

論文審査の結果の要旨

氏名 成瀬雅人

ミリ波・サブミリ波帯で高感度・広視野サーベイ観測を行うことへの科学的要請の高まりから、地上での大気雑音限界に達する感度を持つ、数万画素規模のカメラ開発が求められている。また、将来的なスペースからの観測に向け、地上での大気雑音限界より100倍以上深い感度の実現も、大きな課題となっている。本論文は、これらの要請に応えるべく、超伝導共振器を用いた地上観測用100画素ミリ波カメラの基礎開発を行い、高性能化に向けた要素技術、特に、超伝導Al膜の品質が検出器性能に与える影響を考察したものである。

本論文は9章からなる。第1章は、序論であり、ミリ波サブミリ波帯の直接検出器やカメラの現状が述べられている。

第2章では、本論文で着目する超伝導共振器を用いた検出器 Microwave Kinetic Inductance Detector (MKID) について、その物理的背景および基本的性質を特徴付ける物理量がまとめられている。

第3章では、MKIDの性能を上げていく上で鍵となる、超伝導膜の表面抵抗や、超伝導共振器のQ値の振る舞いを、理論的に考察している。超伝導膜の表面抵抗を計算するため、複素伝導度の計算理論である Mattis-Bardeen (MB) 理論に、複素化した超伝導ギャップエネルギーの概念を適用した。その結果、NbN/MgO/NbN 接合の電流電圧特性と表面抵抗が、共通の超伝導ギャップエネルギー値で再現できることを示した。さらに、超伝導共振器のQ値の温度依存性も整合的に説明できる可能性を示した。

第4章では、MKIDの性能向上にあたり、超伝導Al膜の品質を高めることの重要性が指摘され、その実現のために立ち上げた分子線エピタキシー装置について述べられている。MKIDの性能は、準粒子寿命が長く、共振のQ値が高いほど良い。準粒子寿命は、BCS理論では温度が低くなるにつれ指数関数的に増加するが、超伝導Al膜においては、ある温度で頭打ちになることが知られており、その原因の一つとして、結晶欠陥の可能性が指摘されていた。そこで、Si基板上に結晶成長するAl膜を使って、超伝導膜質が準粒子寿命に与える影響を調べるため、分子線エピタキシー装置を立ち上げ、成膜を行った。この結果、狙い通りAl結晶が成長することを高速電子回折及びX線回折で確認した。さらに、分子線エピタキシー法により製作した結晶化Al膜では、電子ビーム蒸着法による非晶質Al膜と比較し、膜質指標の一つである残留抵抗比が約2倍改善することを示すと共に、MKIDに適した成膜条件を突きとめた。

第5章では、0.1 K 希釈冷凍機を用いた超伝導共振器の高感度測定システムの開発に

ついて述べられている。

第6章では、超伝導 Al 膜の品質が超伝導共振器の性能に与える影響について論じている。分子線エピタキシー法による高品質 Al 膜と、電子ビーム蒸着法による非晶質 Al 膜とで製作した超伝導共振器の性能を比較した結果、0.1K での準粒子寿命はともに $450 \mu\text{s}$ であり、検出器の感度を示す雑音等価電力 (NEP) も、 $1 \times 10^{-17} \text{W/Hz}^{1/2}$ という極めて低いレベルで差がないこと、すなわち、Al 膜の品質差が性能に表れないことが、初めて明らかになった。残留抵抗比が 2 倍近く違う Al 膜を比較しても、超伝導膜内の準粒子寿命が変わらないという事実は、超伝導膜内での散乱機構という基礎的物性解明の端緒となる結果である。また、丹念な迷光対策や超伝導共振器の形状最適化等によって、 $6 \times 10^{-18} \text{W/Hz}^{1/2}$ という検出器 NEP を実現した。これは、大気雑音限界の約 1/20 に相当する、優れた性能である。

第7章では、焦点面に配置する検出システムのための光学系の設計並びに光学系の評価が行われている。

第8章では、レンズ光学系を含めた検出器感度並びに光学効率が、実測に基づいて議論され、今後の改善方法が示されている。

第9章はまとめである。

以上のように、本論文は、超伝導 Al 膜の品質に着目し、その違いと超伝導共振器を使った検出器 MKID の性能の関係を調べた初めての研究として高く評価できる。その上で、大気雑音限界を大幅に下回る高感度な検出器を開発・実現し、問題点と改善の方策を提示している。これは、ミリ波サブミリ波カメラの更なる大画素数化・高感度化に向けた、非常に大きな貢献であると位置付けることができる。

なお本論文は、関本裕太郎、野口卓、宮地晃平、鶴澤佳徳、新田冬夢、唐津謙一、関根正和 各氏との共同研究であるが、論文提出者が主体となって開発及び論証を行ったもので、論文提出者の寄与が十分であると判断する。したがって博士 (理学) の学位を授与できると認める。