

論文審査の結果の要旨

氏名 椎野竜哉

テラヘルツ (1-10 THz) 帯の電磁波は遠赤外領域とサブミリ波領域の間に位置し、エレクトロニクスとフォトニクスのどちらにとっても技術的フロンティアとなっている。また、テラヘルツ帯には星間分子雲中における分子形成の要となる基本的な原子や分子のスペクトル線が多数あり、星間雲の化学進化の根幹を捉えることができる天文学・宇宙物理学の重要な観測帯であると認識されている。テラヘルツ帯は大気による吸収の影響を強く受けるが、0.8-1.0, 1.3-1.5 THz帯に大気の窓があり、高地に設置した大口径望遠鏡により高空間分解能観測が可能である。本学位論文では地上からのテラヘルツ帯分光観測を念頭に、テラヘルツ帯の低雑音受信機の研究開発を行った。

本論文は6章と二つのAppendixからなる。第1章ではイントロダクションとしてテラヘルツ帯の検出装置、特に本論文の研究テーマである約4Kの温度で動作するHot Electron Bolometer (HEB)ミキサの動作原理、これまでのHEBミキサ研究のまとめと本論文の目的、論文全体の流れを記述している。第2章では、HEBミキサの製作方法と評価方法をまとめ、第3章では本研究で行ったHEBミキサの研究開発の実験的成果を記述している。本論文の大きな成果として1.5GHz帯ミキサの史上最高の感度を達成しているが、第4章では低温物性物理に基づいて、優れた感度を達成できた理由を考察している。第5章では本論文で開発したHEBミキサを南米チリのASTE電波望遠鏡の焦点面に搭載し、天体からのテラヘルツ波の分光観測を行った結果が記述されている。最後の第7章では、論文の結果をまとめている。

HEBミキサの心臓部は10nm程度の厚さの超伝導細線である。超伝導遷移端上にある細線に局部発振信号と望遠鏡からの信号を同時に入射すると温度変化を生じ、二つの信号の差の中間周波数での電気抵抗変化が生じる。それによって望遠鏡からの信号を周波数変換する。すでにHEBミキサとして動作する素子は海外の研究機関や論文提出者の所属する研究室で開発され動作は実証されている。本論文では、地上大口径望遠鏡による実用的なTHz帯分光観測を実現するために、量子雑音 ($h\nu/k$) の5-10倍程度の雑音温度の低雑音と、1-8 GHzの広いI/F周波数帯域を目標に研究を行った。

HEBミキサの超伝導細線から熱浴への熱伝導 G はHEBミキサの応答の速度を左右し、それを通じて中間周波帯への変換ゲインとその周波数帯域の広さに影響を与える。そこで、論文提出者は二つの目標を達成する方法として G を大きくすることを目標とすることにした。 G としては大きく分けて超伝導細線から基板への熱伝導（フォノン冷却）、超伝導細線から電極への熱伝導（拡散冷却）の二つが関与する。これまでに開発されたHEBでは前者が支配的であると考えられてきたが、論文提出者は二つの熱伝導経路のそれぞれについて熱伝導を大きくする研究を行った。

フォノン冷却の効率をあげるためには、超伝導細線をより薄くすることが考えられる。しかし超伝導薄膜を薄くすると、一般的に超伝導転移温度の低下と常伝導抵抗の増加を招き、不利となる。論文提出者は基板と超伝導材料の間にバッファレイヤーをいれることで薄くても膜質がよくなる可能性を調べた。その結果、AlNがNbNに対して有効なバッファレイヤーであることを発見し、10nm以下の厚みのよい超伝導細線を製作することに成功した。次に、拡散冷却の効率をよくするために、厚さ12nmの超伝導薄膜で様々な大きさの超伝導細線をもつHEBミクサを製作しその性能を調べた。その結果、雑音温度が極小となる巾と長さの組み合わせがあることを発見した。これらの成果により目標とする雑音温度と周波数帯域巾を達成するHEBミクサを実現することができた。特に、1.5GHz帯では拡散冷却の増大を狙った素子により世界最高の低雑音を実現した。論文提出者はこの優れた性能を達成した素子では実際に拡散冷却が支配的な熱伝導課程であることを実験的に示した。雑音温度が極小となる巾と長さの組み合わせが存在する理由については完全には理解することができなかったが、拡散冷却による動作温度の変化による変換ゲインの変化、ジョンソン雑音と熱揺らぎ雑音以外の不明雑音の存在の二つの可能性を指摘した。

最後に論文提出者は、開発したHEBミクサを組み込んだミクサブロックを製作し、それを南米チリのASTE望遠鏡の焦点面に搭載して天体からの観測を行った。その結果、オリオン座Aからの ^{13}CO J=8-7 輝線スペクトルを検出するなど、天体の観測に使用可能であることを実証した。

以上、論文提出者は、テラヘルツ帯の分光観測の最も有望な観測手段であると考えられるHEBミクサの性能の改善を行い、超伝導薄膜の製作方法や雑音温度の検出器依存性に新しい知見を得るとともに、1.5GHz帯で世界最高の低雑音を実現した。本論文はHEBミクサ研究の新たな方向性を示すとともに、地上からの宇宙テラヘルツ帯の分光観測に新たな可能性を拓く研究であり、今後の電波天文学の研究に大きく貢献する新規かつ意義の大きな研究であり、博士（理学）の学位に相応しいものである。

また本論文の研究は、山本教授らとの共同研究であるが、素子の設計、超伝導薄膜の製作方法の立案、素子評価、ASTE望遠鏡での観測にいたるまで、論文提出者が主体となっていたことを確認している、このため論文提出者の主体性と寄与は博士論文として認めるのに十分であると判断する。

したがって、本論文提出者に博士（理学）の学位を授与できると認める。