

氏名	桑野 玄気
学位の種類	博士(工学)
学位記番号	博甲第 10224 号
学位授与年月日	令和 4 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	メサ断面形状を制御した $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+\delta}$ テラヘルツ発振素子の作製と評価 —特性分布を持つ固有ジョセフソン接合列の同期とMSAモデルの検証—
主査	筑波大学教授 工学博士 松石 清人
副査	筑波大学教授 理学博士 黒田 眞司
副査	筑波大学准教授 Ph.D. 小泉 裕康
副査	筑波大学講師 博士(理学) 柏木 隆成
副査	産業技術総合研究所主任研究員 博士(工学) 辻本 学
副査	京都大学准教授 博士(理学) 掛谷 一弘

論 文 の 要 旨

マイクロ波と赤外線の間の中波長域に位置するテラヘルツ波(0.1~10 THzの電磁波)は、X線よりもコントラストを明確に区別したイメージングへの利用や0.3 THz以上の帯域を用いた高速無線通信への応用が期待されている。最近では、単一分子テラヘルツ分光など、高度な技術が開発されるようになっており、テラヘルツ技術の成熟は様々な領域の技術発展に寄与するため、小型で利便性の高いテラヘルツ光源の開発が進められている。

半導体量子カスケードレーザーや共鳴トンネルダイオード発振器など、半導体を主とするテラヘルツ光源の開発により、比較的自由にテラヘルツ波を取りまわせるようになってきたが、1 THz近傍で高強度な放射を達成することが困難である。そこで審査対象論文は、半導体光源とは異なる切り口として、銅酸化物高温超伝導体 $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+\delta}$ (Bi-2212) テラヘルツ発振素子の基礎的な性質を深掘し、超伝導体テラヘルツ光源の高性能化・安定化に貢献することで半導体光源と相補的にテラヘルツ技術の発展に寄与することを目指している。具体的には、①メサ断面形状を制御する手法を確立し、放射されるテラヘルツ波の出力を調べることで、②その放射周波数特性を精査することで、固有接合列の特性分幅と放射周波数範囲の関係を明らかにすること、③Bi-2212テラヘルツ発振素子とマイクロストリップアンテナ(Microstrip Antenna: MSA)の電磁定在波の性質を比較する実験手法を考案し、実際に検証を行うこと、の3つを研究目的としている。

審査対象論文は、Bi-2212 テラヘルツ発振素子の限界性能を知るために、まずBi-2212単結晶が内包する固有ジョセフソン接合列(固有接合列)の特性分布を意図的に制御することで、テラヘルツ波放射の引き金と理解されている固有接合列の同期現象について調べている。その結果、特性分布幅がある値を超すと出力が100倍以上向上し、それ以降の出力の増加量は数倍であることを明らかにしている。このことから、結合振動子集団系の同期現象と同様なことが固有接合列で生じており、特性分布幅に応じて固有接合列は同期転移を起こすと考察している。また、特性分布幅が小さなメサは位相同期を促進し、テラヘルツ波が放射しやすくなり、その結果として周波数可変性能も向上すると結論づけている。

次に、メサ側壁の蒸着膜の有無によって固有接合列に励起される電磁定在波の性質を調べ、Bi-2212 テラヘルツ発振素子と、それを最も単純化したモデルとして知られるMSAとの

比較を行っている。その結果、Bi-2212テラヘルツ発振素子の電磁定在波は金属パッチの影響を受けないことを明らかにしている。このことから、固有接合列では各接合に励起されたジョセフソン振動電流が電磁気的な結合によって相互作用して巨視的な状態となるように系が同期すると考察している。このような自発的な同期効果が外界の影響を受けない安定な共振モードを励起させていると結論づけている。

本論文は8章で構成されている。第1章で電磁波発生源となるジョセフソン接合について説明した後、本研究と特に関わりがあるBi-2212 テラヘルツ発振素子の特性について詳細に記述している。第2章では研究目的とその意義が述べられている。第3章では素子の作製技術、第4章では測定系について記されている。第5章と第6章で、固有接合列の特性分布幅がテラヘルツ波放射特性に与える効果について記述している。第7章で固有接合列とMSAの比較行う手法について記述した後、その手法で得られた結果について示されている。第8章では論文全体のまとめとして、本研究で新規に導入した手法及び観測例のなかった実験結果を列挙した後、本研究の結論が述べられている。

審 査 の 要 旨

[批評]

酸化物高温超伝導体Bi-2212はその単結晶そのものがジョセフソン接合として働き、2007年にBi-2212からテラヘルツ波の放射が観測されて以来、国内外の研究グループによってBi-2212テラヘルツ発振素子の高性能化を目指した研究が精力的に進められてきた。そのなかで、加工精度の問題でメサ側壁角度は20-50度となり、積層する固有ジョセフソン接合列に特性分布が生じることがわかっていた。よって、高性能な放射特性の実現のためには、メサ断面形状効果を正確に抽出することは極めて重要であった。

審査対象論文では、素子作製プロセスを独自に工夫して特性分布幅を制御し、異なる特性分布幅を有する素子において系統的实验を実施することによってメサ断面形状効果を詳しく調べている。その結果、メサ台形歪みを小さくすると、高出力と広い周波数可変性の両方を実現できることを初めて明らかにしている。この成果は、従来のメサ側壁角度に対する考えを改めるもので、素子の性能最大化に貢献する重要な知見であり、高く評価できる。

さらにこの知見を基に、メサ断面形状を最適化した素子を用いてMSAモデルの有効性を検証するためにメサ側壁の蒸着膜効果を調べている。その結果、MSAモデルと異なり、メサ内部には金属パッチの影響を受けない頑健な電磁場モードが励起されていることを発見している。メサを単純化したMSAモデルの正当性についてはこれまで議論があったが、この結果はメサ内部の発振状態を考究する発端となり得るもので、今後の電磁解析モデルの発展に貢献するものであり、当該研究分野へのインパクトは大きいと判断できる。

本論文は、Bi-2212テラヘルツ発振素子におけるメサ断面形状効果の解明とMSAモデルの検証に取り組み、丁寧に詳細な実験と慎重な解析・考察に基づいてまとめられたものである。本論文で明らかとなったメサ断面形状効果とメサ内部の電磁場状態は、今後Bi-2212テラヘルツ発振素子の実用化に向けた研究に大いに貢献すると共に、超伝導体テラヘルツ光源の放射機構を理解する上で重要で貴重な知見を提供しており、本論文は優れた博士論文であるといえる。

[最終試験結果]

令和4年2月14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。

[結論]

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。