

氏 名	よし はら ふみ き 吉 原 文 樹
学位(専攻分野)	博 士 (工 学)
学 位 記 番 号	工 博 第 2265 号
学位授与の日付	平 成 15 年 3 月 24 日
学位授与の要件	学 位 規 則 第 4 条 第 1 項 該 当
研究科・専攻	工 学 研 究 科 原 子 核 工 学 専 攻
学 位 論 文 題 目	ジョセフソン接合を用いたマイクロカロリメーター型放射線検出器の 設計と開発

論文調査委員	(主 査) 教 授 伊 藤 秋 男	教 授 長 村 光 造	助教授 神 野 郁 夫
--------	----------------------	-------------	-------------

論 文 内 容 の 要 旨

本論文は、高いエネルギー分解能を有する超伝導体放射線検出器の一種である、常伝導体 (N) — 絶縁体 (I) — 超伝導体 (S) 型放射線検出器を応用し、従来の NIS 型放射線検出器の達成できるエネルギー分解能をさらに上回る性能を持つ検出器の考案とその性能評価を中心にまとめたものであり、以下の 7 章から構成されている。

第 1 章は序論であり、高いエネルギー分解能を持つ放射線検出器に対する要請について記述し、このために研究されている 4 種類の超伝導体検出器について比較している。最高のエネルギー分解能を持つ超伝導転移端センサー (TES) にはエネルギー分解能は少し劣るものの、全体の性能としてバランスが取れた NIS 型検出器を研究の対象とした。最後に、本論文の目的と構成について記述している。

第 2 章では NIS 型検出器について動作特性を解説している。このために超伝導体の状態密度から説き起こし、超伝導体と常伝導体とが絶縁体を介して接している場合のトンネル電流について解説している。また、NIS 型検出器のノイズ評価を行いこれを元にエネルギー分解能を理論的に評価している。この部分が第 3 章以降の新型検出器のエネルギー分解能の評価につながっている。超伝導体検出器はどの種類でも有感面積が数 $100 \times$ 数 $100 \mu\text{m}^2$ と小さいことが欠点の一つであるが、これを解決する方法として、分割した吸収体をヒートスイッチを介して NIS 接合に連結する方法を提案している。さらに、NIS 型検出器の冷凍機としての動作の解説も行っている。

第 3 章では超伝導体—常伝導体—超伝導体型ジョセフソン接合を用いた、非対称変調量子磁気干渉計という新しい型の超伝導体放射線検出器の欠点を改良するために、NIS 型検出器にさらに超伝導体層をつけた SNIS 接合を用いることを提案した。すなわち、常伝導体層を含むジョセフソン接合は、常伝導体の温度に依存して臨界電流が変化するので、この臨界電流の変化から放射線によって常伝導体層に付与されたエネルギーを測定することができ、この原理を利用し SNS 接合を持つ放射線検出器が最近提案されている。しかし、この検出器においては、接合を数 10nm の大きさに微細加工する必要があるが、製作が容易ではないそこで、本論文では接合として SNIS 接合を利用することを提案した。これにより、SNS 接合を利用する場合には接合の大きさが 50nm 以下の幅とする必要があったところが、 $10 \mu\text{m}$ 幅とすることができ、従来のリソグラフィの技術で容易に製作が可能となった。

第 4 章では、新たに考案したジョセフソン接合マイクロカロリメータの動作原理を述べ、そのエネルギー分解能が TES と遜色ないことを示している。このジョセフソン接合マイクロカロリメータは第 3 章で述べた非対称変調量子磁気干渉計と同様にジョセフソン接合の臨界電流が常伝導体層の温度に依存して変化することを利用して放射線のエネルギーを測定するが、超伝導ループ中のジョセフソン接合の数が一つである点が異なっている。このため、製作が容易である、という特長をもつ。この検出器のエネルギー分解能を臨界電流の揺らぎとジョンソンノイズの揺らぎの観点から評価し、動作温度 100mK において大きさが $500 \times 500 \times 2 \mu\text{m}^3$ の銀の吸収体を用いた場合に、ダイナミックレンジが 6.2keV のときに 5.8eV のエネルギー分解能であることを示した。これは、従来の超伝導体検出器の性能と競合できる値である。さらに、超伝導ル

ープを貫く磁束が一定となるようにフィードバックを掛けることで、ダイナミックレンジが大きく、エネルギー分解能が高くなる。

第5章では、高周波量子磁気干渉計マイクロカロリメーターの概念を検討している。この検出器も第3章および第4章で提案した放射線検出器と同様に、放射線のエネルギー付与によってジョセフソン接合の臨界電流が減少することを検出して放射線のエネルギーを測定する。この高周波量子磁気干渉計マイクロカロリメーターは、放射線を検出する部分とそれを読み出す部分とが電氣的に独立し、磁氣的に相互インダクタンスで連結されているところに特徴がある。すなわち、放射線のエネルギー付与によって減少した臨界電流をタンク回路の端子電圧の変化として、読み出し側のタンク回路が測定する。このため、読み出し回路側から検出器部分への熱の流入が無く、また検出器部分への配線が不要であるので、アレイ化する際に有利である。また応答速度も速いという長所がある。動作温度 100mK において、大きさ $500 \times 500 \times 2 \mu\text{m}^3$ の銀の吸収体を用いた場合、エネルギー分解能は 1.5eV と評価され、超伝導体を用いた放射線検出器の中で、最高水準のエネルギー分解能を持ちうる。

第6章では、第3章から第5章までに述べた新しい概念の超伝導放射線検出器に共通する、NIS 型検出器の製法を記述し、実際に製作した NIS 型検出器の電流－電圧特性、およびこれを用いたアルファ粒子測定および X 線測定についてまとめている。この NIS 型検出器の製作には、超伝導体としては Nb、絶縁体としては Al を酸化させた AlO_x 、常伝導体としては Cu を用いている。また、超伝導体層の端部の電気絶縁のために、 SiO_2 を利用している。それぞれの薄膜を直流マグネトロンスパッタ、交流マグネトロンスパッタ、そして電子ビーム蒸着を用いて行った。これらの成膜条件を詳述している。また素子のパターンニングはシャドーマスクと精密 X-Y-Z ステージを用いた。このようにして製作した NIS 型検出器の電流－電圧特性を測定し、60mK におけるサブギャップ領域の抵抗値が常伝導状態の 7000 倍となる優れた素子であることを確認した。この検出器を用いてアルファ粒子のエネルギー測定を行った。その結果、得られた電圧信号の減衰時間が定電流バイアスの増加に伴って大きく減衰する現象が見られたが、これを超伝導体のエネルギーギャップのテール部分の変化として考え、現象を定性的に説明した。X 線については測定できなかったが、定量的な考察を行い、エネルギー吸収割合の観点から、厚さ 100nm である Cu の吸収体を少なくとも $1.4 \mu\text{m}$ 程度にする必要があることが分かった。

第7章は結論であり、本論文で得られた成果について要約している。

論文審査の結果の要旨

本論文は、高いエネルギー分解能を有する超伝導放射線検出器の一種である、常伝導体 (N)－絶縁体 (I)－超伝導体 (S) 型放射線検出器を応用し、従来の NIS 型放射線検出器の達成できるエネルギー分解能をさらに上回る性能を持つ検出器の考案とその性能評価を中心にまとめたものであり、主な成果は次のとおりである。

- (1) 直流ジョセフソン効果によるジョセフソン電流の臨界電流が接合の温度により変化することを利用し放射線のエネルギーを測定する非対称変調量子磁気干渉型検出器に SNIS 接合を用いる提案を行った。この検出器では超伝導ループ中にジョセフソン接合を二つ用いるが、従来の手法では接合を数 10nm の寸法に加工する必要があるため、製作が困難であった。本論文で提案した SNIS 接合の利用で従来のリソグラフィ技術を応用することが可能となり、製作が容易となることを示した。
- (2) 超伝導ループ中に一つの SNS 接合あるいは SNIS 接合から成るジョセフソン接合を挿入することにより、放射線によるエネルギー付与を臨界電流の変化として測定する、ジョセフソン接合マイクロカロリメーターを考案し、そのエネルギー分解能の評価を行った。動作温度 100mK で大きさが $500 \times 500 \times 2 \mu\text{m}^3$ の銀吸収体を用いた場合、6.2keV のダイナミックレンジに対して 5.8eV のエネルギー分解能が期待できる。さらに、ジョセフソン接合を含む超伝導ループを貫く磁束が一定となるようにフィードバックを掛けることにより、より広いダイナミックレンジと高いエネルギー分解能が実現できる。
- (3) 高周波量子磁気干渉計マイクロカロリメーターを考案しその性能評価を行った。これは、SNS 接合や SNIS 接合などのジョセフソン接合を一つ含む超伝導ループを用いるが、放射線のエネルギー付与による臨界電流の変化を高周波量子磁気干渉計で読み出す放射線検出器である。特長としては、放射線検出部と読み出し部とが電氣的に独立しており、磁氣的に結合されていることであり、これにより検出部への熱の流入が無く、また配線がないためアレイ化に適する。動作温度 100mK において大きさが $500 \times 500 \times 2 \mu\text{m}^3$ の銀吸収体を用いた場合、エネルギー分解能は 1.5eV となり、従来型の超伝導体

検出器と十分競合できる性能を有する。

(4)上記の新提案の超伝導体を用いた放射線検出器のすべてに共通する NIS 型接合を実際に製作し、その電気的特性を測定するとともに、アルファ粒子の検出も行った。すなわち、NIS 型放射線検出器を製作し、その電流－電圧特性を 60mK までは測定し、サブギャップ領域の抵抗が常伝導状態の7000倍となる優れたトンネル接合を持つ素子を製作した。この検出器を用いて、アルファ粒子のエネルギー測定を行った。その結果、得られた電圧信号の減衰時間が定電流バイアスの増加に伴って大きく減少する現象が見られたが、これが超伝導体のエネルギーギャップのテール部分の変化に起因すると考え、現象を定性的に説明した。

以上、要するに、本論文は高いエネルギー分解能を実現する超伝導体検出器の一種である、常伝導体－絶縁体－超伝導体接合を有する NIS 型検出器の性能をさらに向上させる新しい概念の検出器の設計し、その性能を評価したものであり、その成果は学術上、實際上寄与するところが少なくないよって、本論文は、博士（工学）の学位論文として価値のあるものと認める。また、平成15年2月19日、論文内容とそれに関連した事項について試問を行った結果、合格と認めた。