

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成24年 5月 1日現在

機関番号：15301

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2010～2011

課題番号：22654028

研究課題名（和文） 超伝導技術を利用したトリチウム崩壊ニュートリノ質量測定用新式検出器の開発

研究課題名（英文） Development of novel superconducting detectors for a measurement of neutrino mass using tritium beta decays

研究代表者

石野 宏和 (ISHINO HIROKAZU)

岡山大学・大学院自然科学研究科・准教授

研究者番号：90323782

研究成果の概要（和文）：

トリチウム崩壊におけるベータ線と反跳原子核のエネルギーを精度良く測定するために、超伝導検出器である MKID (Microwave Kinetic Inductance Detector) の開発を行った。当初、大きな立体角を持つマイクロストリップ型の MKID の開発を行ったが、本研究に必要な性能を満たす検出器を作製できなかった。詳細な研究の結果、絶縁層(SiO₂, Al₂O₃等)の誘電損失が原因であることがわかった。そこで、CPW (Coplanar waveguide)型で作製したところ、性能の良い MKID の作製に成功し、可視光の照射による反応を確認した。

研究成果の概要（英文）：

We have developed MKIDs (Microwave Kinetic Inductance Detectors) to make accurate measurements of energy deposited by the beta rays and recoil nuclei in tritium decays. We first fabricated microstrip MKIDs which have large acceptance, but they are found not to satisfy our requirements. With intensive studies, we have identified the cause as the dielectric loss in the insulator layer made of SiO₂, Al₂O₃, etc. We then developed CPW (coplanar waveguide) type MKIDs, which have shown good performance. We confirmed a visible light response of the MKIDs.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	1,600,000	0	1,600,000
2011年度	1,200,000	360,000	1,560,000
総計	2,800,000	360,000	3,160,000

研究分野：素粒子物理

科研費の分科・細目：物理学・素粒子・原子核・宇宙線・宇宙物理

キーワード：超伝導検出器、ニュートリノ、MKID

1. 研究開始当初の背景

トリチウムを用いたニュートリノ絶対質量の測定実験が過去に複数行われ、上限値 $2eV/c^2$ が得られている。一方、ニュートリノ

振動実験からは有限ニュートリノ質量が検出され、下限値 $0.05eV/c^2$ が得られている。また、ニュートリノを伴わないダブルベータ崩壊実験や宇宙構造形成・宇宙背景放射観測

による測定から $1\text{eV}/c^2$ 以下のニュートリノ質量の上限値が得られている。従って、今後ニュートリノ絶対質量をベータ崩壊から $0.1\text{eV}/c^2$ の精度で測定することは、他の測定結果の検証になるだけでなく、ニュートリノの性質を決定する上で極めて重要である。実際、ドイツの KATRIN 実験では、スペクトロメータとトリチウム線源を用いることにより、 $0.2\text{eV}/c^2$ の測定精度を目指している。

これまでトリチウム実験の主な系統誤差は線源薄膜内でのベータ線のエネルギー損失と反跳原子の状態の不定性が主なものであった。逆にこれらの量を測定することができれば、系統誤差を著しく減らすことができる。

2. 研究の目的

ベータ線と反跳原子核がつくる計 20eV 程度のエネルギーを、フォノンを通じて検出する超伝導力学的インダクタンス検出器 (Microwave Kinetic Inductance Detector, MKID) の開発を行う。

3. 研究の方法

MKID はもともとミリ波検出用として考案された。図 1 にその写真を示す。



図 1 ミリ波検出用MKID [1] の写真。

シリコン基板上に 100nm 程度の金属薄膜を製作し、図 1 のようなパターンを形成する。それぞれのパターンが検出器のピクセルに相当し、それぞれ 4 分の 1 波長の長さを持つ共振器と、先端についたアンテナからなる。アンテナで受信したミリ波が、超伝導体内のクーパ対を解離することにより、超伝導体の力学的インダクタンスを変化させ、共振周波数と位相が変わる。その様子を図 2 に示す。

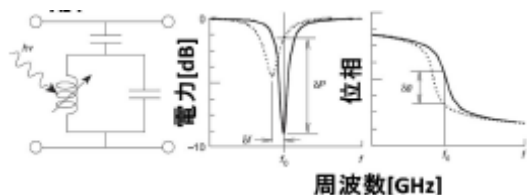


図 2: MKID の測定原理。ミリ波を受信することにより、クーパ対が解離され、力学的インダクタンスが変化し、周波数と位相が変化す

る [2]。

本研究では、図 1 のアンテナの代わりにトリチウム薄膜線源を置くことにより、トリチウム崩壊におけるベータ線と反跳原子核がトリチウム薄膜内に付与するエネルギー (約 20eV) を測定する検出器の開発を目指す。

MKID を用いる利点は、周波数領域読み出しであるので複数のピクセルを一本の線で読み出すことができること、構造が簡単なため素子作製が容易であること、バイアスが不必要なことがあげられる。

図 1 の構造を持つ MKID は CPW (Coplanar Waveguide) 型である。CPW 型は、1 層の金属膜で形成されているので、構造が単純である一方、共振器も同じ層に存在するので、検出器が利用できる立体角が小さくなる。

そこで我々はまず、金属膜 2 層とその間に SiO_2 の絶縁膜を挟んだ構造を持つマイクロストリップ (MS) 型 MKID の開発を行うことにした。MS 型は、共振器と感度を持つ部分を異なる層に形成することにより、検出器の面積を有効に利用することができる。また、MS とグランドとの間の電場の密集度が CPW より小さいので、より性能が良い検出器ができることを予測していた。

[1] S. Yates, et al., The second workshop on the Physics and Applications of Superconducting resonators, 2008.

[2] P. K. Day et al., Nature 425, 817 (2003).

4. 研究成果

MS 型 MKID のデザインを決定するために、電磁シミュレータ (SONNET) を購入し、マイクロ波の共振ピークが立つかどうか確認するためにシミュレーションを行った。マイクロ波 ($3 \sim 5\text{GHz}$) を送るフィードラインと共振器は容量結合になっている。容量結合が小さいと、幅の狭い共振ピークが得られるが、共振器に伝わるマイクロ波の電力が小さくなり、逆に容量結合が大きいと、共振器にマイクロ波が吸収されやすくなるが、共振ピークの幅は大きくなる。一般に MKID は、容量結合が決定する Q 値と共振器自体が持つ Q 値が同程度であれば、性能が良くなることが知られている。電磁シミュレータを利用することにより、共振器とフィードラインの距離と、容量結合している部分の長さのチューニングを行った。

容量結合は、純粋に検出器の構造から決まる値であるので、シミュレーションの結果は信頼できるが、共振器自体が持つ Q 値は、実際に実機を用いて測定するしかない。シミュレーションでは、文献値の値を参照することにより、おおよそのあたりをつけることが目的

である。

シミュレーションで得られた知見に基づき、MKIDの実機をデザインし作製した。実機は、高エネルギー加速器研究機構のクリーンルームにおける超伝導検出器作製装置群を利用した。図3に実機の顕微鏡写真を示す。



図3: MS型マイクロストリップの実機の顕微鏡写真。

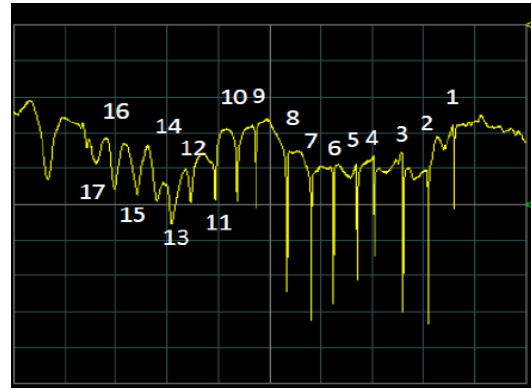
図3の上側横向きの線は、マイクロ波を送り込むフィードライン、真ん中あたりから下に伸びている線(線幅 $3\mu\text{m}$)がマイクロストリップ型のMKIDの共振器を示す。共振器とフィードラインが重なっている部分が容量結合を示す。金属膜はNb 100nm からできており、絶縁層に1000nm の SiO_2 を用いている。

図4は、Nb MKIDを2Kに冷却し、ネットワークアナライザ(NA)で測定して得られた共振ピークを示す。本研究では一つのMKIDに17個の共振器を形成した。測定の結果、17個の共振ピークを確認し、歩留まりは問題ないことがわかった。共振ピークの幅が違うのは、共振器によって容量結合を故意に変えているからである。共振ピークが細いものほど、容量結合が小さい。

図5は、得られた共振周波数と、共振器の長さの逆数との関係を示したもので、その傾きは共振器を伝わるマイクロ波の位相速度に
図4: 作製したMS型MKIDのネットワークアナライザを用いて測定された共振ピーク。

なる。その値から実効誘電率が7.4と得られた。この値は、 SiO_2 とSiの誘電率を考慮すると、妥当な値であり、共振器としての性質は理解された。

図6は、Q値の逆数と容量結合の長さの二乗をプロットしたものである。この切片から、共振器自体が持つQ値を測定することができ、約6500 と得られた。予想に反して、Q値は低かった。絶縁層としてその他の膜(Al_2O_3 , MgO , Nb_2O_5)を試したが、全て同様のQ値を得た。また、それらの絶縁層の上部にCPW MKIDを形成



してもやはり同様の結果が得られ、MS型の構造の固有問題では無く、また得られたQ値の値が SiO_2 の誘電損失値から類推する値と同等なため、絶縁酸化膜による誘電損失が原因であると結論づけた。

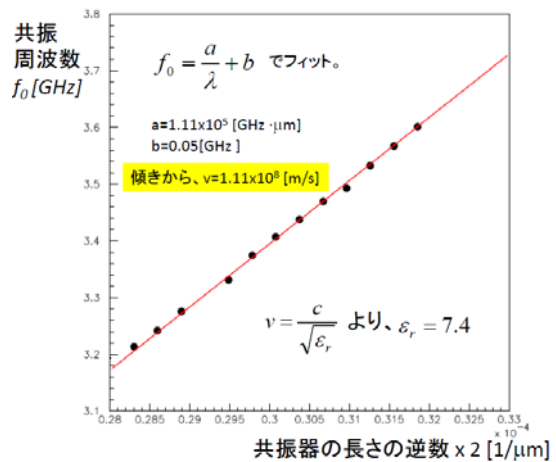


図5: 共振周波数と共振器の長さのプロット。

以上の研究により、誘電損失が小さい絶縁膜(例えば、アモルファスシリコン)を使用することが必要であることが分かったが、海外の研究者との意見交換から、MS型MKIDはノイズの観点からも性能が良くないことが指摘された。そこで、方向を転換し、MS型MKIDの開発をやめ、シリコン基板上に直接形成するCPW型MKIDの開発に集中することにした。

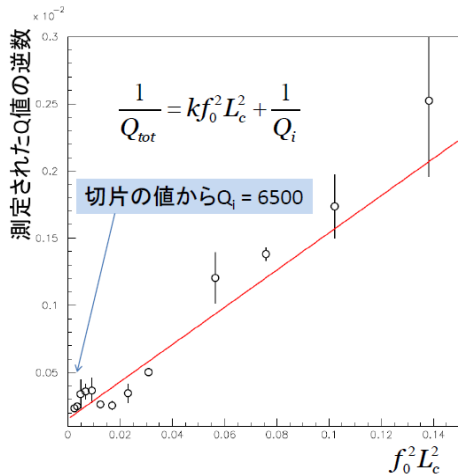


図6：共振ピークのQ値の逆数と、容量結合の長さの二乗の関係。切片は共振器固有のQ値の逆数に相当する。

図7左は作製したCPW型Nb MKID実機の写真を示し、右側は得られた共振ピークの一つを示す。Q値の値は約 10^5 であり、他のピークも含め全般的にMS型より1桁高いQ値を得られた。これは、基板に使用しているシリコンの誘電損失が酸化膜よりも1桁以上小さいことから理解される。

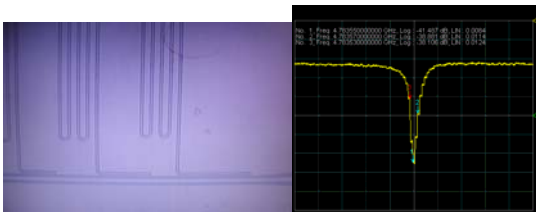


図7：左側は、CPW型Nb MKIDの実機の写真。右側は、NAで測定された共振ピークの一つを示す。

作製したCPW型Nb MKIDを、ヘリウム減圧システムを用いて2Kまで冷却し、内部に設置してある光ファイバー及びプリズムを用いて可視光を照射した。図8は可視光照射前後の共振ピークの様子を示しており、可視光によるMKIDの反応を確認した。照射した可視光の強さは3000光子程度と見積もられ、エネルギーにすると10keV相当である。

以上のように、MKIDにおいて可視光の応答は見られたが、一方でその応答変化を完全には理解できていない。理論的には、図2に示されているように周波数の低い方に移動するはずであるが、実測値は周波数が高い方に移動している。Siによる誘電体の影響だと考えられるが、はっきりしたことはまだわかっていない。また、20eV相当の応答は、測定システムのノイズの2、3倍であり、精密なエネルギー測定のためには、ノイズの理解が必

要ある。冷却アンプを用いることにより、S/N比を改善することも考えている。

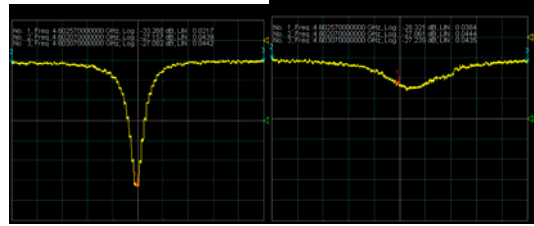


図8：MKIDの共振ピークの可視光照射前（左）と照射後（右）。

5. 主な発表論文等

（研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線）

〔雑誌論文〕（計0件）

〔学会発表〕（計1件）

石野宏和、
「超伝導フォノン検出器の開発2」
日本物理学会
2011年9月17日
弘前大学

〔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：
出願年月日：
国内外の別：

○取得状況（計0件）

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
取得年月日：
国内外の別：

〔その他〕

6. 研究組織

(1) 研究代表者

石野 宏和 (ISHINO HIROKAZU)
岡山大学・大学院自然科学研究科・准教授
研究者番号：90323782

(3) 連携研究者

清水裕彦 (SHIMIZU HIROHIKO)
高エネルギー加速器研究機構 素粒子原子
核研究所 教授
研究者番号：50249900

羽澄昌史 (HAZUMI MASASHI)
高エネルギー加速器研究機構 素粒子原子
核研究所 教授
研究者番号：20263197