

高温超伝導物質によるテラヘルツ連続波の 発振における不安定性の研究

(財) 高度情報科学技術研究機構 飯塚 幹夫

1. 調査・研究の目的

本調査・研究では、高温超伝導物質によるテラヘルツ連続波の発振における不安定性の特性、その制御性について明らかにする研究を行なった。

テラヘルツ (10^{12} Hz) 波は、電波(高々数百ギガヘルツ)と赤外光との間の周波数領域にあり、幅広い応用の可能性が指摘されているにもかかわらず、これまで適切な発振技術(光源)が難しく未発達なため、現在でも利用が極めて限られる電磁波である。

テラヘルツ波の発振装置に関しては近年、いろいろな方式で発振法の研究が進められているが、本調査・研究で対象とするのは、世界に先駆ける我国独自の新方式[1]であり、高温超伝導物質に磁場と電流を印加して生じるジョセフソンプラズマ発振を発振体の中で成長させ、外部に取り出すものである。しかし、その発振は、量子化した磁場、超伝導電流、電磁場が複雑にからみあう非線形現象であるため、実用的素子の発振条件を解析的な手法や実験的探索で行うことはほぼ不可能に近い。たとえ、その発振を小規模の計算機資源でシミュレーションしても、パラメータ一個の計算でも数年もかかり、とても開発に役立たない。そこで、本報告者のグループによって、わが国が誇る大規模な計算機資源である地球シミュレータを用いた数年にわたる大規模シミュレーションの結果、世界に先駆けて発振の具体的な条件が明らかにされた[2]。最近、その結果に基づいた実証実験が世界中で行われはじめ、一部の実験から発振の兆候が見出されたとの報告もある。しかし、実用化に向けたテラヘルツ発振装置開発のためには、高温超伝導物質を用いた素子内部のジョセフソンプラズマ発振の不安定性の特性を把握し、それを制御する課題が残されている。

そこで本調査・研究では、高温超伝導物質によるテラヘルツ連続波発振装置の発振条件のうち、ジョセフソンプラズマ発振の不安定性について地球シミュレータを用いた大規模シミュレーションで解明し、不安定性を抑制し安定な連続発振のための運転条件制御法を示し、今後の実用装置開発に対しての設計指針を得ることを目的とした。

2. 研究方法

高温超伝導物質内のジョセフソンプラズマ発振のシミュレーションには、原子スケールからマイクロスケールオーダーの素子寸法スケールでの強非線形現象を精度よく解析する時間・空間のマルチスケール、大規模シミュレーションが必要不可欠である。そこで、本調査研究では、地球シミュレータを用いた大規模シミュレーションにより、高温超伝導物質によるテラヘルツ連続波の発振における不安定性の研究を行った。詳細なシミュレーションの内容は以下のようである。

内部励起の不安定性に関わる因子(層数、素子長さ、超伝導層・絶縁層厚さ、磁場の侵入長、電気伝導度、印加する磁場、電流)を変化させた系統的シミュレーションを行った。具体的には、はじめに物理的検討により、因子として磁場、層数、外部磁場を主要な要因と推定し、その因子を主に変化させた。プログラムの高度化は、高速化とデータの後処理機能向上を主に行なった。このプログラムを用いて、地球シミュレータ上で因子を変化させた系統的シミュレーションを行った。外部放射に関しては、これまでの計算結果の分析による検討を行った。以上より以下の結果を得た。

3. 研究結果

本研究により、安定な連続発振を行うために必要な装置運転制御法の指針に関し以下のことが分かった。

- ・ 外部磁場が、連続発振を安定に行うために最も効くことが分かった。
- ・ 外部磁場を小さくしていくと、連続発振が不安定になることが分かった。このような不安定性は、磁場の侵入長を小さくすると緩和する傾向があることが分かった。
- ・ 特に重要な $1\sim 4$ THz の周波数帯で、励起する周波数帯を拡大しつつ安定的に連続発振するためには外部磁場を小さくすることが有効であると分かった。
- ・ 発振強度の安定化は、本素子では自動的に達成されることが期待できることが分かった。

以下に詳細を示す。

(1) 不安定性を抑制し安定的に連続発振を行う条件

外部磁場の大きさを振って連続発振の不安定性を調べた。外部磁場を小さくしていくと、励起が不安定になる傾向があることが分かった。安定な励起の場合は、電圧とジョセフソンプラズマ振幅の関係が釣鐘状の曲線になるのに対し、励起が不安定になると鋸状的曲線となる(図-1)。このときのジョセフソンプラズマの電場分布は、針状の電場が滑らか分布を作る複雑なものである(図-1)。このような不安定性は、磁場の侵入長を小さくすると緩和する傾向があることが分かった。

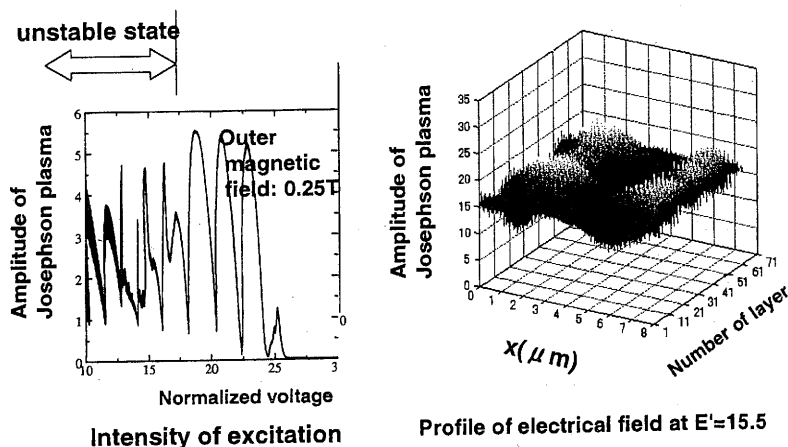


図-1 励起の不安定、安定点の電場振幅曲線と電場形状

(2) 励起する周波数帯を拡大しつつ安定的に連続発振するための条件

周波数可変な素子を開発するためには、励起する周波数帯を拡大しつつ安定的に連続的に発振させる必要がある。そのためには、外部磁場を小さくする方向が有利であることが分かった。あまり磁場が小さいと、(1)で述べた不安定性が発生するが、磁場の侵入長を調整することにより安定化させることが可能である。

このような、励起する周波数帯を拡大しつつ安定的に連続発振を可能にするメカニズムは、以下のようにフラクソン分布の柔軟性に関係していることが分かった。これまでは、高磁場を想定し、フラクソン(量子磁束)の相互作用が強いためフラクソンは外部磁場から決まる間隔を持つ規則格子となると仮定されてきた[4]。そのため、励起のピークは1つであると予測されていた[4]。我々の以前の研究[2,3]では、粗い励起探索により励起しているポイントを1点選び条件を固定し、電圧を変更(外部電流による)して詳しく発振を調べた。今回は、素子境界でジョセフソンプラズマを完全反射させた内部励起に焦点を絞り調べた。我々の以前の研究[2,3]と今回の調査・研究、どちらでも同じように、シミュレーション結果では、不規則なフラクソンが固まり(クラスター)を作るような結果が得られた(図-2)。この点は、以前の研究成果[2,3]の発表でも議論の中心となったもので、新しい発見に繋がる部分である。さらに、詳細に調べると、フラクソンクラスターの間隔が電圧(周波数)上昇と伴に変化し、cavity励起のジョセフソンプラズマの波長と同調していることが分かった。このようなフラクソン分布の柔軟性が広い周波数帯で強い励起を連続的に起こしている要因であることが分かった。さらに、このフラクソン分布の柔軟さは、磁場が小さい程増すことが分かった。

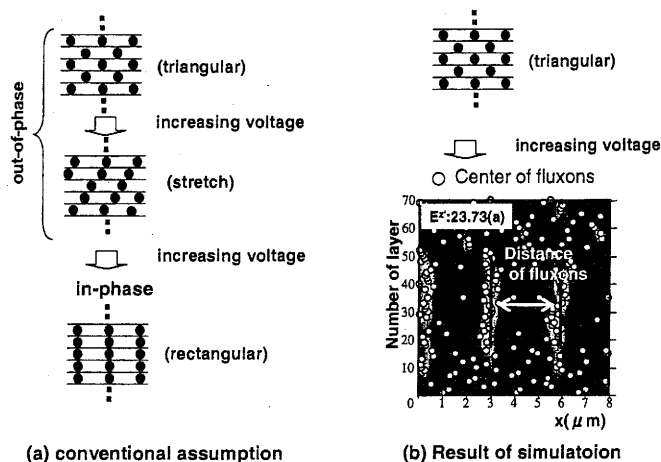


図-2 フラクソン分布

(3) 発振強度の安定化

発振の強度は、周波数の上昇とともに強弱を繰り返す。これは、周波数の変化にともなう cavity 励起波数の遷移によるものであることが分かった。この発振の強弱は、外部放射による完全反射からの反射率の減少により定在波比が小さくなり、定在波の節に振幅が現れることにより強弱の平滑化が進む（定在比 = $(1 + \text{反射係数}) / (1 - \text{反射係数})$: 定在波のなかで最大の振幅を持つ定在波の振幅と最小の振幅を持つ定在波の振幅の比）。すなわち、発振強度の安定化は、本素子では自動的に達成されることが分かった。これは応用上非常に有利である。

4. 期待される効果

この調査研究の結果は、高温超電導物質によるテラヘルツ連続波発振装置の発振条件について、不安定性を抑制し安定な連続発振のための運転条件制御法を提示した。また、それは今後の実用的な装置開発に対して具体的な設計指針を与え、それによって国内のテラヘルツ発振装置の開発を促進する効果が期待できる。

5. まとめ

地球シミュレータを用いた大規模シミュレーションにより、高温超電導物質によるテラヘルツ連続波発振装置の発振条件について、不安定性を抑制し安定な連続発振のための運転条件制御法を示し、今後の実用装置開発に対しての設計指針を得た。この成果により高温超伝導物質によるテラヘルツ連続波発振装置の実用的開発を促進することが期待できる。

参考文献

- 1) M. Tachiki, T. Koyama, and S. Takahashi, Electromagnetic phenomena related to a low frequency plasma in cuprate superconductors, Phys. Rev. B 10, (1994) 7065.
- 2) M. Tachiki, M. Iizuka, K. Minami, S. Tejima, and H. Nakamura, "Emission of continuous coherent terahertz waves with tunable frequency from intrinsic Josephson junctions", Phys. Rev. B 71, 134515 (2005).
- 3) M. Tachiki, M. Iizuka, K. Minami, S. Tejima and H. Nakamura, Emission of continuous terahertz waves by high Tc superconductor, Physica C., (2005), 426-431.
- 4) A. E. Koshelev and I. Aranson, Dynamic structure selection and instabilities of driven Josephson lattice in high-temperature superconductors, Phys. Rev. B 64, (2001) 174508.