

氏名(本籍)	カーベ デルファンアザーリ (イラン)			
学位の種類	博士(工学)			
学位記番号	博甲第6401号			
学位授与年月日	平成25年3月25日			
学位授与の要件	学位規則第4条第1項該当			
審査研究科	数理物質科学研究科			
学位論文題目	High-T_c Superconducting Terahertz Oscillating Devices with the Triangular Mesa Structures (三角形メサ構造を持つ高温超伝導テラヘルツ波発振素子)			
主査	筑波大学教授	理学博士	服部利明	
副査	筑波大学教授	理学博士	門脇和男	
副査	筑波大学教授	理学博士	胡 曉	
副査	筑波大学准教授	博士(工学)	武内修	
副査	Associate Professor	Ph.D.	Richard A. Klemm (University of Central Florida)	

論文の内容の要旨

テラヘルツ波はマイクロ波と赤外線との間の周波数を持つ電磁波であり、様々な分野への応用が期待されている。しかし、幅広い応用のためには、コンパクトかつ高出力の発振源が必要であり、その開発が待たれる。2007年に初めて報告された、固有ジョセフソン接合を有する高温超伝導体 $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+\delta}$ (Bi-2212) からの強力なコヒーレント・テラヘルツ波発生は、そのようなテラヘルツ波源の有力な候補である。しかし、固有ジョセフソン接合からのテラヘルツ波発生に関しては、発振の詳細な物理機構が解明されておらず、また現状のテラヘルツ波出力は最大で数 mW 程度であり、さらなる高出力化が必要である。

二つの超伝導体で薄い絶縁体を挟んだものであるジョセフソン接合に電圧 V を印加すると周波数 $\nu = (2e/h)V$ の交流電流が流れる。これが交流ジョセフソン効果である。ここで e は素電荷、 h はプランク定数である。高温超伝導体 Bi-2212 は、単結晶内に固有のジョセフソン接合を有しており、その数は 1mm の厚さの結晶で 600 層になる。そこに電圧を印加すると、多くのジョセフソン接合が結合し、同期して発振することにより、大出力のテラヘルツ波が発生すると考えられている。発生するテラヘルツ波の周波数は、交流ジョセフソン効果と共振器効果の両者を満足することが知られているが、どちらがより重要であるかは不明であった。

本研究では、それらの多くの課題を解決するために、さまざまな三角形のメサ構造をもつ Bi-2212 素子を作製し、それらのテラヘルツ波発振特性を調べた。これまでおもに用いられていたメサ構造は長方形であり、また円形メサからのテラヘルツ波発生も確認されているが、三角形のメサ構造を用いることは全く初めての試みである。用いた Bi-2212 は FZ 法により作成された単結晶であり、それを FIB 法によって三角形のメサ型の形状に加工した。試みた試料形状は、サイズ数十から数百 μm の正三角形、直角二等辺三角形、および細長い 2 等辺三角形の 3 種類である。それぞれについて、電圧を印加することでテラヘルツ波の発振の得ることができた。それらの素子の電流-電圧特性、発生するテラヘルツ波の周波数、およびテラヘルツ波出力

の角度分布を測定した。また、有限差分時間領域法 (FDTD) 法と解析的な方法で各形状のアンテナの共振周波数を計算したところ、すべての場合において、実験結果とよい一致を示した。細長い 2 等辺三角形のアンテナにおける共振モードの理論の報告がこれまでにないので、本研究で新たにパイ型のアンテナの共振器モードの周波数に関する理論を提出した。その結果は三角形形状に対する FDTD 計算の結果とよく一致している。

以下に、実験結果とそれをもとにした考察を述べる。

正三角形および直角二等辺三角形のメサから得られたテラヘルツ波の周波数は、交流ジョセフソン効果と共振器効果の両者を満足するものであった。それぞれサイズの異なる試料からは、周波数とそのサイズに反比例するテラヘルツ波が得られた。具体的には 1 辺の長さが 85, 90, 102.5 μm の正三角形メサからはそれぞれ 0.568, 0.530, 0.467 THz のテラヘルツ波が得られ、辺の長さと同周波数にはよい反比例関係がみられるが、これは共振器効果がよく働いていることを示している。また、側辺 86 μm の直角二等辺三角形からは 0.580 THz のテラヘルツ波が得られた。得られた周波数は、どちらの場合も、それぞれの形状のアンテナの共振器モードのうちの基本モードの周波数とよく一致していた。

それに対して、細長い 2 等辺三角形では、交流ジョセフソン効果を満足する電圧において、幅広い周波数可変性が得られた。高さ 340 μm の 2 等辺三角形から得られたテラヘルツ波の周波数は、温度にも依存するが、可変範囲は最大で 0.495 から 0.934 THz と 47% に及んだ。このように広い周波数可変域はこれまでこの種のテラヘルツ波源では全く観測されていないものであり、周波数可変光源として、また多数の素子間の結合による同相発振などへの応用に役立つものである。また、テラヘルツ波のパワーは、周波数に対して弱いピーク構造を有しており、そのピーク周波数は共振器の共鳴モードに対応していることが示された。それらの結果から、細長い 2 等辺三角形のメサ構造では、共振器効果の優位性が低くなり、よい共振器モードが存在しない周波数においても、印加電圧に対して交流ジョセフソン効果を満足する周波数のテラヘルツ波が発生すると考えることができる。

審査の結果の要旨

本論文では、高温超伝導体からのテラヘルツ波発生機構の解明とさらなる特性改善の二つを同時に進めるために三角形形状という新しいメサ構造の素子を多数作成し、それら一連の素子のテラヘルツ波発生特性を調べた。その結果、非常に広い周波数可変性という、予期しない結果を得ることができた。また、発振機構に関しても、共振器効果に対する交流ジョセフソン効果の優位性がはっきりと示された。どちらも、非常に新しい内容であり、大変に評価される。また、パイ型アンテナの共振モードに対する理論を新たに提出している。このように目的を達成するために、実験のみでなく、理論、計算を総動員して、素晴らしい成果を上げたことは評価される。

平成 25 年 2 月 20 日、数理物質科学研究科学学位論文審査委員会において審査委員の全員出席のもと、著者に論文について説明を求め、関連事項につき質疑応答を行った。その結果、審査委員全員によって、合格と判定された。

上記の論文審査ならびに最終試験の結果に基づき、著者は博士 (工学) の学位を受けるに十分な資格を有するものと認める。