

課題番号 : F-16-UT-0068  
利用形態 : 機器利用  
利用課題名(日本語) : 微細加工技術を用いた高精度放射線センサーの研究  
Program Title (English) : study on advanced radiation sensor using microfabrication technology  
利用者名(日本語) : 大野雅史<sup>1)</sup>, 入松川知也<sup>2)</sup>, 島添健次<sup>2)</sup>, 高橋浩之<sup>2)</sup>  
Username (English) : M. Ohno<sup>1)</sup>, T. Irimatsugawa<sup>2)</sup>, K. Shimazoe<sup>2)</sup>, H. Takahashi<sup>2)</sup>  
所属名(日本語) : 1) 東京大学大学院工学系研究科原子力専攻, 2) 東京大学大学院工学系研究科原子力国際専攻  
Affiliation (English) : 1) Nuclear Profession School, The University of Tokyo 2) School of Engineering, The University of Tokyo.

## 1. 概要(Summary)

核物質の核種分析・同定において、核物質から発生する硬 X 線、 $\gamma$  線検出を主な手法とする非破壊測定は、溶媒抽出、沈殿回収等の化学的手法を適用したアクチニド分析に比べ、測定効率、作業の安全性に優れている。ただし $\gamma$  線検出に用いる NaI シンチレーション検出器や Ge 半導体検出器の分光精度の限界から Pu や Am 等の核種に起因した $\gamma$  線エネルギーピークの分離が不完全であり、現状の非破壊測定法では正確な核種同定、定量は期待できない。一方、有効かつ健全な核物質保証措置を堅持するためには、高効率、高精度、高信頼性、リモートモニタリング可能といった、高度な非破壊分析技術の確立が急務である。したがって、精度の高い核種分析・同定を確実に成し遂げる計測基盤技術として、Ge 半導体検出器の性能を大きく超える超高エネルギー分解能硬 X 線 $\gamma$  線スペクトロメータの実現が強く望まれている。

本研究では、核物質から発生する硬 X 線や $\gamma$  線を極めて高いエネルギー分解能を有する超伝導転移端センサ( TES : Transition Edge Sensor)により分析し、プルトニウム(Pu)やマイナーアクチニド全元素を精密に弁別、分析しうる革新的な核種同定分析技術を確立する。TES は放射線入射による温度上昇を超伝導転移領域における急峻な温度抵抗変化を用いた高感度な温度計により検出する革新的なスペクトロメータであり、原理的には高純度ゲルマニウム半導体検出器に比べて 2 桁以上優れたエネルギー分解能を実現しうる可能性を秘めている。本研究の実施者は、これまでにスズやタンタル等の重金属バルク放射線吸収体を超伝導薄膜温度センサ上に搭載した TES の研究を行い、およそ 100 mK の極低温にて安定に動作させ、半導体

検出器の分光性能を大きく超える優れたエネルギー分解能を達成し、Pu 試料の分析や世界で初めてとなる TES を用いた核分裂生成物 (FP) の元素、核種同定に成功している。本研究ではこれら $\gamma$  線硬 X 線 TES 検出技術をベースとして、Pu のピーク弁別性能のさらなる向上を図るべくより一層の分光特性の向上を目指すと共に、この TES ピクセルをアレイ状に配置した検出器を開発し、超伝導エレクトロニクスを用いた多重信号読出しを行うことにより数 mm 角程度の広い有感面積を達成し、Pu 保障措置や核燃料、廃棄物検査等の核物質測定ニーズに対して実用可能となる高性能検出システムの実現を目標としている。

## 2. 実験(Experimental)

### 【利用した主な装置】

塩素系 ICP エッチング装置  
形状・膜厚・電気評価装置群  
クリーンドラフト潤沢超純水付

### 【実験方法】

本研究では錫放射線吸収体を搭載した硬 X 線 $\gamma$  線 TES 検出素子の性能向上を図るべく、検出素子の試作と寒剤フリー希釈冷凍機を用いた性能評価実験を担当している。これまでに Ir/Au TES に高い $\gamma$  線吸収効率を有するスズやタンタルの重金属バルクの放射線吸収体をエポキシポストあるいは金バンプポストで結合させた素子作成プロセスを確立してきた<sup>1)</sup>。検出部の作成プロセスは以下のとおりである。まず両面研磨済みシリコンウエハの両面に厚さ 1  $\mu\text{m}$  の窒化シリコンが積膜されたウエハ上の表面に、スパッタリングで Ir/Au を積膜する。次にこれを  $\text{BCl}_3$  ガスを用いた RIE により成形し、同じくスパッタリングおよびリフ

トオフ法によりニオブ電極を積膜、成形する。一方、裏面においては、シリコンエッチング用の窓として、まず表面の Ir/Au 積膜部の裏側にあたる部分の窒化シリコン層を RIE で除去した後、ヒドラジン溶液にて裏面からシリコンのウェットエッチングを行い、Ir/Au 直下のシリコンを完全に除去して、表面の窒化シリコンメンブレン上に Ir/Au のセンサ部が搭載された構造を形成する。この温度センサ検出部において、窒化シリコンメンブレンは、超伝導 Ir/Au 薄膜と外部の系を弱い熱コンダクタンスにより熱的に接続するもので、極低温でのセンサ駆動時には、放射線入射によるエネルギーを熱に変換し、超伝導薄膜内の温度を一様に上昇させ、センサの電気抵抗値を増大させる上で極めて重要な役割を担うものである。この超伝導 Ir/Au 薄膜温度センサ上に重金属放射線吸収体を搭載するための台座として金バンプを形成させ、この金バンプポスト上にスズやタンタルのバルクから成る  $\gamma$  線吸収体を搭載して、検出素子を完成させた。現在、スズ放射線吸収体の切削手法を改善、イリジウム/金超伝導薄膜温度センサ上に搭載するために必要となる金バンプ製ポスト(台座)の形状およびその上に放射線吸収体を固定する際に用いるエポキシ添加の条件を見直し、検出素子の熱特性の向上や応答時定数の高速化を図るような試みを進めている。

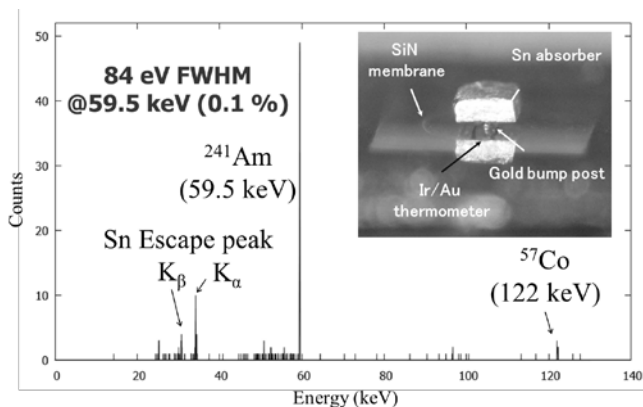


Fig. 1 The energy spectrum of  $\gamma$ -ray from  $^{241}\text{Am}$  source and  $^{57}\text{Co}$  source, measured by the TES with a tin absorber.

### 3. 結果と考察 (Results and Discussion)

Fig. 1 に Am-241 と Co-57 核種からの  $\gamma$  線エネルギースペクトルを示す。このスペクトルでは、59.5 keV の  $\gamma$  線エネルギーピークにおいて、既存の半導体検出

器 (HPGe) で得られるエネルギー分解能より 4 倍以上優れる 84 eV のエネルギー分解能がすでに達成された。このように、我々は TES によりすでに既存半導体放射線検出器の分光精度を大きく上回るエネルギー分解能を達成しているが、なお、本検出素子のエネルギー分解能は、検出素子本来の熱的な特性以外の要因、たとえば TES 冷却に用いる寒剤フリーのパルス管搭載希釈冷凍機におけるパルス管の機械振動や冷凍機の温度安定性等により制限されていることがすでに判明している。現在、希釈冷凍機の機械振動低減を図るべく、モーター部分離型の低振動タイプのパルス管に換装すると共に、 $^3\text{He}^4\text{He}$  混合冷媒ガス圧送ポンプ系からの振動の低減にも取り組み、TES のノイズとなる要因の除去につとめている。

### 4. その他・特記事項 (Others)

本研究は、文科省原子力イニシアティブ「超伝導転移端センサが切り拓く革新的原子力基盤計測技術」、科学研究費補助金 15H02341 (基盤研究 A)、26630480 (挑戦的萌芽研究) による助成を受け、日本原子力研究開発機構の高崎浩司氏、伊藤主税氏、安宗貴志氏、及び産業技術総合研究所の神代暁氏、平山文紀氏と共同で進めている。

### 5. 論文・学会発表 (Publication/Presentation)

- (1) 大野雅史 他、超伝導エレクトロニクス第 146 委員会 第 95 回研究会 (招待講演)、学士会館、平成 28 年 4 月
- (2) 大野雅史 他、応用物理学会超伝導分科会第 54 回研究会 (招待講演)、埼玉大学東京ステーションカレッジ、平成 28 年 12 月
- (3) 入松川知也 他、第 62 回応用物理学会春季学術講演会、新潟朱鷺メッセ、平成 28 年 3 月

### 6. 関連特許 (Patent)

- (1) 高崎浩司、安宗貴志、中村圭佑、大西貴士、石見明洋、伊藤主税、大野雅史、畠山修一、高橋浩之、“核分裂生成物と混在して含まれる超ウラン元素の分析方法”、特開 2015-068657、審査請求中。