

機関番号：82108
 研究種目：基盤研究(C)
 研究期間：2008～2010
 課題番号：20510121
 研究課題名(和文) 高温超伝導ジョセフソン接合を用いたテラヘルツ波発振素子の性能最適化：理論的研究
 研究課題名(英文) Theoretical study on optimization of THz-wave emission device using Josephson junction of high-temperature superconductors
 研究代表者
 野々村 禎彦 (NONOMURA YOSHIHIKO)
 独立行政法人物質・材料研究機構・計算科学センター・主任研究員
 研究者番号：30280936

研究成果の概要(和文) 生物学・医学等への幅広い応用が期待される周波数1テラヘルツ前後の電磁波は、電気回路や光学的手法では安定生成が困難だったが、超伝導層と絶縁層が交互に積み重なった高温超伝導物質の構造を用いて安定発振が最近可能になった。数値モデルの大規模数値計算で素子の発振性能を調べると、表面インピーダンス Z が重要な役割を果たしている。磁場を含まない系では空洞共鳴に相当する電流で発振は最大になり、 Z を変化させると基本共鳴モードは $Z=50$ 近傍で最適化される。層状構造に平行な磁場に対する発振強度の依存性は、 $Z>50$ では零磁場での発振が最大で単調減少、 $Z<50$ では弱い有限磁場での発振が最大になる。

研究成果の概要(英文) : Electromagnetic wave with frequency around 1 THz is expected to have a wide range of applications in biological and medical fields. Although it has been difficult to generate such stable electromagnetic wave with conventional electric or optical devices, stable emission of such wave became possible recently using intrinsic Josephson junctions of high- T_c superconductors. I investigated emission properties of such devices by large-scale numerical simulations of an established theoretical model and found that the surface impedance Z is crucial. Without magnetic fields emission becomes maximum when the bias current corresponding to the cavity resonance is applied, and the optimal emission is obtained around $Z=50$ for the fundamental mode. When magnetic fields along junctions are applied, emission intensity takes a maximum value at zero field and monotonically decreases as the field increases for $Z>50$, while it takes a maximum value for a small but finite magnetic field for $Z<50$.

交付決定額

(金額単位：円)

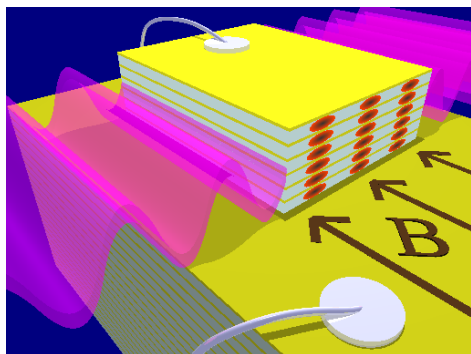
	直接経費	間接経費	合計
2008年度	1,700,000	510,000	2,210,000
2009年度	1,000,000	300,000	1,300,000
2010年度	800,000	240,000	1,040,000
年度			
年度			
総計	3,500,000	1,050,000	4,550,000

研究分野：物性理論

科研費の分科・細目：ナノ・マイクロ科学／ナノデバイス

キーワード：計算物理、超伝導材料・素子、ジョセフソン接合、テラヘルツ波発振、表面インピーダンス、動的相転移、磁場誘起相転移

1. 研究開始当初の背景



電子回路技術と光学技術の狭間にあるテラヘルツ領域の電磁波を取り出すことは難しく、「テラヘルツ・ギャップ」と呼ばれてきた。この周波数領域は生体分子の共鳴周波数に対応し、安定波源の開発は、バイオテクノロジーやセキュリティ・チェックなど、幅広い応用が期待される。結晶自体がジョセフソン接合の機能を持つ $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_8$ 等の銅酸化物高温超伝導物質（厚さ数Åの超伝導層と厚さ 10 数Åの絶縁層が交互に積み重なっている）を用い、超伝導面に平行に磁場を印加して直流電流でジョセフソン渦糸を駆動すると、テラヘルツ領域のジョセフソンプラズマが励起されることが、小山・立木によって理論的に提案された (T. Koyama and M. Tachiki, *Solid State Commun.* 96, 367 (1995): 上図参照)。この励起モードを電磁波として取り出せば、位相を揃えて連続発振する周波数可変なテラヘルツ波源が得られる。この理論的提案では基礎方程式（複雑な非線形連立偏微分方程式）を線形近似して解析を行ったが、10 年を経て基礎方程式が直接解かれ、テラヘルツ波発振が数値的に示された (M. Tachiki et al., *Phys. Rev. B* 71, 134515 (2005))。この研究を追うように、外部磁場中の固有ジョセフソン接合でテラヘルツ波発振が実験的に観測され始めた（例えば K. Kadowaki et al., *Physica C* 437, 111 (2006); M.-H. Bae et al., *Phys. Rev. Lett.* 98, 027002 (2007))。また、発振の基本的機構はジョセフソンプラズマの空洞共鳴だと示唆する数値的研究 (S.-Z. Lin et al., *Phys. Rev. B* 77, 014507 (2008)) も現れ、固有ジョセフソン接合を用いたテラヘルツ波発振の研究は新たな段階に入った。

2. 研究の目的

テラヘルツ波発振の存在が確立し、発振の効率化に関心が移った研究状況を踏まえ、発振強度などが定量的に評価できる境界条件を見出すことが最初の目的になる。さらに最近、外部磁場を含まない固有ジョセフ

ソン接合系でもテラヘルツ波発振が実験的に確認された (L. Ozyuzer et al., *Science* 318, 12791(2007))。磁場中の系と外部磁場を含まない系は、現状では実験条件が大きく異なるため別物として扱われているが、基本的なメカニズムはどちらもジョセフソンプラズマの空洞共鳴であり、両者は連続していると考えられる。そこで、両者を連続的に繋ぐ定式化を行って発振を最適化することを最終的な目的とする。

3. 研究の方法

固有ジョセフソン接合におけるジョセフソンプラズマ励起は、ゲージ不変位相差と超伝導面内の電荷密度を変数とする非線形連立偏微分方程式 (T. Koyama and M. Tachiki, *Solid State Commun.* 96, 367 (1995)) として定式化されてきた。超伝導面に平行な外部磁場中では、低温では系は外部磁場方向に一樣であり、超伝導層に垂直な方向には不連続（電荷密度は各超伝導層で異なる）、超伝導層に沿って外部磁場と垂直な方向には連続な 2 次元系で記述される。数値計算では連続な方向を数値グリッドに分割し、変数の空間変化を差分近似で評価して大規模連立微分方程式の時間発展を追う。この計算手法で観測される接合内のプラズマ励起がテラヘルツ領域の周波数を持ち、接合表面から外部へ十分な強度を持った電磁波として放出されている時、テラヘルツ波発振が起こっている。

4. 研究成果

高温超伝導ジョセフソン接合を用いたテラヘルツ波発振では、従来は接合面に並行に磁場を印可し、ジョセフソン渦糸を直流電流で駆動して発振させる機構が主に研究されてきたが、磁場を印可しない方が容易に発振が起こることが最近実験的に示された。この新しい発振機構では接合を 1000 層程度、従来研究されてきた系よりも 2 桁近く厚く積み、発振する電磁波の波長も従来よりも 1 桁以上長くなる。我々は、この実験を踏まえて数値的研究を進めた（論文 1 は本課題開始前の予備的結果であり、詳細は省く）。

(1) まず、厚さは無限大、幅は実験と同程度（侵入長の数分の 1）の接合に磁場を印可した場合には、ジョセフソン渦糸の間隔が電磁波の波長と等しくなる点の近傍で発振強度が比較的鋭いピークを持つ、従来調べられてきた磁場中発振と同様の振舞を示す。発振の周波数は交流ジョセフソン関係で与えられ、印可する電流が臨界電流に達しない範囲で、いわゆるテラヘルツ・ギャップに相当する周波数は覆われる（論文 2）。

(2) 他方、接合の厚さは実際には有限で、1000 層程度積んでも発振する電磁波の波長

よりも薄く、接合と大気の誘電率の差も大きいため、接合の表面インピーダンス Z は 1 よりも大きくなる。そこで Z の値を連続的に変化させて磁場を印可しない系の動的相図を求め、従来提案されていたいくつかの発振状態は、バイアス電流 J と Z の変化に応じた定常発振状態として包括的に記述できることを示した。また、この系の基本共鳴モードでは $Z=50$ 近傍、高周波共鳴モードでは順次これよりも大きな Z の値で発振は最適化されることを示した (論文 3・4)。

(3) 零磁場でテラヘルツ波発振を示す系に接合面に平行に磁場を印可した場合の発振状態を調べ、実験で報告されている発振強度の磁場依存性の矛盾 (特定の磁場でピークを示すか、磁場とともに単調減少するか) は、表面インピーダンス Z の値に応じた磁場依存性のクロスオーバー ($Z=50$ が境になる) として理解できることを示した。また発振強度の磁場依存性における特徴的なピークは、 π 位相 kink 状態・非整合位相 kink 状態・一様位相状態の磁場誘起動的相転移と密接な関係があることがわかった (非整合位相 kink 状態の中間で急峻に立ち上がるピークと、一様位相状態の緩やかなピークがひとつずつ存在する)。さらに接合数を系統的に変えた計算を行うと、 π 位相 kink 状態と非整合位相 kink 状態の臨界磁場は接合数に反比例して零に近づき、零磁場での発振ピークはこの臨界磁場での発振強度の谷に打ち消される一方、非整合位相 kink 状態の発振ピーク強度は接合数を増やしても減少せず、ピークの形状は接合数とともに鋭くなり、ピーク磁場は接合数とともに減少するが有限値に飽和するように見える。他方、一様位相状態の発振ピークの形状は接合数に殆ど依存しない。すなわち実験で報告された 2 ピーク構造が数値的に確認された。なお、東日本大震災の影響で最終段階の計算が若干遅れているが、論文投稿に向けた詰め段階に入っている (論文 5 は予備的結果)。

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 5 件)

- (1) Yoshihiko Nonomura, Numerical study on effects of surface impedance and external magnetic fields in THz wave emission from intrinsic Josephson junctions, *Physica C: Superconductivity*, 査読有, vol. 470, 2010, pp. S824-S826
- (2) Yoshihiko Nonomura, THz wave emission from intrinsic Josephson junctions controlled by surface impedance, *Journal of Superconductivity and Novel*

Magnetism, 査読有, vol. 23, 2010, pp. 601-604

(3) Yoshihiko Nonomura, Stationary phase-kink states and dynamical phase transitions controlled by surface impedance in terahertz wave emission from intrinsic Josephson junctions, *Physical Review B*, 査読有, vol. 80, 2009, 140506(R) (1-4)

(4) Yoshihiko Nonomura, Terahertz wave emission from a long intrinsic Josephson junction: numerical study on effect of in-plane fields in an experimental scale, *Journal of Physics: Conference Series*, 査読有, vol. 150, 2009, 052191 (1-4)

(5) Yoshihiko Nonomura, Effect of sample sizes in terahertz emission from intrinsic Josephson junctions in cuprate HTSC, *Physica C: Superconductivity*, 査読有, vol. 468, 2008, pp. 644-648

[学会発表] (計 17 件)

(1) Yoshihiko Nonomura, Numerical study on THz wave emission from intrinsic Josephson junctions controlled by surface impedance, *Materials and the Imagination*, 2011 年 1 月 5 日, Aspen Center for Physics, Aspen, Colorado, 米国

(2) 野々村 禎彦, 固有ジョセフソン接合の THz 波発振: 磁場中発振の接合数依存性と実験との比較, 第 18 回渦糸物理国内会議, 2010 年 12 月 2 日, 原子力機構計算科学センター, 上野, 東京都

(3) 野々村 禎彦, 固有ジョセフソン接合の THz 波発振: 零磁場中発振条件下での磁場の影響 III, 日本物理学会 2010 年秋季大会, 2010 年 9 月 26 日, 大阪府立大学, 堺市, 大阪府

(4) Yoshihiko Nonomura, Numerical study on terahertz wave emission from intrinsic Josephson junctions: Junction-number dependence of emission behaviors under the periodic boundary condition along junctions, *PLASMA 2010*, 2010 年 5 月 1 日, 弘前大学, 弘前市, 青森県

(5) 野々村 禎彦, 固有ジョセフソン接合の THz 波発振: 零磁場中発振条件下での磁場の影響 II, 日本物理学会第 65 回年次大会, 2010 年 3 月 23 日, 岡山大学, 岡山市, 岡山県

(6) Yoshihiko Nonomura, THz wave emission from intrinsic Josephson junctions in in-plane magnetic fields controlled by surface impedance, *APS March Meeting 2010*, 2010 年 3 月 15 日, Oregon Convention Center, Portland, Oregon, 米国

(7) Yoshihiko Nonomura, Numerical study

on THz wave emission from intrinsic Josephson junctions controlled by surface impedance without or with in-plane magnetic fields, TeraMat Conference, 2009年12月18日, Benasque, Barcelona, スペイン

(8) 野々村 禎彦, 固有ジョセフソン接合における THz 波発振: 磁場中発振の表面インピーダンス依存性, 第 17 回磁束線物理国内会議, 2009年12月2日, 大阪府立大学中之島サイト, 大阪市, 大阪府

(9) 野々村 禎彦, 固有ジョセフソン接合の THz 波発振: 零磁場中発振条件下での磁場の影響, 日本物理学会 2009 年秋季大会, 2009年9月27日, 熊本大学, 熊本市, 熊本県

(10) Yoshihiko Nonomura, THz wave emission from intrinsic Josephson junctions controlled by surface impedance, New³-SC7 Conference, 2009年5月15日, 北京, 中華人民共和国

(11) 野々村 禎彦, 固有ジョセフソン接合の零磁場中 THz 波発振における表面効果, 日本物理学会第 64 回年次大会, 2009年3月30日, 立教大学, 池袋, 東京都

(12) Yoshihiko Nonomura, Dynamical phase transition controlled by surface impedance in THz wave emission from intrinsic Josephson junctions, Joint JSPS-ESF International Conference 2009, 2009年3月25日, オークラフロンティアホテルつくば, つくば市, 茨城県

(13) Yoshihiko Nonomura, Surface effects in THz wave emission from intrinsic Josephson junctions, American Physical Society (APS) March Meeting 2009, 2009年3月16日, David L. Lawrence Convention Center, Pittsburgh, 米国

(14) 野々村 禎彦, 固有ジョセフソン接合の THz 波発振: 表面インピーダンスによる発振状態変化, 第 16 回渦糸物理国内会議, 2008年12月9日, 東京工業大学, 大岡山, 東京都

(15) 野々村 禎彦, 固有ジョセフソン接合の THz 波発振: 零磁場中 McCumber 状態の磁場応答, 日本物理学会 2008 年秋季大会, 2008年9月23日, 岩手大学, 盛岡市, 岩手県

(16) Yoshihiko Nonomura, Terahertz wave emission from intrinsic Josephson junctions: Numerical study on effect of in-plane fields and system size, 32nd International Workshop on Condensed Matter Theories (CMT32), 2008年8月15日, Loughborough University, Loughborough, 英国

(17) Yoshihiko Nonomura, Terahertz wave

emission from a long intrinsic Josephson junction: numerical study on effect of in-plane fields in an experimental scale, 25th International Conference on Low Temperature Physics (LT25), 2008年8月12日, RAI Congress Center, Amsterdam, オランダ

6. 研究組織

(1) 研究代表者

野々村 禎彦 (NONOMURA YOSHIHIKO)

独立行政方針物質・材料研究機構, 計算科学センター, 主任研究員

研究者番号: 30280936

(2) 研究分担者

田中 秋広 (TANAKA AKIHIRO)

独立行政方針物質・材料研究機構, 環境・エネルギー材料萌芽ラボ, 主幹研究員

研究者番号: 10354143

河野 昌仙 (KOUNO MASANORI)

独立行政方針物質・材料研究機構, 国際ナノアーキテクニクス研究拠点, MANA 研究者

研究者番号: 40370308