

## 積層配線 TES 型 X 線マイクロカロリメータの表面粗さの研究

黒丸 巖静 (首都大学東京大学院 理工学研究科)

### Abstract

我々のグループでは小型科学衛星 DIOS (Diffuse Intergalactic Oxygen Surveyor) に向けて、独自の積層配線デザインを用いた大規模アレイの TES 型マイクロカロリメータを開発している。新しく上部配線の TES のコンタクト部分にイオンミリングを用いて傾斜加工を施した傾斜付き積層配線基板を開発したが、基板上の TES 素子の正しい転移を確認できなかった。我々は基板表面の粗さが TES の転移を妨げると考え、配線素材の変更とプロセスの改善を行った。その結果、粗さを半分程度まで押さえる事に成功した。また、表面粗さと TES の転移には一定の相関があることがわかった。

## 1 Introduction

我々のグループでは 2020 年頃の打ち上げを目指して提案中の小型科学衛星 DIOS への搭載に向けた TES (Transition Edge Sensor) 型 X 線マイクロカロリメータアレイの開発を行っている。DIOS 衛星は、ダークマターや銀河団の分布など、いわゆる宇宙のフィラメント構造を正確にトレースすることが予想されている WHIM(Warm Hot Intergalactic Medium) と呼ばれる中高温銀河間物質の直接観測を目的としている [1]。空間的に広がった WHIM を観測するためには、十分な有効面積と 0.5-1.5 keV で数 eV という非常に高いエネルギー分解能を兼ね備えた次世代の X 線検出器が必要となる。DIOS のこれらの要求を満たすため、我々は TES 型 X 線マイクロカロリメータの開発を進めている。TES カロリメータは素子に入射した X 線光子のエネルギーを超伝導金属の超伝導-常伝導遷移端での急激な抵抗変化を利用して検出する分光器である。極低温で動作させることによって、原理的には  $\sim 1$  eV 台のエネルギー分解能を得ることが可能である。我々はこれまでに MHI、SHI といった企業および産総研、JAXA 宇宙研などと協力しクリーンルームで素子の大部分を自作してきた。TES 素子は Ti と Au の二層薄膜をピクセル加工し両端に Al 配線を接続した構造で、転移温度を  $\sim 100$  mK に制御する事で高い感度を実現している。X 線の吸収体には Au を用いている。これまでに 16 ピクセルアレイ中の 1 素子において、5.9 keV の入射 X 線に対してエネルギー分解能 2.8 eV (FWHM) を

達成した [2]。また、世界最大級の 256 ピクセルを 1 cm 角内に配置したアレイ中の 1 素子において 4.4 eV を達成した [3]。

## 2 Multilayer readout wiring

実験的な結果から、DIOS ミッションの要求を満たすためには  $200 \mu\text{m}$  角素子による  $20 \times 20$  ピクセルアレイが必要である事が分かった。しかし通常の配線デザインでは、配線部分のスペースが多い上に、ピクセルを密集させ配線の距離が近くなると配線を通る電流が生む磁場によるクロストークの影響が無視できなくなるといった問題が生じる。

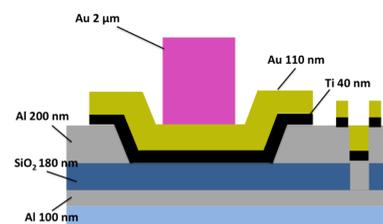


図 1: 傾斜付き積層配線断面図。

この問題を解決するため、我々は図 1 に示したような、積層配線と呼ばれる、素子までのホットとリターン配線を絶縁膜で挟んで上下に重ねるデザインを採用した [4]。これによりデットスペースが減少し、クロストークや自己・相互インダクタンスによる干渉の影響も押さえることができる。

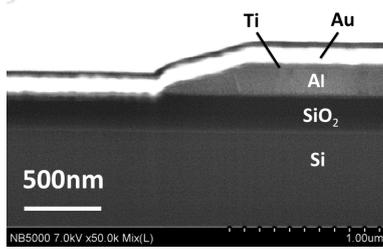


図 2: 傾斜部分。

さらに、産総研と共同で配線にイオンミリング法で傾斜をつける傾斜付き積層配線の製作を進めている。図2で示したように配線と TES のコンタクト部分に傾斜をつけることで互いの接触が良くなり、上部配線も厚くすることができる。まずは上部配線だけの試作において正しい超伝導転移が確認できた [5]。現在は図 3 に示すような傾斜付き積層配線による 20 × 20 ピクセル TES アレイの試作を進めている。

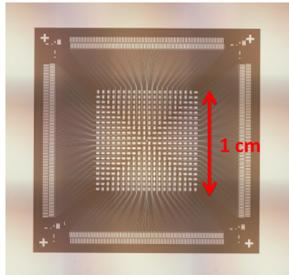


図 3: 400 ピクセル傾斜付き積層配線基板光学顕微鏡写真。

### 3 Surface roughness

デザインは確立しつつあるものの、これまでのイオンミリングを用いた傾斜付き積層配線による 20x20 ピクセル TES アレイの試作では、測定したほとんどのピクセルで TES の正しい超伝導転移を確認できていない。原因を探るため、TES 表面を宇宙研の AFM (Atomic Force Microscope) を用いて調査したところ RMS で 4.5 nm , 最大高低差 32 nm という粗さがある事が分かった。表面の AFM 画像を図 4 に示す。TES の Ti の膜厚は 40 nm であるため、この

オーダー粗さが何らかの理由で TES の正常な転移を妨げている可能性は高い。

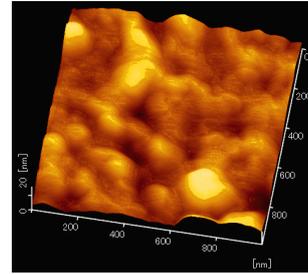


図 4: TMU394 TES 表面 AFM 画像 (1 um 角)。

表 1: TMU394 表面粗さ。

RMS	Peak-Valley
4.5 nm	32 nm

粗さがどの段階で発生しているのかを調べるため、まだ TES を成膜していない基板で TES 下地の AFM 測定をしたところ RMS が 5.4 nm と、基板の段階で既に粗さが生じている事が分かった。さらにシリコン基板に絶縁膜のみを成膜したものと、下部配線を想定した Al 膜と絶縁膜を成膜したものを比較したところ Al 膜を付加した基板の方が倍以上の粗さを持ち、基板上の TES は転移しない事が分かった。

## 4 Mitigation and results

基板の粗さを軽減するために、我々は次に挙げるの 2 つの手法を試みた。

まず、配線素材の検討を行った。Al と Nb のスパッタ精度を比較したところ、Nb の方が優れているという事が実験的に分かった。そこで前セクションで述べた Al と絶縁膜の基板と同様に Nb と絶縁膜を成膜した基板を作製したところ表面粗さが半分程度であり、かつ基板上的 TES もシャープに転移する事が分かった。この結果より我々は超伝導配線の素材として Al から Nb への変更を行う事にした。

次に、イオンミリングの条件出しを行った。積層配線基板表面の粗さには、上部配線のテーパ加工に用いるイオンミリングプロセスが関係しており、

傾斜角度を浅くする事で粗さをある程度緩和できる事が分かった。図 5 に示すように上記 2 つの改善を試み製作した上部下部に Nb 配線を用いた傾斜付き積層配線基板では、粗さを RMS で 2.5 nm、最大高低差 20 nm と従来の半分程度まで緩和する事が出来た。図 6 に基板の表面粗さ (RMS) とその基板上の TES の超伝導転移の有無を示す。粗さが大きい基板上の TES は転移しない傾向にある。また、このデータより積層配線基板の表面粗さについては更なる改善が必要である事が分かった。今後はイオンミリングの条件出しや、TES と配線の成膜順序の変更などを試み、粗さの改善を目指す予定である。

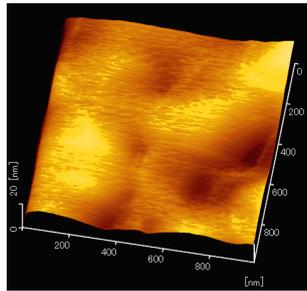


図 5: Nb 配線使用 wafer14TES 下地 AFM 画像 (1 um 角)。

表 2: wafer14 表面粗さ。

RMS	Peak-Valley
2.5 nm	20 nm

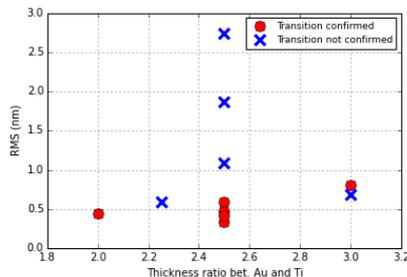


図 6: 基板の各粗さにおける TES 転移の有無。

## 5 conclusion

我々のグループは、小型科学衛星 DIOS に向けた大規模かつ高エネルギー分解能な積層配線 TES 型 X 線マイクロカロリメータを開発している。イオンミリングで配線に傾斜をつける事で TES と配線のコンタクトを改良した独自の傾斜付き上部配線を用い、 $20 \times 20$  ピクセルの傾斜付き積層配線基板を試作中である。転移しなかった TES の表面に大きな粗さが存在する事が分かり、原因を調べたところ積層配線の基板の表面粗さが問題である事が分かった。そこで、使用する配線の素材を Nb に変更し、イオンミリングの角度を調節したところ従来の半分程度の粗さにまで押さえる事に成功した。積層配線基板上での TES の安定した転移を実現するため、イオンミリングの改善や成膜順序の変更などで、今後も基板表面粗さの更なる改善を目指す。

## Acknowledgement

基礎物理学研究所 (研究会番号: YITP-W-15-04) 及び国立天文台からのご支援に感謝いたします。

## Reference

- [1] Ohashi et al. 2014, SPIE
- [2] Akamatsu et al. 2009, AICP
- [3] Ezoe et al. 2009, AICP
- [4] Ezoe et al. 2011, IEEE TAS
- [5] Ezoe et al. 2015, IEEE TAS