単結晶の作製

自己フラックス法においてフラックス剤である参加ビスマスの配合料 (モル比) を通常の 2.0 から増加させることによって配向面の大きな Bi-2212 単結晶を得られることが分かった. 蛍光 X 線分析装置においてどの場合も Bi-2212 が作製されたことが確認された.

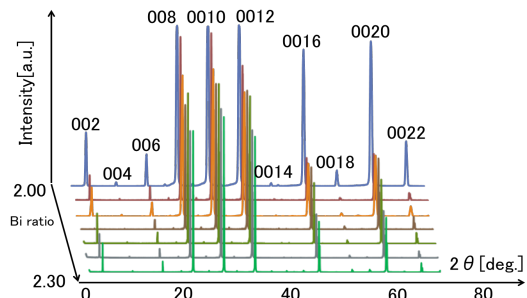


図 1 X 線回折装置を用いた Bi-2212 の構造解析結果

次に得られた単結晶 X 線回折装置を用いて測定したところ, 図 1 に示すように Bi-2212 の c 軸方向のピークのみが観測され, 不純物ピークなどは観測されなかった. さらにこのピークの半値幅を評価したところ酸化ビスマスの配合比 2.20 モルにおいて最小値を示した. これは 2.20 の配合比において最も結晶性の高い Bi-2212 単結晶が得られることを意味する.

(2) 微細加工装置の整備

微細加工にはフォトリソグラフィという設備が必要不可欠であるが, 市販の装置を購入よりも格段に安価なフィソグラフィ設備を構築した.

(2) 自己発熱効果の数値解析

自己発熱効果の実験的評価に先立ち数値解析によって自己発熱効果を評価した. 図 2 に素子サイズ $3 \times 3 \mu\text{m}^2$, ジョセフソン接合数 (以下接合数) 15 接合の微小素子を液体ヘリウム中において測定した実験値及び数値解

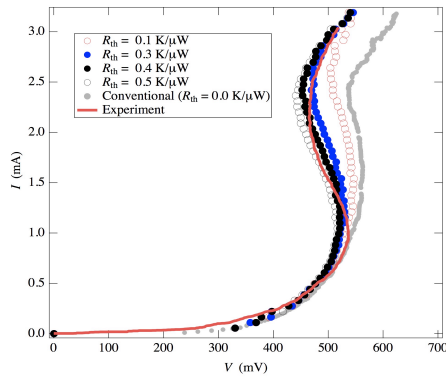


図 2 固有ジョセフソン接合の電流電圧特性の実験及び数値解析結果

析結果を示す。電流-電圧 (I - V) 特性は有限電圧状態において発生するジュール熱に起因する負性抵抗領域が観測された。また発熱は前述の発熱の他にも結晶と電極間の接触抵抗部分からの発熱も生じるといった着想から、接触抵抗部分の発熱も考慮した場合の数値解析を行ったところ、接触熱抵抗が $0.4 \text{ K}/\mu\text{W}$ の場合の I - V 特性は先攻研究で示された発熱効果の数値解析結果よりも実験値に近い特性を示した。この結果は接触抵抗が比較的大きい場合は接触抵抗部分からの発熱は無視できないほど大きく、ジョセフソン接合の特性に影響を及ぼすことを意味し、大きな知見となった。

(3) パルス電流印加法における積層ジョセフソン接合の発熱評価

多積層固有ジョセフソン接合における自己発熱効果を調べるためには発熱の影響が無視できるジョセフソン接合の I - V 特性を実験的に調べる必要がある。図 3 に素子サイズ $300 \times 70 \mu\text{m}^2$ 接合数 250 接合の試料において低周波交流およびパルス電流印加法を用いて測定した。

低周波交流電源による測定の場合はほぼ

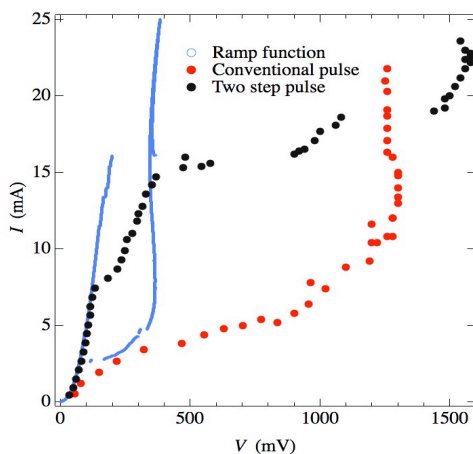


図 3 固有ジョセフソン接合の電流印加法の違いによる電流電圧特性

直流測定と見なすことができ、臨界電流は約 16 mA であり、電圧状態では大きな発熱に起因する負性抵抗領域が確認され電圧値も理論から予測される電圧よりも発熱により大き

く抑制されていることが確認された。

一方、パルス電流印加法による測定においてはパルスの立ち上がりから 200 ns 経過時点での電流及び電圧をオシロスコープで読み取ることで、発熱が極めて小さい状態での測定に成功した。また臨界電流よりも小さいいわゆる低バイアス領域での I - V 特性は 2 段パルス波形を用いて無磁場化で測定することに成功した。今後は接触抵抗部分からの発熱の影響を実験的に調査する予定である。

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 1 件)

(1) Dai Oikawa, Yu Higashi, Hideaki Murotani, Hiroya Andoh, Toko Sugiura and Takehiko Tsukamoto, Transport Properties of Melt-Cast-Processed Bi-2212 Bulk Superconductor Bars, IEEE Transaction on Applied Superconductivity vol.25 issue 3. 6800304(2015)

DOI:10.1109/TASC.2014.2360584 査読有

[学会発表] (計 6 件)

①岩塚紳矢, 及川大, 室谷英彰, 杉浦藤虎, 安藤浩哉, 塚本武彦, パルス電流印加法を用いたメサ型固有接合の発熱評価, 第 62 回応用物理学会春季学術講演会, 2015 年 3 月 11 日~3 月 14 日, 東海大学

②及川大, 岩塚紳矢, 室谷英彰, 杉浦藤虎, 塚本武彦, 接触抵抗が固有ジョセフソン接合の自己発熱に与える影響, 第 75 回応用物理学会秋季学術講演会, 2014 年 9 月 17 日~9 月 20 日, 北海道大学

③及川大, 塚本武彦, 室谷英彰, 杉浦藤虎, Bi-2212 固有ジョセフソン接合における自己発熱効果の評価, 第 61 回応用物理学会春季学術講演会, 2014 年 3 月 17 日~3 月 20 日, 青山学院大学

④Dai Oikawa, Yu Higashi, Hideaki Murotani, Toko Sugiura, Hiroya Andoh and Takehiko Tsukamoto, Transport Properties of Melt-cast Processed Bi-2212 Bulk Superconductor Bars, Applied Superconductivity Conference, 2014 年 8 月 10 日~8 月 15 日, シャーロット

⑤ Dai Oikawa, Yu Higashi, Hideaki Murotani, Toko Sugiura, Hiroya Andoh and Takehiko Tsukamoto, Evaluation of Self-heating Effect in Bi-2212 Intrinsic Josephson Junction Stacks, Applied Superconductivity Conference, 2014 年 8 月 10 日~8 月 15 日, シャーロット

⑥田村晃一, 及川大, 八巻和弘, 入江晃亘, 固有ジョセフソン接合の THz 発振特性に帯す

る接合数の影響，第 74 回応用物理学会秋季
学術講演会，2013 年 9 月 16 日～9 月 20 日，
同志社大学

6. 研究組織

(1) 研究代表者

及川 大 (DAI OIKAWA)

豊田工業高等専門学校 電気・電子システム
工学科 助教

研究者番号：40707808