

氏名(本籍)	つじもと 辻本	まなぶ 学(茨城県)
学位の種類	博士(工学)	
学位記番号	博甲第6410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	Fundamental Mechanism of THz Radiation from High-Temperature Superconductor $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+\delta}$ and Its Device Applications (高温超伝導体 $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+\delta}$ からの THz 波放射現象の基本的理解とデバイス応用に関する研究)	
主査	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 服部利明
副査	University of Central Florida Department of Physics, Professor	Ph. D. Richard A. Klemm
副査	京都大学准教授	博士(理学) 掛谷一弘
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) 南英俊

論文の内容の要旨

辻本学君は、強い層状性を持つ高温超伝導体 $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+\delta}$ の単結晶を、メサ状に加工した素子から発振する THz 波の発振現象の発見という、画期的な現象を、修士1年生の6月に目の当たりに体験して以来、THz 波の発振現象の研究の魅力にとりつかれ、その発振の基本的な機構とその応用に関して猛然と研究を行い、博士課程3年間を通して、THz 波の発振に関係するほとんどの重要な課題を解決するに至った。すなわち、THz 波の発振の機構に関しては、第一に、交流ジョセフソン効果が、単結晶に内在する固有ジョセフソン接合それぞれに同等に働いており、それらが $1\ \mu\text{m}$ ほどのメサの厚さ内にある約 $N \sim 1,000$ 個の固有ジョセフソン接合が同期し、強度を N^2 倍に強め合うことによって、強力でコヒーレントな電磁波が連続的に発振することを改めて突き止めた。第2に、メサの形状はメサから外部に THz 波が放射する際、重要であり、発振周波数の選択制に関係し、空洞共振器としての役目を果たしていることを実証した。これら2つの条件が同時に満たされたとき、数 $10\ \mu\text{W}$ クラスの強大な THz 波が発振することがわかった。

具体的には、これらの条件を確立するため、単なる矩形のメサのみならず、円板状メサや正方形などを含めた種々のサイズのメサを作成し、電流-電圧特性、発振周波数、強度、角度依存性などを綿密に測定し、それをパッチアンテナ理論に超伝導ジョセフソン効果を加味した放射の理論計算と比較検討し、メサ内部に発生する電磁波モードを特定し、発振から放射に至るプロセスを定量的に解明した。これは、この分野においても画期的な研究成果である。また、これを実証するに当たり、電流-電圧曲線の最外部ブランチからの THz 波放射のみならず、内部ブランチまでも詳細に実験を行い、上記発振に不可欠な条件が内部ブランチにおいても同様に成り立つことを実験的に実証した。

メサのサイズが $\lambda_c \sim 150\ \mu\text{m}$ 以上になると基本モードではこの電磁波のエネルギーがプラズマ周波数以下

になるので発振が不可能となる事なども明らかになった。また、レーザービームで伝導度を変調する顕微鏡を用いた先行実験で主張された矩形メサにおける長さ方向の定在波（高次モード）や、円板メサにおける高次モードなどは少なくとも我々の実験装置の感度限界内において一切検出されなかった。

このような THz 発振素子を用いて透過イメージング装置を自作・開発した。これは高速で x - y 面内を動く 2 次元ステージに対象物体を取り付け、それに THz 波をレンズで集光し、照射し、透過像を得る方法で行われ、強度を 2 次元的にマップするもので空間解像度 0.8 mm 程度、信号強度の S/N 比 3～4 桁を実現している。これは、THz 波の波長から得られるほぼ限界値に値する。この装置の特徴は、多くの THz イメージング装置とは異なり、単一周波数の強いスペクトル強度を持つ THz 波によるイメージングで有り、特定の原子・分子、振動モードなどの指紋スペクトルの同定に威力を発揮すると期待されている。このような特徴あるイメージング装置を用いて多種多様の物質の透過像を調べることができた。また、くさび状の液体セルを開発し、液体の THz 波の吸収係数を迅速かつ正確に測定する方法を開発し、特許を申請した。

審 査 の 結 果 の 要 旨

以上のように、辻本学君は実験技術の高さのみならず、理論的計算と解析にも優れた能力を発揮し、THz 電波の放射パターンなどの 3 次元的計算をも短時間に実行し、実験・理論の両面においてたくいまれなる優れた能力を発揮した。これによって、高温超伝導体の単結晶メサから放出する THz 波の発振現象の主な機構を見事に解明した。このような研究成果は博士課程 3 年間において、Physical Review Letters 誌に 2 編を筆頭著者としてはっぴょうするなど、合計 9 編の学術論文（この内、3 編が筆頭著者）を発表するとともに、国際会議で 13 件（口頭 4 件（その内、招待講演 1 件）、ポスター発表 9 件（その内 2 件が受賞）、国内会議、学会等において 10 件（その内、口頭発表 7 件、ポスター発表 3 件）を行うなど、卓越した業績を上げたことは極めて高く評価することができる。このような優れた業績を残し、超伝導 THz 波発振現象の理解に大きく貢献したことから、研究科長賞に推薦されている。

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。