

## COBAND 実験に用いる Hf-STJ の開発研究

武政 健一<sup>†</sup> 金 信弘<sup>†</sup> 武内 勇司<sup>†</sup> 飯田 崇史<sup>†</sup>

浅野 千紗<sup>‡</sup> 若狭 玲那<sup>‡</sup> 笠島 誠嘉<sup>\*</sup> 菅野 洋信<sup>\*</sup>

他 COBAND 実験メンバー

<sup>†</sup> 筑波大学 数理物質系 〒305-8571 茨城県つくば市天王台 1-1-1

<sup>‡</sup> 筑波大学大学院 数理物質科学研究科 〒305-8571 茨城県つくば市天王台 1-1-1

<sup>\*</sup> 筑波大学 理工学群 〒305-8571 茨城県つくば市天王台 1-1-1

E-mail: <sup>†</sup> takemasa@hep.px.tsukuba.ac.jp

あらまし 宇宙背景ニュートリノ崩壊探索実験 (COBAND 実験) に用いる遠赤外一光子分光が可能な検出器として、ハフニウムを用いた超電導トンネル接合素子光検出器 (Hf-STJ) の開発を行っている。従来の Hf-STJ は光検出器として動作はするものの漏れ電流が大きく実用には至っていない。成膜条件の調整し、ハフニウム表面粗さを軽減することで絶縁膜の欠陥を減らし、漏れ電流の抑制を図った。自乗平均面粗さ  $RMS = 2.5\text{ nm}, 0.93\text{ nm}$  の 2 つの薄膜を用いて Hf-STJ を作成した。それらの特性を評価した結果を報告する。

キーワード 超伝導トンネル接合, ニュートリノ, ハフニウム

## Development of Superconducting Tunnel Junction Detector using Hafnium for COBAND experiment

Kenichi Takemasa<sup>†</sup> Shinhong Kim<sup>†</sup> Yuji Takeuchi<sup>†</sup> Takashi Iida<sup>†</sup>

Chisa Asano<sup>‡</sup> Rena Wakasa<sup>‡</sup> Akihiro Kasajima<sup>\*</sup> and Hironobu Kanno<sup>\*</sup>

for COBAND collaboration

<sup>†</sup> Faculty of Pure and Applied Sciences, University of Tsukuba, Ten'nodai 1-1-1, Tsukuba-shi, Ibaraki-ken, 305-8571, Japan

<sup>‡</sup> Graduate School of Pure and Applied Sciences, University of Tsukuba, Ten'nodai 1-1-1, Tsukuba-shi, Ibaraki-ken, 305-8571, Japan

<sup>\*</sup> School of Science and Engineering, University of Tsukuba, Ten'nodai 1-1-1, Tsukuba-shi, Ibaraki-ken, 305-8571, Japan

E-mail: <sup>†</sup> takemasa@hep.px.tsukuba.ac.jp

### Abstract

We are developing Superconducting Tunnel Junction detector using hafnium (Hf-STJ) as a far-infrared single photon detector for COsmic BACKGROUND Neutrino Decay search (COBAND) experiment. We have successfully produced a superconductor-insulator-superconductor structure using hafnium. However, it is found to suffer from a large leakage current and needs modification of the Hf-STJ to reduce it. Rough surface of hafnium layer makes defect of insulator. We modified the sputtering condition to make smooth hafnium layer, then we obtained two new sputtering conditions. These conditions have surface RMS of 2.5 nm and 0.93 nm respectively. We have developed two Hf-STJs using these two parameters respectively. We report characteristics of these Hf-STJs.

**Keywords** Superconducting Tunnel Junction, Neutrino, Hafnium

## 1. 宇宙背景ニュートリノ崩壊探索（COBAND） 実験

ニュートリノ振動が観測されたことでニュートリノが有限の質量を持つことが明らかとなった。しかしながら質量そのものの測定には至っていない。

COBAND（COsmic BAcground Neutrino Decay search）実験は宇宙背景ニュートリノ（CvB）の崩壊を観測することでニュートリノ質量を決定する。

ニュートリノ崩壊は、ニュートリノが重い質量固有状態から軽い質量固有状態へ光子を伴って崩壊する現象である[1]。図 1 にニュートリノ崩壊のファインマン図を示す。

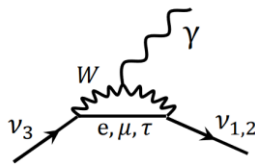


図 1. ニュートリノ崩壊のファインマン図

ニュートリノ崩壊で放出される光子は重心系で以下のエネルギーを持つ。

$$E_\gamma = \frac{m_3^2 - m_2^2}{2m_3}$$

ここで  $m_3$  は重い質量固有状態のニュートリノの質量、 $m_2$  は軽い質量固有状態の質量である。右辺の分子は質量自乗差であり、数々のニュートリノ振動実験により精密測定がなされている。そのため、この光子のエネルギーを測定することでニュートリノの質量を決定することができる。 $E_\gamma$  にはニュートリノ振動実験や宇宙観測実験から制限が与えられており、14meV～25meV（ $\lambda=50\mu\text{m}\sim 125\mu\text{m}$ ）の遠赤外領域が予測されている。

ニュートリノ寿命は標準理論では $10^{43}$ 年、左右対称模型では $10^{17}$ 年と予測されており非常に長いため、崩壊の観測には大量のニュートリノが必要となる。COBAND 実験では全空間に各世代 110 個/ $\text{m}^3$ の密度で存在している CvB の崩壊を観測対象とする。観測される光子のエネルギー分布は CvB が持つ 1.9K の運動量と宇宙膨張による赤方偏移を受け、 $E_\gamma$  で鋭く立ち上がり、低エネルギー側に尾を引く形状となる。（図 2）

主な背景事象である黄道放射が含まれるエネルギー分布から CvB 崩壊の特徴である  $E_\gamma$  での急峻な立ち上がりを観測するためには、1) 25meV 付近の光子のエネルギー分布を連続的に測定できること、2) 単一光子のエネルギーを 2% より優れた分解能で測定可能なことが要求される[2]。

COBAND 実験では、ロケット実験と衛星実験の 2 種類の観測実験を行う。まずニュートリノ寿命  $\tau_\nu = 10^{14}$  年まで感度を持つロケット実験を行い、その後  $\tau_\nu =$

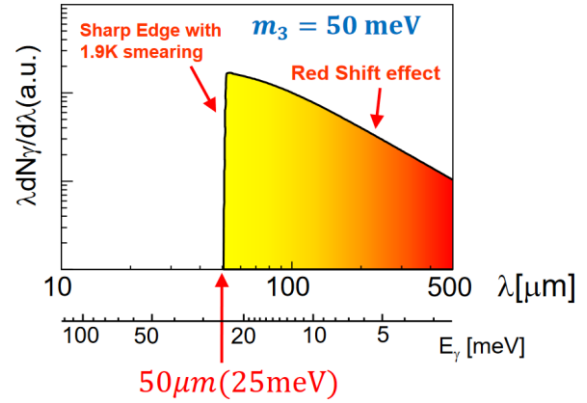


図 2. CvB 崩壊光子の予測エネルギー分布  
重い質量固有状態の質量  $m_3$  を 50 meV と仮定した。

$10^{17}$ 年まで感度を持つ衛星実験を行う。

衛星実験では、直径 20 cm、視野 0.1 度の望遠鏡を用いて 100 日間の観測を行うことで、ニュートリノ寿命が $10^{17}$ 年より短い場合には  $5\sigma$  の確度で CvB の崩壊に伴う光子を観測することができる。

衛星実験用の検出器としてアンテナ結合型のハフニウムを用いた超伝導トンネル接合素子光検出器（Hf-STJ）の利用を計画している。Hf-STJ のサイズは 20  $\mu\text{m}$  角を予定しており、漏れ電流が 10 pA 以下 @ 20  $\mu\text{V}$ , 50 mK であることが要求される。

## 2. 超伝導トンネル接合（STJ）検出器

STJ 検出器[3]は、図 3 のような絶縁体の上下を超伝導体で挟み込んだサンドイッチ構造を持つジョセフソン素子の一種である。上下の超伝導体にはそれぞれ読み出し配線が接続される。各層の典型的な厚みは、絶縁層が 1-2 nm、超伝導体が数 100 nm 程度である。大きさは 10  $\mu\text{m}$  角～数 100  $\mu\text{m}$  程度である。

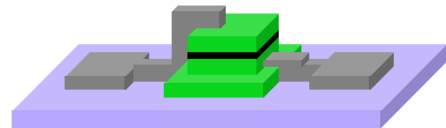


図 3. STJ 概形

STJ の超伝導体に光子が入射しエネルギーが付与されるとクーパー対が破壊され準粒子が励起される。準粒子-フォノン相互作用を経て、励起された準粒子の数  $N_{q.p.}$  は付与されたエネルギー  $\epsilon$  に比例した数になる。

$$N_{q.p.} = \epsilon / 1.7\Delta$$

$\Delta$  は超伝導体のエネルギーバンドギャップである。励起された準粒子は量子力学的トンネル効果で、絶縁層を通り抜け、もう一方の超伝導体へと移動し電流として観測される。

STJ のエネルギー分解能は励起される準粒子数の統

計的なゆらぎに依存し、以下の式で表される。

$$\sigma_E = \sqrt{1.7\Delta F E}$$

F はファノ因子、E は入射粒子のエネルギーである。

STJ の技術は確立されており、ニオブ ( $\Delta_{Nb} = 1.55$  meV) やアルミニウム ( $\Delta_{Al} = 0.172$  meV)、タンタル ( $\Delta_{Ta} = 0.7$  meV) などが超伝導体として利用されている。これらの超伝導体を用いた STJ は高エネルギー分解能を実現しているが、COBAND 実験の要求は満たさない。ハフニウムのエネルギーバンドギャップはこれらの超伝導体より非常に小さい ( $\Delta_{Hf} = 0.021$  meV) ため COBAND 実験の要求するエネルギー分解能を実現できる。図 4 に Hf-STJ のエネルギー分解能のエネルギー依存性を示した。エネルギー 25 meV に対して 2% 以上のエネルギー分解能が実現できる。

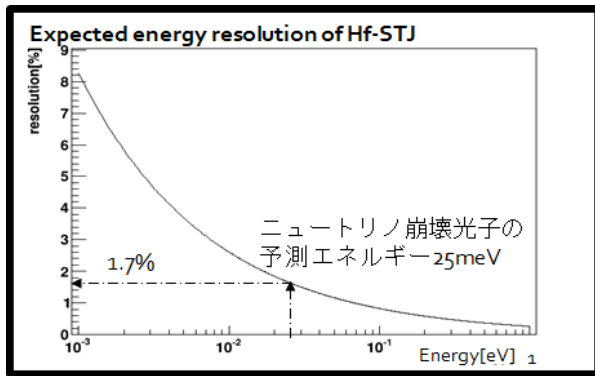


図 4. Hf-STJ の予測エネルギー分解能  
ファノ因子はニオブと同じ 0.2 を仮定した。

### 3. Hf-STJ 開発

我々は高エネルギー加速器研究機構 KEK 所有のクリーンルームにてフォトリソグラフィ技術を用いて Hf-STJ の開発を行っている。

2011 年にハフニウムを用いた超伝導体-絶縁体-超伝導体構造の作成に成功した[4]。2013 年には 100  $\mu\text{m}$  角の Hf-STJ を作成、温度 150 mK まで冷却し、465 nm 可視光レーザーへの応答を観測した。この Hf-STJ は光応答を示したものの、漏れ電流が 28  $\mu\text{A}$  と非常に大きいため実用には至っていない。

漏れ電流を抑制するために、ハフニウム薄膜の成膜条件の調整を行っている。

Hf-STJ 作成は下部ハフニウム薄膜形成、熱酸化で下部薄膜表面を酸化し絶縁膜を形成、上部ハフニウム薄膜を形成、という手順で行う。上下ハフニウム薄膜の形成には DC マグネトロンスパッタ装置を用いている。

これまでに、室温のチャンバー内で 30 Torr の酸素中に 1 時間置き酸化させることで薄膜表面に 1.5 nm 程度の酸化ハフニウム絶縁膜が形成されることを透過型電子顕微鏡にて確認した。

薄膜表面を酸化して欠陥のない絶縁膜を形成する

場合、薄膜表面の凹凸が絶縁膜の厚みより小さいことが望ましい。30 Torr, 1 時間の熱酸化により得られる 1.5 nm の酸化ハフニウム絶縁膜よりも小さい凹凸として 1 nm を目標として成膜条件の調整を行った。

ここでは、自乗平均面粗さ RMS が 2.5 nm の薄膜と 0.93 nm の薄膜を用いた Hf-STJ について報告する。これらの Hf-STJ を希釈冷凍機で温度 150 mK に冷却し特性評価を行った。両 STJ とともにサイズは 200  $\mu\text{m}$  角、厚さ 650 nm である。光照射を行っていない状態での 20  $\mu\text{V}$  の電圧をかけた際の電流を漏れ電流と定義した。IV 特性の評価には 4 端子法を用いた。

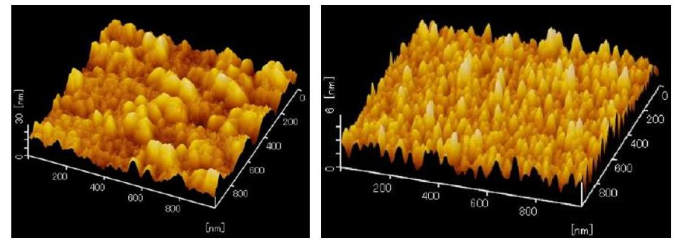


図 5. AFM を用いて観察した Hf 薄膜の表面状態  
左：自乗平均面粗さ RMS = 2.5 nm の薄膜  
右：RMS = 0.93 nm の薄膜

#### 3.1 RMS = 2.5 nm の Hf-STJ

RMS = 2.5 nm の Hf 薄膜の表面状態を図 5(左)に示した。この薄膜は Ar ガス 2.0 Pa, 電力 70 W で成膜することで得られる。この薄膜を用いた Hf-STJ の IV 特性を図 6 に示す。|V| = 2 $\Delta$  に急峻な立ち上がりが存在し、原点には磁場に反応を示す 2  $\mu\text{A}$  程度のジョセフソン電流が確認できた。これらからこの Hf-STJ は STJ が形成できていると考えられる。漏れ電流は 7  $\mu\text{A}$  だった。従来の Hf-STJ と比較して 1/4、サイズ差を考慮すると 1/16 に改善が見られた。

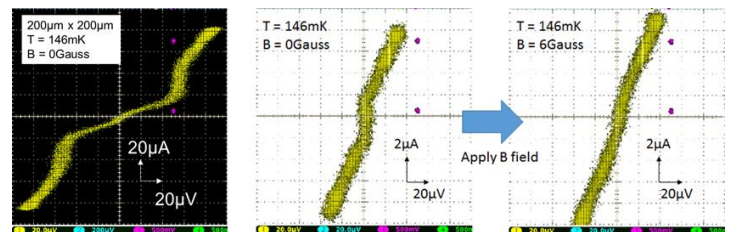


図 6. Hf-STJ(RMS = 2.5 nm)の IV 特性

左：IV 特性（全体）

中央：IV 特性(原点付近拡大)、磁場無し

右：IV 特性(原点付近拡大)、磁場 6Gauss 印加

また、この Hf-STJ に波長 465 nm の可視光レーザーを照射した際の IV 特性の変化を図 7 に示す。レーザー光は光ファイバーを用いて冷凍機内へ導入し、STJ へと照射した。入射光量の増加に伴い、トンネル電流が増加することが確認できた。

可視光レーザーを 20 kHz でパルス発振させた際の電流増加は 2  $\mu$ A, 50 kHz で発振させた際の電流増加は 7  $\mu$ A である。

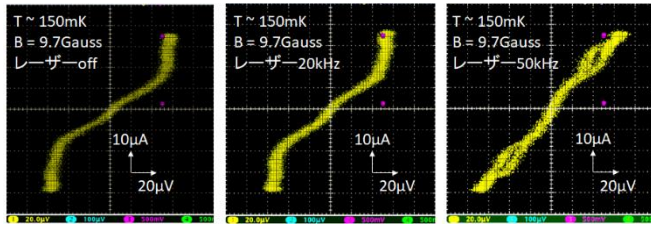


図 7. Hf-STJ(RMS = 2.5nm)の光照射による IV 特性の変化  
 $\lambda = 465$  nm 可視光レーザーを使用。

左：IV 特性(レーザー-off)

中央：IV 特性(レーザー-on、発振周波数 20 kHz)

右：IV 特性(レーザー-on、発振周波数 50 kHz)

### 3.2 RMS = 0.93 nm の Hf-STJ

RMS = 0.93 nm の Hf 薄膜の表面状態を図 5(右)に示した。この薄膜は Ar ガス 0.5 Pa, 電力 50 W で成膜することで得られる。この薄膜を用いた Hf-STJ の IV 特性を図 8 に示す。250  $\mu$ A のジョセフソン電流が存在し、磁場をかけることで抑制されることが確認できた。漏れ電流は 170  $\mu$ A である。従来の Hf-STJ と比較してジョセフソン電流が 50 倍程度、漏れ電流が 25 倍程の大きさを持っており、傾向が大きく異なる。

この IV 特性は、温度が高く十分に熱励起による漏れ電流を抑制できていない状態の STJ の IV 特性と形状が似ている。この IV 特性を測定した際の温度は 150 mK でハフニウムの超伝導転移温度に近く、熱励起による漏れ電流が多く存在していると考えられる。そのため、超伝導転移温度の 1/10 程度まで十分に冷却し熱励起による漏れ電流を抑制することで良い IV 特性を示すことが期待される。

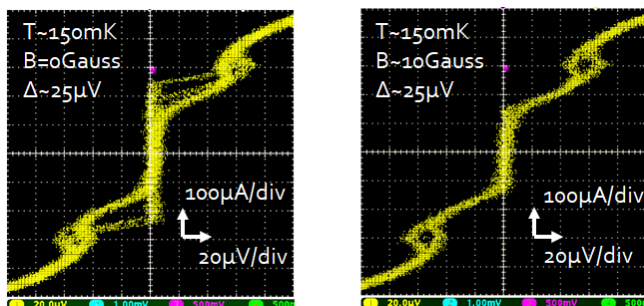


図 8. Hf-STJ(RMS = 0.96 nm)の IV 特性

左：IV 特性、磁場無し

右：IV 特性、磁場 10Gauss 印加

### 4. 課題と改善案

現在の Hf-STJ はいずれも COBAND 実験の要求値を満たしていないため、さらなる改善が必要である。改善

の手段として、成膜条件の更なる調整や小型化による漏れ電流の抑制を計画している。

また、現在、ハフニウムの超伝導転移温度に近い 150 mK での特性評価しかできていない。50 mK 以下の更なる低温での評価を行うことで熱起因の漏れ電流を抑制し、各サンプルの特性をより理解できる。そのため冷凍機の改善を図っている。

### 5. まとめ

COBAND 実験に用いるエネルギー 25 meV の光子に対して 2% のエネルギー分解能を実現できる検出器として Hf-STJ の開発を行っている。

成膜条件を調整し、ハフニウム薄膜の平坦性を高めることで絶縁膜の欠陥の抑制を図った。表面粗さの異なる 2 つのハフニウム薄膜を使った Hf-STJ をそれぞれ評価した。

一つの Hf-STJ (RMS = 2.5 nm) は従来の Hf-STJ と同様の特性を示しつつ漏れ電流が 1/4 に改善した。

もう一つの Hf-STJ (RMS = 0.96 nm) は大きなジョセフソン電流を持ち従来の Hf-STJ とは異なる IV 特性を示した。冷却が不十分な場合の STJ と似た特性を示しているため、より低温に冷却することにより、良い特性を示すことが期待される。

今後は成膜条件の調整や素子の小型化、さらに低温へ冷却することにより漏れ電流の抑制を図っていく。

### 6. 謝辞

本研究は、日本学術振興会の科学研究費助成事業(研究課題/領域番号 25105007)によってサポートされています。また、高エネルギー加速器研究機構の測定器開発室のサポートを受けています。

### 文 献

- [1] S.H.Kim, K.Takemasa, Y.Takeuchi and S.Matuura, J.Phys. Soc. Jpn., 81 (2012) 024101S
- [2] S. H. Kim et al., JPS Conf. Proc. 1, 013127 (2014)
- [3] P.Lerch and A.Zehnder, Topics Appl. Phys. 99 (2005) 217-267
- [4] S.H.Kim et al., Physics Procedia 37 (2012) 667-674 (Proceedings of TIPP2011)