

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 30 年 9 月 11 日現在

機関番号：13102

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15H03973

研究課題名(和文)共振器結合型Bi-2212単結晶発振器の創成による1THz以上の発振周波数の獲得

研究課題名(英文) Development of resonator-coupled Bi-2212 single crystal oscillator with emission frequencies greater than 1 THz

研究代表者

加藤 孝弘 (Takahiro, Kato)

長岡技術科学大学・工学研究科・助教

研究者番号：10432098

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 12,600,000円

研究成果の概要(和文)：Bi₂Sr₂CaCu₂O₈+ 固有ジョセフソン接合発振器において1THz以上の周波数領域でのコヒーレント発振を目指し、シャント抵抗有する固有接合アレイとストリップライン共振器との結合を試みた。数値計算上必要な素子パラメータを得ることができたが、接合アレイを形成する個々の接合特性の違いを制御できず共振器との結合は達成できなかった。このため発振素子の発振周波数を制限する原因の一つである自己発熱効果低減に向け、自己発熱を実験ならびに数値計算から評価した。得られた結果を素子作製プロセスに反映し自己発熱による素子温度上昇を抑制することに成功し、最高で1.12THzの電磁波放射を観測することに成功した。

研究成果の概要(英文)：We have proposed a the resistively shunted Bi-2212 oscillator coupled with a strip-line resonator to get over 1 THz emission. Although it was possible to obtain device parameters by numerical calculation, it was difficult to control the difference in individual junction characteristics, so that coupling between the oscillator and the resonator could not be achieved. For this reason, self heating was evaluated from experiments and numerical calculations to reduce the self-heating effect, which is one of the causes of limiting the oscillation frequency of Bi-2212 oscillators. As a result of improving the fabrication process based on experiment results and numerical results, the temperature rise due to self-heating of the oscillator was suppressed. And we succeeded in observing electromagnetic radiation of 1.12 THz at the maximum.

研究分野：超伝導エレクトロニクス

キーワード：テラヘルツ発振器 超伝導

1. 研究開始当初の背景

地球環境計測や電波天文学、分光・物性評価の分野においてヘテロダイン受信機の有用性は周知の事実である。例えば電波天文学で使用されるALMA望遠鏡ではヘテロダイン検出器が重要な役割を果たし、さらなる高周波化がこれらの分野では望まれている。極最近になり量子カスケードレーザー(QCL)がTHz帯での連続発振に成功し、超伝導ホットエレクトロンボロメータミキサ(HEBM)と組み合わせたヘテロダイン検出の報告がなされるようになってきたが、QCLは極めて大きな自己発熱のためHEBMとの集積化が困難となっている。また、共鳴トンネルダイオード(RTD)は発振周波数が1.5THzにとどまり、発振周波数の向上は寄生素子の影響によって難しいことが予想される。このため、特に1~3THz帯で動作する発振器の開発が望まれていた。

2. 研究の目的

$\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+\delta}$ (Bi-2212) 固有ジョセフソン接合アレイ発振器において、発振周波数を制限する要因である接合アレイ自身が共振器となるデバイス構造を抜本的に見直し、構造を固有接合アレイとマイクロストリップライン共振器に分け、各々を独立に設計し結合させる方法を提案・実践する。この提案によって、固有接合アレイの自己発熱効果の抑制と同期効果を同時に達成し、1THz以上の周波数領域でのコヒーレント発振を目指す。特に、物性研究としてのBi-2212固有接合からの電磁波放射現象を、高周波工学に基づき“THz発振器”として設計し1THz以上の周波数を埋めるデバイスとしての有用性を示す本研究は当該分野において実践された例がなく、既存の半導体固体発振器である量子カスケードレーザー、共鳴トンネルダイオードの不得意領域を埋める新たな発振器の創成へと繋げることを目的とした。

3. 研究の方法

本課題に用いる固有接合アレイは、微細化に加え素子特性の均一性、安定な電圧バイアスするために電流電圧特性上にヒステリシスが無いことが必要である。またマイクロストリップ共振器と固有接合アレイとの結合には、共振器の設計と素子の出力インピーダンスの評価が重要である。さらに、共振器結合型Bi-2212単結晶発振器のアンテナ等を結合したモノシック化には単結晶の大型化が求められる。このため、本研究では以下の項目について研究を進めた。

- (1) 固有接合アレイの微細化
- (2) 固有接合アレイのインピーダンス検討

(3) 固有接合発振器のテラヘルツ放射の実証

4. 研究成果

上記(1)-(4)の検討課題について以下の研究成果を得た。

(1) 固有接合アレイの微細化

塩酸プロセスを用いて作製した接合面積 $5 \times 5 \mu\text{m}^2$ の固有接合アレイの顕微鏡写真を図1に、電流電圧特性@5K、臨界電流の温度依存性、そのスイッチング分布を図2(a)~(c)に示す。図2(a)から固有接合アレイに印加された最大電圧 V_{max} は約550mV、一接合あたり~5.5mV ($N \sim 100$ junctions)となりジョセフソン発振周波数: $f_j = 2\pi V_{\text{max}} / \Phi_0$ より最大2.75THzの発振が可能であることが分かった。また、図2(b)に示した温度依存性はAB理論と良い一致を示し、図2(c)に示した臨界電流のスイッチング分布は単一ピークの正規分布を示し均一性の高い素子作製技術の確立を達成した。

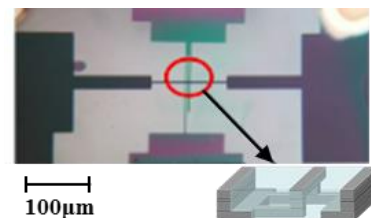


図1 塩酸プロセスによって作製した微小面積固有ジョセフソン接合アレイ構造

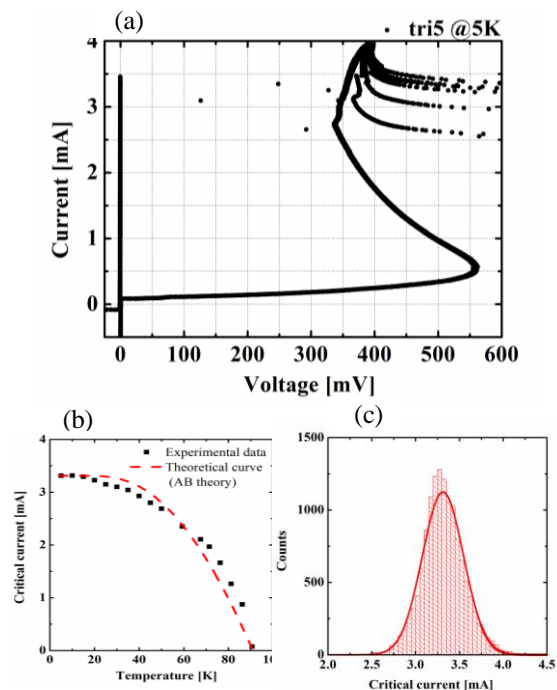


図2 (a)塩酸処理プロセスで作製した固有接合のIV特性@5K (b)臨界電流の温度依存性 (c)臨界電流のスイッチング確立分布@5K

固有接合発振器に安定な電圧バイアスするために電流電圧特性上にヒステリシスが無いことが必要であるが、図 2(a)に示したように固有接合の電流電圧特性にはヒステリシス特性を有するため、発振素子応用にはヒステリシス除去用に外部抵抗シャントが必要である。

大気暴露された Bi-2212 単結晶上に金属を蒸着した場合は大きな接触抵抗のため、シャント抵抗の効果を得ることが難しいため、本研究では真空中で単結晶表面の劈開及び電極となる金属成膜を試みた。図 3 にシャント抵抗を付与した固有接合素子の電流電圧特性を示す。77K の動作温度にて一接合の電流電圧特性上のヒステリシス除去に成功した。ただし、本研究の目的を達成するためにはすべての接合アレイのヒステリシスを取り除く必要があるが本課題では達成することが出来なかった。これは接合アレイを形成する個々の臨界電流値のわずかな違いによりシャント抵抗の効果を実質的には一つの接合にのみ働いてしまうことが原因であった。今後、素子作製プロセスが複雑化するが接合列の側壁にシャント抵抗を直接成膜あるいはイオン打ち込みによって接合端部を劣化させる等の技術によってすべての接合のヒステリシスを取り除くことが可能であると推測される。

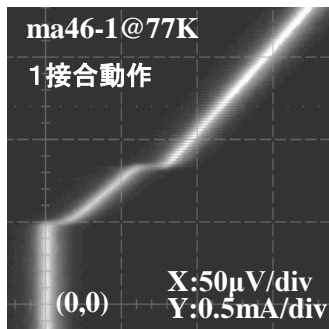


図 3 シャント抵抗を付与した固有接合素子の電流電圧特性

(2) 固有接合アレイのインピーダンス検討

上述の通り本研究期間の間に固有接合列のヒステリシスの完全除去には至らなかったが、今後備えシャント抵抗を備えた素子のインピーダンスに関して数値的検討を行った。電流電圧特性は等価回路モデル(ループインダクタンス $L_S=8.3\text{pH}$ と接合容量 $C_J=8.9\text{pF}$ (バリア厚さ 1.2nm , 比誘電率 $\epsilon_r=10$, 接合面積 $120\mu\text{m}^2$)によって定量的に説明できることを明らかにした(図 4(a)(b)参照)。なお計算は、図 3 に示した素子パラメータを用いて行っている。この計算からインピーダンスは周波数依存性を示し共振周波数 $f_{\text{res}}=1/2\pi(L_S C_J)^{0.5} \sim 20\text{GHz}$ ($V_{\text{res}}=\Phi_0 I_{\text{res}}=40\mu\text{V}$,

$\Phi_0=2.06 \times 10^{-15}\text{wb}$)で最大となり、それ以外は低インピーダンスであることが分かった。つまり共振周波数近傍以外では外部回路との結合が難しく、 $L_S C_J$ 積が外部回路との結合を左右し上限共振周波数の決定因子となる。例えば、素子面積 $25\mu\text{m}^2$ の微小固有接合を用いた場合の接合容量は $C_J=1.8\text{pF}$ であるため、インダクタンスを $L_S=1.0 \sim 0.5\text{pH}$ とした場合に $1 \sim 3\text{THz}$ で高インピーダンスを達成できるため(図 5(c)), 外部共振器との結合に有利に働く。

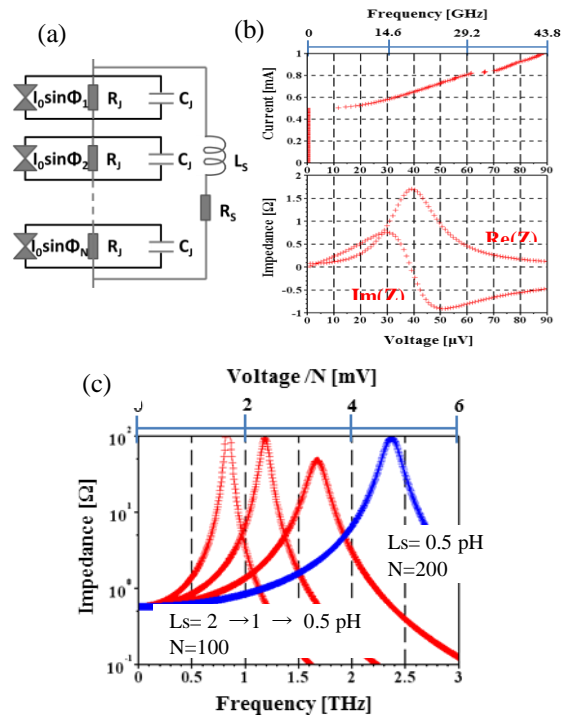


図 4 (a)シャント抵抗を有する固有接合アレイの等価回路モデル (b)電流電圧特性およびインピーダンスの計算結果 (c)インピーダンスの周波数依存性

(3) 固有接合発振器のテラヘルツ放射の実証

当初の計画では、シャント抵抗を有する固有接合発振器と外部共振器との結合によって 1THz 以上の電磁波放射を達成する予定であったが 3 年間の研究計画では達成困難であった。このため、固有接合素子の発振周波数をサブテラヘルツ程度に留める原因である自己発熱効果の影響を取り除く手法から 1THz 以上の電磁波放射達成を検討した。

素子温度を定量的に評価する方法として蛍光体を温度マーカーとした測温方法について検討を行った。図 5 に、アクロスオーガニック社製の Eu 錯体:Europium thenoyltrifluoroacetate を用いて発光の様子を調べた結果を示す。図 5(a)に紫外線を照射した Eu 錯体の発光の様子を、図 5(b)に 615nm のバンドパスフィルターを介

してその発光強度の温度依存性を測定した結果を示す. 本研究では、上記蛍光体以外に、SiC、EuTfC、Eu(TTA)3phen、YVO4:Bi 等について同様の測定を行ったが、発光強度が強く(測定の容易さに影響)かつその温度依存性が線型(データ処理の容易さ)であった、アクロスオーガニック社製のEu錯体:Europium thenoyltrifluoroacetate が温度マーカーとして最適であると判断された. 図6に固有接合の温度イメージング結果と併せて有限要素法による熱解析の結果を示す. 素子温度は、ゼロ電圧状態から電圧状態へとスイッチした同時に非常に大きな発熱、臨界温度90K程度まで上昇することがわかった. 一方でこの温度上昇はBi-2212単結晶を基板へと固定するために用いるポリイミド厚を20 μm から5 μm へと薄くすることで大幅に低減できることを見出した(図6(c)参照). 得られた計算結果をもとに素子作製プロセスを見直しポリイミド厚を1~2 μm まで薄膜化する方法を考案した. 図7に考案した手法によって作製した固有接合の電流電圧特性および電磁波放射特性を示す. 素子温度の実測は行っていないが、ポリイミド厚を薄くした効果が顕著に表れ電流電圧特性に見られる最大印加電圧は最大で2Vに到達した. これに伴い、発振特性は基本波で1.12THzを達成することが可能となった.

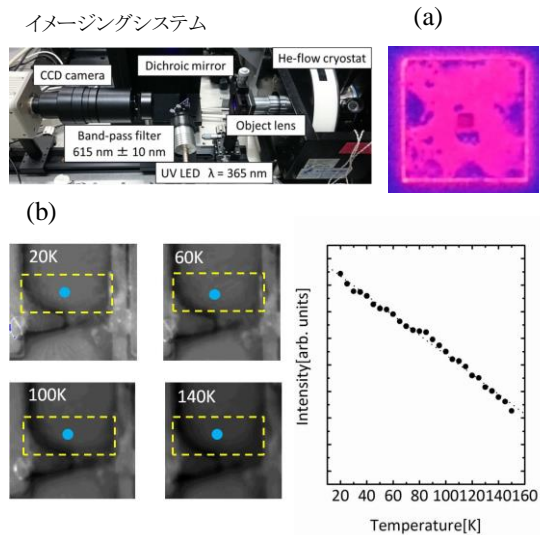


図5 (a)Eu錯体を塗布した試料への紫外線照射時の写真 (b)試料状のマーカー位置の発光強度の温度依存性

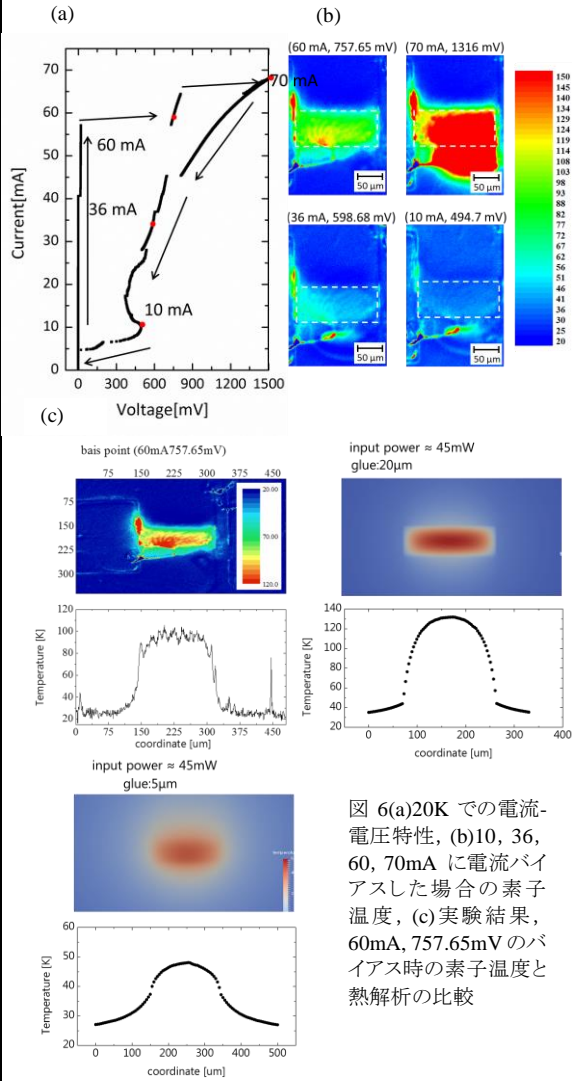


図6(a)20Kでの電流電圧特性, (b)10, 36, 60, 70mAに電流バイアスした場合の素子温度, (c)実験結果, 60mA, 757.65mVのバイアス時の素子温度と熱解析の比較

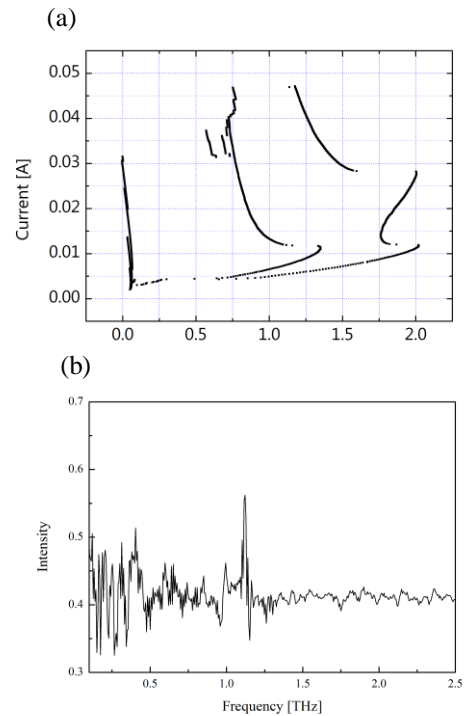


図7 (a)固有接合発振器の電流電圧特性 (b)固有接合発振器の放射特性

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)

[雑誌論文](計 2件)

1. Y. Yamada, N. Mori, T. Atsumi, T. Kato, T. Ishibashi, “Preparation of (11n) Oriented $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+x}$ Thin Films by the Metal-organic Decomposition Method”, *Physics Procedia*, 65, pp.165-168, (2015)
査読有
2. Y. Yamada, T. Kato, T. Ishibashi, T. Okamoto, and N. Mori, “Preparation of (11n) oriented $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+x}$ thin films without c-axis twin structure by the metal-organic decomposition method using vicinal SrTiO_3 (110) substrates”, *AIP Advances*, 8, 015101-1-015101-10, (2018) 査読有

[学会発表](計 7件)

1. 加藤 孝弘、西方 翼、小瀧 侑央、安井 寛治、末松 久幸、石橋 隆幸、川上 彰、“両面加工法で作製した Bi 系固有接合スタックの自己発熱効果”、第 76 回応用物理学会秋季学術講演会
2. 山田 靖幸、加藤 孝弘、石橋 隆幸、森夏樹、“MOD 法により作製した(11n)配向 $\text{Bi}_2\text{212}$ 薄膜の面内異方性” 第 76 回応用物理学会秋季学術講演会
3. 山田 靖幸、加藤 孝弘、石橋 隆幸、岡元 智一郎、“傾斜基板を用いた MOD 法による双晶構造のない(11n)配向 $\text{Bi}_2\text{212}$ 薄膜の作製” 第 63 回応用物理学会春季学術講演会
4. 加藤 孝弘、川上 彰、“塩酸改質プロセスパラメータが Bi-2212 固有接合テラヘルツ放射素子の特性に与える影響”、第 77 回応用物理学会秋季学術講演会
5. 小野 佑太、加藤 孝弘、内富 直隆、石橋 隆幸、川上 彰、“両面加工法で作製した Bi 系固有接合スタックの自己発熱効果Ⅱ” 第 77 回応用物理学会秋季学術講演会
6. 加藤 孝弘、イッファ ファーハナ、鶴沼 毅也、八巻 和宏、入江 晃亘、“ BiOCl 結晶におけるテラヘルツ領域の複素屈折率の評価”、第 78 回応用物理学会秋季学術講演会

7. 山田 容士、西尾 優樹、荒川 幸治、船木 修平、加藤 孝弘、“テラヘルツ波発振用の単結晶 $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_x$ のフラックス成長”、第 78 回応用物理学会秋季学術講演会

[その他]

特になし

6. 研究組織

(1)研究代表者

加藤 孝弘(Takahiro Kato)

長岡技術科学大学 工学研究科・助教

研究者番号:10432098

(2)研究分担者

山田 容士(Yasuji Yamada)

島根大学 学術研究院理工学系 教授

研究者番号: 10362906

(3)研究分担者

川上 彰(Akira Kawakami)

国立研究開発法人情報通信研究機構 未来

ICT 研究所フロンティア創造総合研究室 主

任研究員

研究者番号: 90359092