

令和元年6月27日現在

機関番号：82401

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2016～2018

課題番号：16K13812

研究課題名(和文)超伝導量子型検出器で実現する超高分解能放射線計測

研究課題名(英文) Development of the ultra-high resolution radiation measurement with superconducting quantum detectors

研究代表者

美馬 覚 (MIMA, SATORU)

国立研究開発法人理化学研究所・光量子工学研究センター・研究員

研究者番号：50721578

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,800,000円

研究成果の概要(和文)：通常微細加工を用いて製作する超伝導検出器を、超伝導体の母材を機械加工で作成した。超伝導転移温度の高いニオブやニオブチタンなどの超伝導材料の板材を圧延して、加工することで従来の微細加工による物と比較して、100倍程度の体積を持つ超伝導検出器の作成に成功した。検出器の性能評価をするため電子回路を用いた読み出しシステムを構築した。検出器を冷凍機に搭載して超伝導特性を評価し検出器として動作することを確認した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

分厚い超伝導体でとらえたエネルギーを従来の体積の小さな超伝導体に注入する構造を作る事で、エネルギー効率が高く感度の高い検出器が開発できるようになる。また、微細加工で取り付けができない超伝導材料を利用することが可能になる。

開発した超伝導検出器は、十分な厚みを持つ超伝導体を曲げることができる基材上に取り付けた構造を持つ。これにより曲がった面などへの取り付けが可能であり、従来では実現出来なかつ円筒の表面にびっちり検出器を取り付け、感度の低い部分を最小化する等のセットアップが可能となった。

研究成果の概要(英文)：In general, superconducting detectors are fabricated by microfabrication system. I fabricated superconducting detector by machining system. I used superconducting materials such as niobium and niobium-titanium, which have high superconducting transition temperatures. I rolled and processed the plate by company, I succeeded to fabricate superconducting detector, that's the volume is 100 times as large as general one. I made a readout system using FPGA board to evaluate the performance of the detector. The detector was mounted on the refrigerator. The superconducting detector was worked.

研究分野：超伝導検出器

キーワード：超伝導 超伝導検出器 MKID

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

ダークマター探索やニュートリノ実験をはじめとする低放射線環境の追求や原発事故の影響により、高分解能な環境放射線分析のニーズが高まっている。高分解能な装置としてゲルマニウム半導体検出器が一般的であるが、その分解能と閾値は半導体特性で原理的に制限されている。

近年は、超伝導ボロメーター型検出器も精力的に開発されているが、原理的に環境放射線計測に不向きである。本研究は、これまで光計測用に発展してきた超伝導量子型検出器を応用し、従来より一桁以上良い分解能の放射線計測装置を開発する。

2. 研究の目的

超伝導量子型とは、クーパー対の乖離を信号として検知する原理である。シンプルな原理のため、超高感度化とダイナミックレンジの拡大が容易である。

超伝導体材料の母材を直接加工する方法を用いて、超伝導検出器のデザイン及び作成を行う。検出器が評価可能な計測器システムをチームが保有している冷凍機と組み合わせて作成して表か環境を構築する。作成した検出器を冷凍機に搭載してその性能評価を行う。

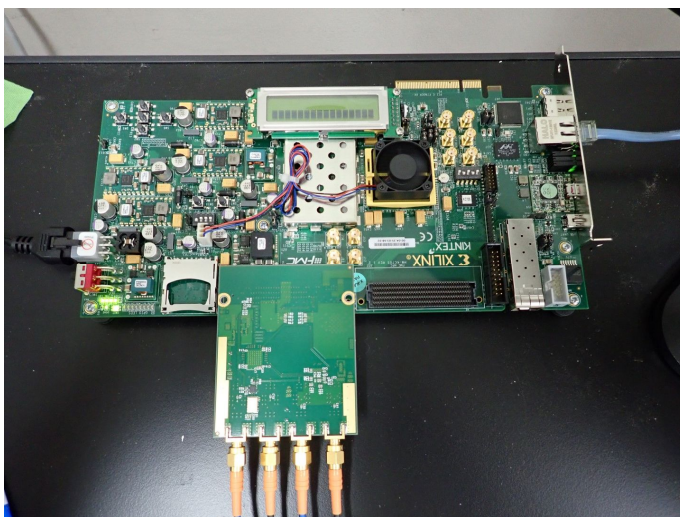
3. 研究の方法

超伝導検出器にはMKID(Microwave Kinetic Inductance Detector)を用いる。この検出器は検出器のデザインは電磁界シミュレーターを用いて行う。シミュレーターには研究室で保有するSONNETを利用した。シミュレーションでは、検出器感度を大きくするためにLE-KIDと呼ばれるデザインと作成した。また、同時に分布常数型の共振器構造を持つ1/4波長共振器を作成した。

超伝導材料には当初 Nb_3Sn 等の超伝導転移温度が18K等非常に高い物を採用する予定であったが、 Nb_3Sn は線材以外で一般的には流通しておらず、板材を入手して本研究に用いることが困難であることがわかったため、超伝導体として実績のあるNbとNbTiの板材料を調達した。

超伝導材料はその電気特性に置いて材料の純度が重要となる。このため、加速器などに用いられる超伝導キャビティで使われた実績のあるNb材料や、これまでに超伝導配線として利用された実績のあるNbTi材料を選定した。それぞれ母材は1mm厚みの購入して、圧延加工を行うことで母材の厚みとそれより薄い板材(最小厚みが10 μm を入手している。)

超伝導検出器の加工プロセスにおいて、シミュレーションで検証した超伝導検出器をレーザー加工などで加工することを検討した。通常、超伝導検出器を微細加工プロセスを用いて作成する際には、基材によって超伝導検出器を保持する。このため、LE-KID等の構造を基盤上に固定することが可能になる。しかし、レーザー加工を用いた金属板単体での加工では、基材を残した加工を行うことが難しいことがわかった。また、レーザーで加工した面の処理による性能向上などのプロセスが必要になる。このため、加工方法をレーザー加工から、回路基盤の加工などで使われる金属のウェットエッチングを用いた方法に変更を行った。



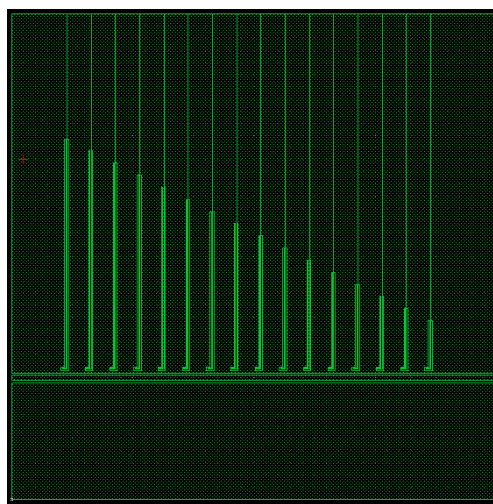
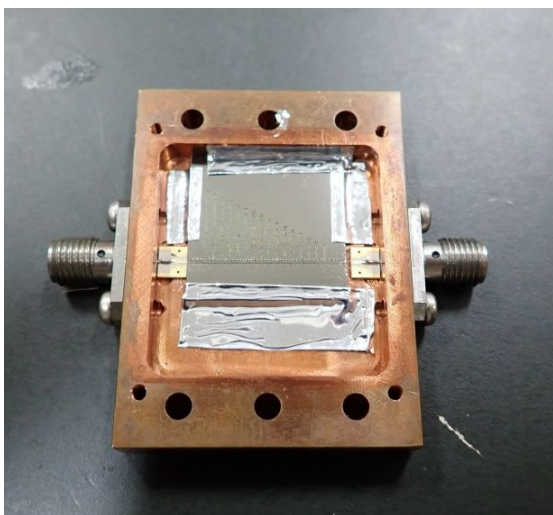
左が FPGA ボードを用いた読み出しシステムで右が希釈冷凍機システムで0.1Kまでの冷却が可能。

検出器デザインは、パーツが多くなり脱落の可能性が高くなるLE-KIDでの作成を見送り、比較的強固に基材に固定することが可能な分布常数型の1/4波長のMKIDデザインを採用した。

検出器のデザインは研究室で行い、超伝導検出器の基材へのはり付け作業及び加工作業を企業に依頼した。検出器の伝送線路の幅は、加工からの要請を満たしつつ、電磁波の漏れ出しの小さな構造になるようにした。加工は最小の構造が 100 μm 幅と 50 μm 幅になる両タイプの回路デザインの試作を行った。また、ウェットエッチングの加工の限界から超伝導材料は 20 μm と 10 μm の物にした。

検出器の評価には、購入した FPGA ボードに高エネルギー加速器研究機構 (KEK) で開発した ADC/DAC ボード RHEA を取り付けた。ボードには KEK で開発された RHEA に合わせたファームウェアをインストールした。このシステムでは、超伝導検出器の MKID の共振器特性と、放射線などのイベントをとらえるイベントトリガーモードが搭載されている。

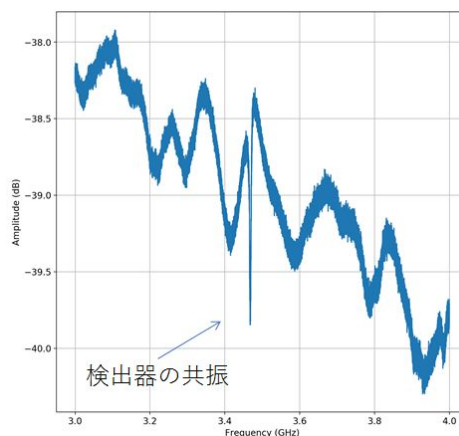
検出器の冷却には、理研の研究室が保有する希釈冷凍機を用いた。この冷却システムは 0.1 ケルビンまで冷却が可能である。冷凍機内部に低温用の低雑音アンプを設置して、検出器を評価できるセットアップを作成した。超伝導検出器を冷凍機内部に搭載し、外部にある RF の回路システムを介して FPGA ボードのシステムに接続することで、検出器の評価ができるようになっている。



左が検出器ホルダーに取り付けた Nb-MKID。右がデザインした 1/4 波長の分布常数型の MKID。

作成した超伝導検出器の内、20 μm の Nb 材料を使った検出器を検出器ホルダーにワニスを使って固定して、ワイヤーボンディングで導通試験を行い、芯線が接続していること及びグラウンドと十分に分断されていることがわかった。

冷却試験では、各共振器を探してその特性の評価を行った。MKID の共振は右図のように見つけることができた。検出器の特性は超伝導状態の内部損失を表す Q 値で評価を行った。結果、内部損失は最大で数千程度となった。ニオブを超伝導体に使った超伝導検出器は、10 万程度から 100 万程度の Q 値を持つことが報告されている。また、超伝導キャビティなどではこれより大きな 1000 万以上の値が期待される。たが、今回の測定結果それらの報告されている値より低いことがわかった。これは、超伝導検出器が単純な材料の純度で特性が決まっていなかったことを示す結果である。



検出器の特性評価結果。

計測した超伝導検出器について、その放射線の検出器感度を評価するため、環境宇宙線を用いた検出器の評価を行った。環境中には 2 次宇宙線の μ 粒子が 1 分当たり 1 平方センチメートル当たり 1 個程度の頻度で到来している。 μ 粒子は、ガンマ線やベータ線などに比べて物質中でのエネルギー損失が大きく、また冷凍機などを貫通するため放射線の感度測定に利用することが可能である。

作成した検出器について、放射線イベントを計測してみたが宇宙線由来と思われる信号はとら

えることができなかった。これは、共振特性のQ値が小さいのとニオブウムの応答が高速であるため、ミリ波検出を目的とした現在の測定システムのS/Nではイベントをとらえきれなかったと思われる。また、試作及び評価を優先して分布常数型のデザインを採用したため、有感面積が小さくなったことも検出できなかった原因だと考えられる。

これらの測定により、超伝導材料を直接加工して検出器に加工する方法に成功し、またその性能評価を行った。

4. 研究成果

超伝導体の材料であるNbやNbTiを微細加工ではなく回路などの大きな物を加工する方法を用いて、厚い構造を持つ検出器の作成に成功した。

検出器の評価結果からは、超伝導検出器のRFでの特性は、超伝導材料の純度だけによるものではなく、検出器の加工方法によって変わることがわかった。超伝導材料を大きなまま、検出器に加工する方法を実現した。今後既存の検出器と接続した検出器の作成が可能となった。

発展的な成果

曲げることが可能なフレキシブルな基板上に厚みのあるNbやNbTi材料を使った検出器の作成を行った。結果、検出器を曲げることが可能になり、円筒などの曲がった場所への検出器の取り付けが可能になった。

超伝導検出器MKIDはCPWと呼ばれる伝送線路からなっている。今回の測定では、10GHzまでの伝送特性を評価したが、得に問題無く透過していた。超伝導材料は、伝送損失に対して熱伝導率が相対的に低いため、これまで低温部への配線に利用されてきた超伝導同軸線に変わる線路として利用が期待できる。

微細加工プロセスを使わずに検出器の作成ができるようになったことで、装置に入れられる基板で制限されてきた検出器サイズの制限が大幅に緩和された。今後、機械加工やプリンターなどを用いることで、これまで難しかった大きなサイズ（例えばA3サイズ）などの検出器の作成の足がかりができた。



希釈冷凍機の内部の輻射シールドに作成したMKIDをはり付けた。このような曲面への貼り付けが可能である。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計0件)

〔学会発表〕(計0件)

〔図書〕(計0件)

〔産業財産権〕

出願状況(計0件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
出願年：
国内外の別：

取得状況(計0件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
取得年：
国内外の別：

〔その他〕
ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究分担者

研究分担者氏名：
ローマ字氏名：
所属研究機関名：
部局名：
職名：
研究者番号（8桁）：

(2) 研究協力者

研究協力者氏名：
ローマ字氏名：

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。