

審査の結果の要旨

氏名 中田 直樹

超伝導転移端センサ(Transition Edge Sensor: TES)は、超伝導体を用いたカロリメータとして、優れた量子効率、高いエネルギー分解能、極めて低い暗計数率を実現するものであり、近年は、可視光・近赤外域における単一光子検出器としての応用が期待されている。本論文は、このような可視・近赤外領域の計測を行うための TES をアレイ状に多数並べて信号を読み出す際に必要となる、マイクロ波 SQUID(超伝導量子干渉素子)マルチプレクサを用いた信号読み出し法に関する研究を行ったものであり、7章から構成されている。

第1章は序論として、研究背景から目的までを述べており、従来のバイオイメージング技術として、光学顕微鏡技術を取り上げ、蛍光顕微鏡技術における照明法・走査法などの詳細について述べた後、光毒性による細胞へのダメージの問題を解決するために、超伝導検出器の適用が有望であることを述べ、本論文の目的として、超伝導光検出器の検出効率を高めるために、検出器素子数を増大させることが有効であり、そのために、X線検出器等で開発されてきた信号多重化法を光検出器に対して適用することを目的としたことが述べられている。

第2章は、本研究で扱う光検出器として取り上げた TES の計測原理と性能について述べたものである。マイクロカロリメータは超低温に保持した吸収体の熱容量が極めて小さいことを利用し、入射光子のもつエネルギーにより十分計測可能な温度上昇を計測するものであるが、温度計として超伝導体を用いた転移端センサを用いることで非常に高い感度で近赤外単一光子を計測することが可能である。また、マイクロカロリメータの雑音について理論的な考察を行った後に、モデルパルスと雑音スペクトルから導かれる最適フィルタ処理について考察を行っている。

第3章は信号多重化のための各方式について説明を行っており、時間分割方式、符号分割方式、周波数分割方式、マイクロ波信号多重化法の各手法について原理を示した後、光 TES のための多重化法として、X線 TES と比較して、

信号パルスが短いことから、高速性が求められることを述べている。このような高速な信号を扱うためには、数十 MHz の帯域幅を扱うことが必要であり、マイクロ波信号多重化法が優れているため、本研究で扱う光 TES の多重化法として、本方式を採用したと述べている。

第 4 章はマイクロ波信号多重化法の詳細について述べており、構成要素となる RF SQUID、共振周波数を個々に変化させた共振器、マイクロ波回路の解析法と負荷を含めた共振回路全体の Q 値の導出などの理論的な検討を行った後、SQUID の制御法とサンプリング速度の関係について考察を行っている。

第 5 章はマイクロ波信号多重化法を光 TES の単素子に適用して得られた結果について述べている。光 TES としては、Au/Ti の超伝導近接二重層を用いており、転移温度 0.3K のデバイスを用いている。光ファイバと TES は光学系を用いて結合させており、マイクロ波信号多重読み出し回路の 1 入力に TES を接続して動作させスペクトルの読み出しに成功したことが述べられている。また、光子数スペクトルに雑音が重畳したことについて解析を行い、主に、サンプリング周波数が低かったことがその原因であると考察を行っている。

第 6 章はマイクロ波信号多重化法を 4 素子に適用し、不良素子を除いたところ、正常に動作した 2 素子について、それぞれ光子数スペクトルを得ることができたことを述べている。また、2 素子の同時動作においては顕著なクロストークは観察されず、マイクロ波信号多重化法の有用性が示された。

第 7 章は本論文の結論であり、マイクロ波 SQUID マルチプレクサを用いた信号読み出し法を光 TES に適用することを初めて実証し、今後、100 素子以上の光 TES を読み出すバイオイメージング用のシステムの構築が望まれることを述べている。

質疑では、冷凍機内のマイクロ波回路の配線の問題、Q 値と帯域の関連、信号の立ち上がりが遅いことの原因、顕微鏡との実際の接続法、理論式の導出過程、マルチプレクス数、ノイズの許容レベルなどについて質問がなされ、論文の内容についての確認が行われた。

以上のように、本論文は光 TES を用いた超伝導単一光子計測の適用可能な検出効率や計数率特性を大きく広げることにつながるものであり、当該分野の進展に寄与するところは少なくない。

よって本論文は、博士（工学）の学位請求論文として合格と認められる。