

DIOS 衛星搭載へ向けた TES 型 X 線マイクロカロリメータの開発

山口 静哉 (首都大学東京 大学院 理工学研究科)

Abstract

私は次世代 X 線天文衛星 DIOS (Diffuse Intergalactic Oxygen Surveyor) 搭載へ向けた X 線分光素子、TES (Transition Edge Sensor) 型 X 線マイクロカロリメータの開発を行っている。宇宙の進化や大規模構造などを解明していく上で、宇宙の高エネルギー現象をとらえる事は重要である。そのために X 線輝線や吸収線を用いた詳細な分光は必須である。

TES カロリメータは 5.9 keV の X 線に対して数 eV という高いエネルギー分解能を達成できる超精密分光器である。

1 研究背景

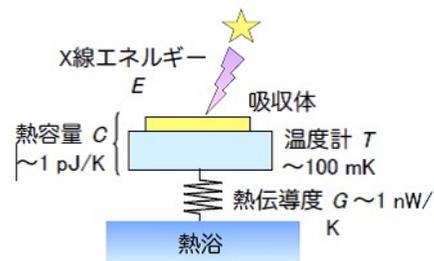
DIOS (提案中: 2018 年) は、酸素輝線を精密分光することで中高温銀河間物質 (WHIM) の検出を目的とする小型衛星である。WHIM は 100-1000 万度のガスで、現在のバリオン量の約 50% を担っていると推定されているダークバリオンである。他の温度域のバリオンに比べて、暗黒物質による大構造をトレースすることが観測されている。

要求される検出器の性能は、有効面積 1 cm 角で 400 ピクセル、1 ピクセル毎の分解能は 5 eV @ 0.6 keV である。

2 TES 型マイクロカロリメータの原理

X 線マイクロカロリメータは、入射 X 線光子の 1 つ 1 つのエネルギーを素子の微小な温度上昇として測る検出器である。入射する X 線の温度上昇は極めて小さいものであるが (~数 mK)、素子を ~100 mK と極低温下で動作させ、また高感度の温度計を用いることで、微小な温度上昇を計測できる。TES はカロリメータの中の温度計の役割を担っており、超伝導物質を使用している。超伝導-常伝導遷移端での数 mK という非常に狭い領域内で急激な抵抗-温度変化により素子の温度上昇を計測する。カロリメータの性能指標であるエネルギー分解能は入射エネルギーに依存することなく、素子内部で生じるフォノ

ン数の揺らぎ等に起因しており、一般的に系の温度、素子の熱容量、温度計の感度で決まる。



ここで温度計感度 は抵抗 R と温度 T を用いて $=d\ln R/d\ln T$ で表される。温度計に半導体を用いた場合 < 10 であるのに対し、TES では $\sim 100-1000$ と優れた温度計感度をもつ。

3 TES カロリメータの構造

TES 温度計には超伝導金属 (Ti) と常伝導金属 (Au) の二層薄膜を使用しており、これまでグループ内で自作した 200 μ m 角の単素子で、5.9 keV の X 線に対し 2.8 eV と高いエネルギー分解能を達成している。これは NASA の持つ世界記録の 1.8 eV に迫る性能である。現在は衛星搭載へ向け密集したアレイ素子の開発を進めている。アレイ化へ向けた課題として、従来のデザインでは大きく 2 つの問題がある。1 つは基板上のスペースの問題である。従来は配線を TES の両端から延ばすデザインであったた

め、無駄なスペースができてしまい、アレイ化しにくかった。また、2つ目の問題点は、ピクセル間のクロストークである。配線が密集しているため、電流を流したときに発生する磁場が素子に影響し、ノイズの原因になってしまう。

そこで、積層配線という折り返し配線の技術に取り組んでいる。これは $10\ \mu\text{m}$ 幅の Al や Nb の配線を電流の行きと帰りの配線を上下で重ね、間に絶縁体入れて酸化膜を挟みこんだデザインである。3.5 cm 角の基板上に 20×20 の 400 ピクセル分の配線を形成し、下部配線に Al (厚み 100 nm)、上部配線に Nb または Al (厚み 50 nm または 100 nm) を使用して配線基板を製作した。

4 20×20 アレイ 積層配線基板

単層配線型では 256 ピクセルで限界だったが、この積層配線型では同じ 1 cm 角に 400 ピクセルを可能にした。しかし、X線照射を行ったが、信号は検出できなかった。

転移特性が悪かったピクセルの断面を観察すると、Au が殆ど付いてなく、また、上部配線 Al の一部に剥離があることがわかった。 20×20 アレイを加工の各段階で転移特性を評価すると、TES パターニング後に転移特性が悪化することが分かった。

5 まとめと今後

TES パターニング後に転移特性が悪化することが分かった。 4×4 アレイの加工では問題にならなかったため、加工時のレジストの被覆性に問題があって、Al や Au を侵していると考えられる。したがって、転移特性が悪化する点は被覆性を良くすることで改善できると思われる。

積層配線型素子ではピクセルアレイ数に関係なく、転移温度が高い。TES の Ti が厚いため、近接効果がききにくいと思われる。しかし、現状の製作プロセスでは、Ti をこれ以上薄くすると上部配線の厚さに負けて段切れを起こす。この問題を解決するために、現在、協力機関と製作プロセス見直しの技術検討を行っており、今後は新しい製作プロセスを実践

していく。

また、無冷媒の希釈冷凍機を導入することにより、R-T 測定や X 線照射実験などの性能評価における時間短縮をし、開発スピードの向上を目指す。

Reference

- T. Ishida, T. Kanda, H. Akamatsu, T. Enoki, K. Henmi, Y. Ishisaki, Y. Ezoe, T. Ohashi, K. Shinozaki, K. Mitsuda, H. Ohashi, L. Liu, J. Wang, H. Tanuma: Soft X-ray emissions related to the solar wind charge exchange observed by the X-ray satellite observatories, *Journal of Physics: Conference Series*, 388, Issue 8, article id. 082021 (2012)
- T. Ohashi, Y. Ishisaki, Y. Ezoe, Y. Tawara, K. Mitsuda, N. Y. Yamasaki, Y. Takei: Status of the Diffuse Intergalactic Oxygen Surveyor (DIOS), *Space Telescopes and Instrumentation 2012: Ultraviolet to Gamma Ray*. Proceedings of the SPIE, 8443, article id. 844319, 10 pp. (2012)