

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 5 月 7 日現在

機関番号：15301

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2012～2013

課題番号：24654068

研究課題名(和文) 超伝導技術を利用した実時間太陽ニュートリノ観測装置の開発

研究課題名(英文) Development of a real-time solar neutrino measurement device using superconducting detectors

研究代表者

石野 宏和 (Ishino, Hirokazu)

岡山大学・自然科学研究科・准教授

研究者番号：90323782

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,900,000円、(間接経費) 870,000円

研究成果の概要(和文)：超伝導検出器の1種である力学的インダクタンス検出器(Kinetic Inductance Detector, KID)を用いた実時間太陽ニュートリノ観測を視野にいた検出器の開発を行った。太陽ニュートリノ検出に、In-115を用いることより、バックグラウンド事象を取り除き、太陽ニュートリノ事象をあいまいなく選択可能である。本研究では、In/Al/Nbを組み合わせたKIDの開発を行った。試行錯誤の上、Inバンプを張り付けたKIDを作製し、感度を測定した結果、太陽ニュートリノ事象を検出するのに十分な感度を持つことが分かった。

研究成果の概要(英文)：We have developed a Kinetic Inductance Detector (KID) for the real-time measurements of solar neutrinos. The solar neutrinos can be detected using In-115; when a neutrino interacts with In-115, it creates an excited Sn-115 which subsequently decays by emitting two gamma rays (116keV and 497keV) with a half-life of 3.26 micro seconds. The detection of the two gamma rays enable us to unambiguously distinguish the signal and any backgrounds, hence the real-time detection is possible. We have fabricated Nb/Al KIDs with the In target and estimated the sensitivity by measuring a temperature dependence of the KID. We have found our detector has a sufficient sensitivity to detect the solar neutrinos.

研究分野：数物系科学

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 太陽ニュートリノ インジウム 力学的インダクタンス

1. 研究開始当初の背景

太陽ニュートリノ問題がニュートリノ振動によるものであると 2001 年に日本のスーパーカミオカンデ(SK)とカナダのSNO実験によって結論付けられた。今後は、ニュートリノ振動パラメータをより精密に測定し、太陽標準模型との直接的な比較を行うことが課題である。SKとSNO実験は、水チェレンコフ装置を使用しており、太陽ニュートリノエネルギーが 4MeV 以上のエネルギーを持つ B-8 の崩壊から生じるニュートリノのみに感度がある。太陽内部で起きている核融合反応のうち、最も基本となるのは pp 反応である。ここから生じるニュートリノは最大エネルギー 0.43MeV である。過去の実験では、Gd を標的に用いた実験のみが、このニュートリノ観測に成功しているが、実時間観測ではなかった。

1976 年に、Raghavan は、In-115 を用いれば、環境バックグラウンドフリーな pp ニュートリノ観測を実時間でできる可能性を指摘した。この提案に基づき、これまで先行研究により、In 半導体やシンチレータを用いた測定装置の開発が行われてきた。

2. 研究の目的

本研究では、半導体や液体シンチレータよりも 10 倍高いエネルギー分解能を持つ超伝導検出器を太陽ニュートリノ観測で使用できるかどうかを検証する装置の開発を目的とする。太陽ニュートリノを有意な統計量で測定するためには、1 トン程度の In 標的が必要である。高いエネルギー分解能を達成し、かつ大きな標的からの信号を検出するためには、多素子化にするしかない。そこで、本研究では、周波数領域読み出しにより、多素子化を容易に実現する超伝導検出器の 1 種である KID (Kinetic Inductance Detector) を用いることに着目した。KID に 4g の In 標的を装着し、10 万個の検出器を準備すれば、太陽ニュートリノ観測が可能になる。

3. 研究の方法

KID は、次の原理で動作する。すなわち、外部からの付与エネルギーにより、超伝導体内のクーパー対が破壊され、準粒子が生じる。クーパー対の数密度が変化するために、クーパー対が持つ力学的エネルギーに起因するインダクタンスが変化する。超伝導体で予め共振器を作っておき、力学的インダクタンス (kinetic inductance) の変化を、共振周波数の変化として検出することにより、付与エネルギーを測定する。共振周波数が違う共振器

を並べることにより、一本の線で原理的に 1000 素子を同時に測定することができる。

KID の材質として、Nb/Al を用いる。Nb は Al よりも高い超伝導転移温度を持つ。BCS 理論によると、超伝導体にできるエネルギーギャップ (Δ) は、超伝導転移温度に比例する。よって、Al の方が Nb よりも小さいギャップエネルギーを持つので、同じ付与エネルギーを与えられると、Al の方がよりクーパー対がより多く破壊され、感度が高くなる。一方、全て Al にしてしまうと、準粒子が拡散してしまい、準粒子密度が下がり、逆に感度が悪くなる。そこで、Nb/Al の組み合わせにより、エネルギーギャップの井戸を作り、準粒子が Al の領域にトラップされるようにする。Al 部分に In をはりつけることにより、In で付与されたエネルギーがフォノンとなり、Al に伝わり、Al でクーパー対が破壊される。In もまた超伝導体であり、Al と Nb の中間の Δ を持つ。よって、In/Al/Nb とサンドウィッチ型にすると、準粒子が Al の領域にトラップされ、高い感度を得ることができる。

本研究では、二つのステップでおこなった。まずは、Al/Nb の組み合わせの KID のデザイン・作製・測定を行い、フォノン信号検出の原理検証を行った。次に、Al の部分に In を装着する技術開発を行った。

4. 研究成果

研究期間は全部で 2 年間であった。1 年目は、Al と Nb を組み合わせた KID の設計をおこなった。デザインを行うために、最初に Nb のみからなるプロトタイプ検出器の作製を行った。Nb の超伝導転移温度は 9.2k と高く、液体ヘリウムに入れるだけで、超伝導に転移する。よって、検出器の性能や歩留まりを素早く検査するには最適である。液体ヘリウムを減圧することにより、1.6K まで冷却し、検出器の性能評価とデザインと最適化を行った。その結果、歩留まり 95% 以上を達成し、また、KID の共振の性能を示す Q 値 (共振の幅の逆数) が 20 万程度となり、十分な性能を持つことがわかった。KID の共振周波数の温度依存性を測定し、それを理論曲線と比較することにより、検出器の振る舞いの理解を得て、力学的インダクタンスの大きさを直接測定し、 $\alpha = 0.126 \pm 0.002$ を得た。図 1 に共振周波数の温度依存性と、そのフィットの結果を示す。

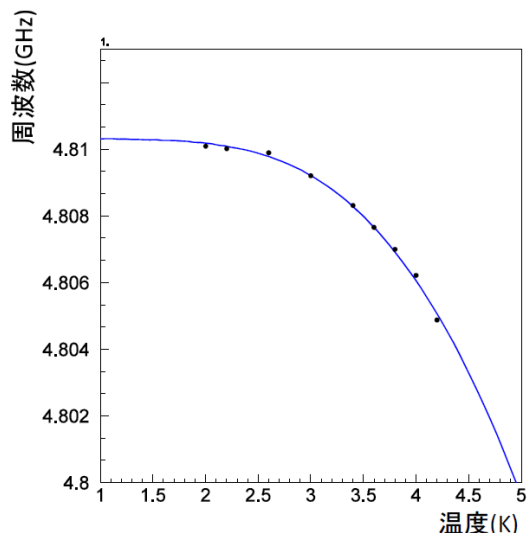


図 1：共振周波数の温度依存性。黒い点がデータ、曲線が Mattis-Bardeen の理論式をフィットした結果。

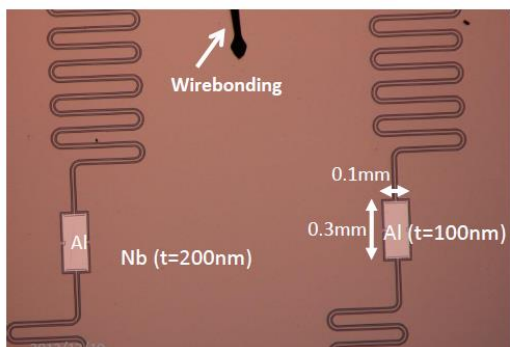


図 2: Al/Nb を組み合わせた KID の顕微鏡写真。

このデザインを用いて、Nb/Al の組み合わせで KID を作製した。図 2 に、作製した KID の顕微鏡写真を示す。メアンダ状の部分は、波長の 4 分の 1 の長さを持つ共振器、長方形の部分は、フォノンを受信する部分で Al からできている。共振器とグラウンドはともに Nb から形成されている。図 3 は、シリコン基板に α 線を照射し、フォノン信号を検出した様子である。異なる共振器間でのフォノンの到達時間の差と距離から、フォノンの伝播速度を $1.1 \sim 1.3 \text{ km/sec}$ と測定した。

本研究では、Al 薄膜の上に In 標的を乗せ、In 標的からのフォノンを検出することが目的なのであるが、今のままでは、基板からのフォノン信号も受けてしまい、偽信号がふえてしまう。そこで、Al 層の下に酸化アルミニウム層を挿入し、基板からのフォノンをブロックすることを考えた。図 4 にその様子を示す。左図は、KID の Al パッド構造を横からみた概念図で、Al 層の下に Al_2O_3 の薄膜 (厚さ 50nm) を挿入した構造になっている。右図は、同じ Al パッドに接続している二つの共

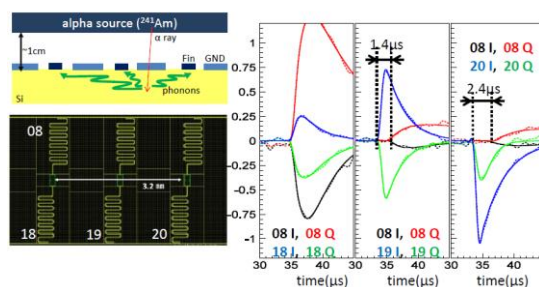


図 3：シリコン基板に α 線を照射し、フォノン信号を検出した図。

振器からの出力を示している。どちらか片方の信号のみ検出していることが分かる。この信号は、Al 層に直接 α 線が当たったことにより、出力されていると考えられる。このフォノンブロックは、過去に STJ (Superconducting Tunnel Junction) の開発で考えられたもので、KID で応用したのは初めてであると考えられる。

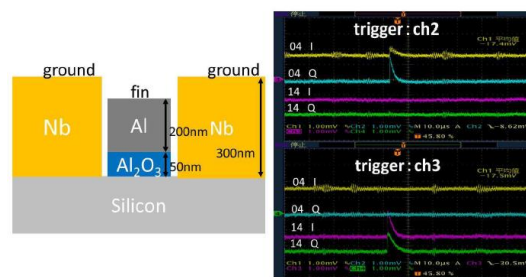


図 4：酸化アルミニウムの薄膜層を挿入した構造 (左) と α 線による信号 (右)。

以上、Nb/Al を組み合わせた KID の作製を行い、フォノン信号の検出原理を検証することに成功した。基板からのフォノン信号をブロックする構造の開発に成功し、余分なフォノン信号による影響を防ぐことができた。

次に Al 薄膜上に In ターゲットを装着する技術の開発に移った。最初に行った方法は、リフトオフ製法において、Al をスパッターした後に、フォトリソをそのままにしておいて、In を含む低融点半田を流し込み固定する方法を試した。素子をホットプレートの上に置き、半田の破片を置き、溶かして広がった時点でホットプレートから除き、冷やす。その後、アセトンでフォトリソを除去する、という手法を試した。何度かためしたが、半田が Al 層にうまく定着せず、アセトンと一緒に洗い流されてしまった。原因は、Al 薄膜の表面が滑らかすぎて、半田がそのまま滑ってしまう、ということが後に分かった。

別の方法を模索していたところ、産業技術総合研究所 (産総研) の山森氏が過去に低融点半田を張り付ける研究を行っていたので、コンタクトを取ったところ、作製依頼に快諾

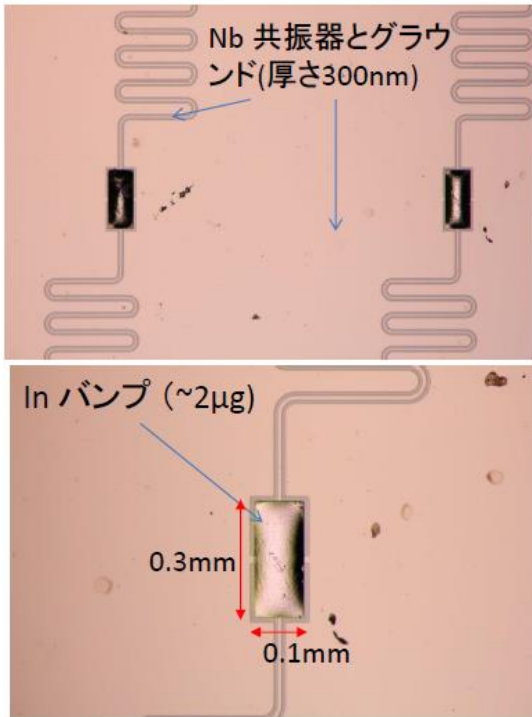


図5 In 半田を装着した KID の顕微鏡写真。

して頂いた。先ほどと同じように、Al スパッターで作製過程を止めたものをお渡しし、低融点半田 (In/Sn) を張り付けて頂いた。当初半田がつかない同じ問題が起きたが、金の薄膜を塗ることにより、半田が定着した。図5はその様子の顕微鏡写真である。

図5の上の写真は、4つの共振器と二つのAlパッドの上にIn半田が乗っている写真、下図はそこを拡大した写真である。In半田の盛り上がりの量から、 $2\mu\text{g}$ の半田が乗っていると見積もられた。このKIDを0.3Kに冷却し、ネットワークアナライザーで測定したところ、20個の共振器の内14個を確認した。Q値は高いもので30000程度であった。

このKIDの感度を測定するために、共振周波数の温度依存性を測定した。図6に共振周波数と温度との相関、図7に共振ピークの温度変化を示す。図7から、温度が1.2Kあたりになると、共振ピークは消失する。これはAlが常伝導になったことが原因であり、確かに超伝導による共振ピークであることが確認できた。

温度が変化すると、超伝導体内の準粒子密度が変化する。これは、外からエネルギーが付与され準粒子密度が上がるのと同じ効果である。準粒子密度は温度の関数として与えられるので、温度から付与エネルギーに換算できる。図8は、周波数の変化を換算エネルギーの関数としてプロットしたものである。低温（低エネルギー換算）では、共振周波数の変化は、換算付与エネルギーに比例する。

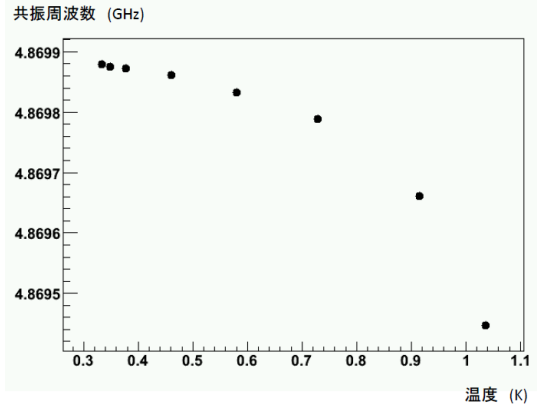


図6：共振周波数の温度依存性。

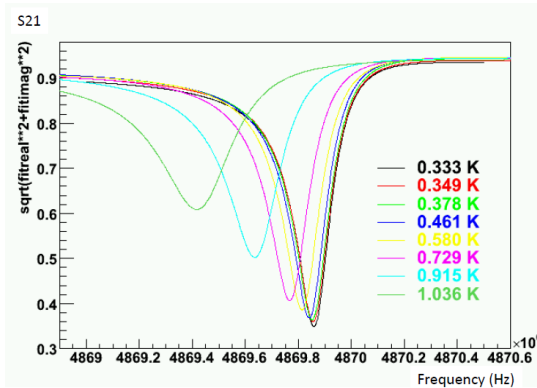


図7：共振ピークの形状の温度依存性。ネットワークアナライザーでのS21パラメータの測定結果をフィットしたもの。

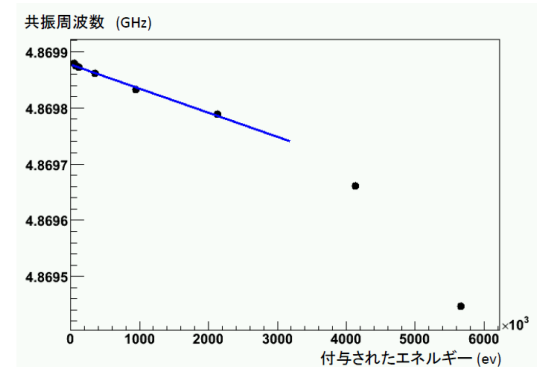


図8：共振周波数と換算付与エネルギーの関係。青線は、感度を求めるために、直線フィットしたもの。傾きから感度が求まる。

付与エネルギー（温度）が高くなると、2次の非線形効果が生じるので、低温部分でのみ直線フィットし、その傾きから感度を求める。KIDの実測では、低温（つまり外部エネルギーが与えられていない状態）での共振ピーク

に固定し、その周波数での位相を測定することになる。位相 θ と共振周波数 f の変化は、線形近似で、 $\delta\theta = -4Q/f \times \delta f$ で与えられる。ここで Q は Q 値である。図 8 の周波数変化から位相に焼き直すと、1eV 当たりの位相変化は、 8.5×10^{-7} rad となった。つまり、100keV のエネルギー付与により、0.085 rad = 4.9 度の位相が変化する。この位相差は測定するには十分な大きさである。

太陽ニュートリノとの弱い相互作用により、In-115 が Sn-115 の励起状態に移り、基底状態になるときに、116keV と 497keV のエネルギーのガンマ線を放出するので、今回作製した素子は、それらのガンマ線を十分検出することができることがわかった。

以上により、In/Al/Nb で構成された KID の開発を行った。Al 薄膜上に In/Sn 半田を定着する技術を得ることができた。今後は、その半田を接着剤として、4g 程度の In 標的を装着する必要がある。1 つのアイデアは、マッシュルーム型の標的にし、足の部分を In/Sn 半田で接着することである。足の部分の大きさは $100 \times 300 \mu\text{m}^2$ なので、技術的には容易ではない。しかし、同様のことをアメリカの NIST や東大のグループは既に行っている。NIST は、100 ミクロン角の TES に 1mm 角のマッシュルーム型の錫標的を接着することに成功している。したがって、そのような接着は不可能ではない。しかしながら、それはお家芸のような技術であり、沢山のノウハウが存在すると聞いている。今後の課題としては、そのような技術を用いて、In 標的を接着することである。

In の代わりに Sn 標的を用いれば、NIST が開発した検出器と同様なものができ、超高エネルギー分解能を持つ X 線検出器の作製が可能になる。

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 4 件)

① H. Ishino et al., Development of Microwave Kinetic Inductance Detectors for a detection of phonons, *Journal of Low Temperature Physics*, 査読有, 印刷中, 2014, DOI: 10.1007/s10909-013-1025-0

② 石野宏和、羽澄昌史、樹林敦子、岐部佳朗、美馬覚、佐藤伸明、吉田光宏、渡辺広記、MKID と宇宙・素粒子実験への応用、査読無、信学技報 IEICE Technical Report, SCD2013-22, 2013, pp17-20.

③ 石野宏和、羽澄昌史、美馬覚、吉田光宏、超伝導検出器の開発、査読無、高エネルギー

ニュース、32 巻、2013 年、24-33 ページ.

④ A.Kibayashi, H. Ishino et al., Development of Superconducting Detectors for Applications to Particle Physics and Astrophysics, 査読有, *JPS Conf. Proc.*, 1 (2014) pp.013118, 1-4, DOI: 10.7566/JPSCP.1.013118

[学会発表] (計 8 件)

① 石野宏和、検出効率を改善した超伝導フォノン検出器の開発、日本物理学会、2014 年 3 月 29 日、東海大学

② 石野宏和、MKID と宇宙・素粒子実験への応用、(招待講演)、電子情報通信学会、超伝導エレクトロニクス研究会、2013 年 10 月 2 日、東北大学、

③ 山田要介、Microwave Kinetic Inductance Detector (MKID) の可視光反応の研究、日本物理学会、2013 年 9 月 22 日、高知大学

④ Atsuko Kibayashi, Development of Superconducting Detectors for Applications to Particle Physics and Astrophysics, *APPC12*, Jul.14-19, 2013, Makuhari.

⑤ Hirokazu Ishino, Development of Microwave Kinetic Inductance Detectors for a detection of Phonons, *LTD15*, Jun. 24-28, 2013, Pasadena, USA.

⑥ 山田要介、MKID の可視光反応の研究、日本物理学会、2013 年 3 月 29 日、広島大学

⑦ 山田要介、ニオブ MKID の基礎特性、日本物理学会、2012 年 9 月 14 日、京都産業大学

⑧ 湯浅泰気、ニオブとアルミニウムを組み合わせたストリップ型 MKID の開発、日本物理学会、2012 年 9 月 14 日、京都産業大学

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

○取得状況 (計 0 件)

[その他]

ホームページ等

<http://fphy.hep.okayama-u.ac.jp/~ishino/works/chousenteki-houga-h24/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

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

(2) 研究分担者

()
研究者番号 :

(3) 連携研究者

()
研究者番号 :

(4) 研究協力者

樹林敦子 (KIBAYASHI ATSUKO)
岡山大学 大学院自然科学研究科 研究員
研究者番号 :

山田要介 (YAMADA YOUSUKE)

岡山大学 大学院自然科学研究科 修士
課程学生 (M2)

湯浅泰気 (YUASA TAIKI)

岡山大学 大学院自然科学研究科 修士
学生 (M2)

山森弘毅 (YAMAMORI HIROTAKI)

独立行政法人産業技術総合研究所 ナノ
エレクトロニクス研究部門 主任研究員
研究者番号:00358293

神代暁 (KOHJIRO SATOSHI)

独立行政法人産業技術総合研究所 ナノエ
レクトロニクス研究部門 研究グループ長
研究者番号 : 60356962