

SPICA/SAFARIのための TES 型遠赤外線検出器アレイ開発

馬場 俊介 (東京大学大学院 理学系研究科)

Abstract

SPICA は日本の次世代赤外線宇宙望遠鏡ミッションであり、SAFARI は SPICA に搭載される TES 型検出器を用いたフーリエ分光器である。SAFARI がカバーする波長は全体で $34\text{-}210\ \mu\text{m}$ であるが、そのうちの $34\text{-}60\ \mu\text{m}$ を S バンドと呼んでいる。S バンドでの赤外線検出は、超伝導体として Ti/Au 二重層を使う。SPICA 打ち上げまでに求められているのは、TES 型検出器を並べて 43×43 ピクセルのアレイにし、分光と撮像とを同時に行える観測機器を作成することである。今回は、TES アレイの暗時特性を評価した実験 (Khosropanah et al. 2012) を紹介し、今後の課題を述べる。

1 Introduction

SPICA は、日本がリードする赤外線観測衛星ミッションである (Nakagawa et al. 2012)。この望遠鏡は、 3.2m の大口径により高い空間分解能を実現し、また、機体を 6K まで冷却してバックグラウンドとなる熱輻射抑え、より高感度の観測を可能にする。「あかり」に次ぐ次世代の赤外線宇宙望遠鏡として現在期待が寄せられている。SPICA には大別して4つの観測装置の搭載が計画されており、国内外の協力のもとでそれぞれ開発が進められているが、その観測装置のひとつが SAFARI と呼ばれる撮像型フーリエ分光器である。SAFARI は $34\text{-}210\ \mu\text{m}$ の遠赤外領域を TES 型検出器によって観測するが、この波長帯は S バンド ($34\text{-}60\ \mu\text{m}$)、M バンド ($60\text{-}110\ \mu\text{m}$)、L バンド ($110\text{-}210\ \mu\text{m}$) の3つのバンドに分けられている。S バンドでの赤外線検出は、Ti/Au 二重層を使った TES で行われる。TES 型検出器を並べて 43×43 ピクセルアレイを作成し、分光と撮像を同時にできる観測装置にする計画である。機体の冷却を最大限生かすため、この TES アレイにはバックグラウンドリミットの性能が求められている。雑音等価電力 (NEP) で表すと、要求が $6.5 \times 10^{-19}\ \text{W}/\sqrt{\text{Hz}}$ 、最終目標が $2.8 \times 10^{-19}\ \text{W}/\sqrt{\text{Hz}}$ である。また、結合効率の要求は 58% 、最終目標は 64% である。

今回は、 43×43 の前段階として 8×9 ピクセルのアレイを作成して暗時特性を評価した実験を紹介し、開発におけるこれからの課題について述べる (Khosropanah et al. 2012)。

2 The Device and The Arrays

アレイを構成する各ピクセルは、SiN 薄膜上に Ti/Au ($16/65\ \text{nm}$) 二重層を乗せた TES 型検出器である。TES の臨界温度は T_c は $105\ \text{mK}$ で、サイズは $50 \times 50\ \mu\text{m}^2$ となっている。吸収体は Ta で、大きさ $75 \times 75\ \mu\text{m}^2$ 、厚さ $8\ \text{nm}$ である。TES と Ta 吸収体は $140 \times 80\ \mu\text{m}^2$ の SiN 薄膜の上にする (図 1)。この SiN 薄膜については、2種類の厚さ ($250\ \text{nm}$ 、 $500\ \text{nm}$) を用意して性能を比較している。

各ピクセルは4本の SiN の足によって支えられる。足の幅は名目 $2\ \mu\text{m}$ である。足の長さについても、 $1000\ \mu\text{m}$ と $1500\ \mu\text{m}$ の2種類で比較を行っている。アレイのピッチは $840\ \mu\text{m}$ である (図 2)。

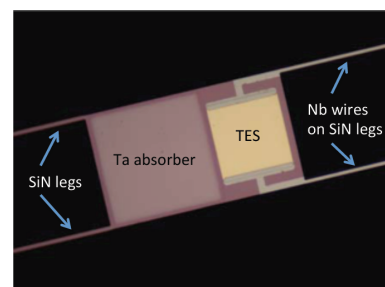


図 1: 各 TES ピクセルの構造。SiN 薄膜の主要部は $140 \times 80\ \mu\text{m}^2$ 、厚さは $250\ \text{nm}$ または $500\ \text{nm}$ 。TES は Ti/Au 二重層、 $50 \times 50\ \mu\text{m}^2$ 、厚さ $16/50\ \text{nm}$ 。吸収体は Ta、 $75 \times 75\ \mu\text{m}^2$ 、厚さ $8\ \text{nm}$ 。(Khosropanah et al. (2012) より引用)

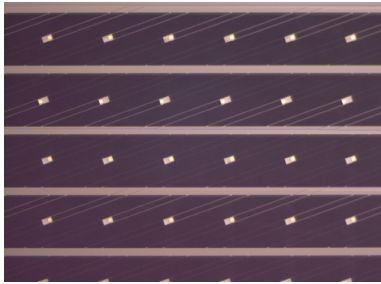


図 2: 図 1 のピクセルをアレイ化する際の配置。ピクセル間のピッチは $840 \mu\text{m}$ 。ピクセルを支える SiN の足は、幅が $2 \mu\text{m}$ で、長さは $1000 \mu\text{m}$ と $1500 \mu\text{m}$ の 2 種類ある。(Khosropanah et al. (2012) より引用)

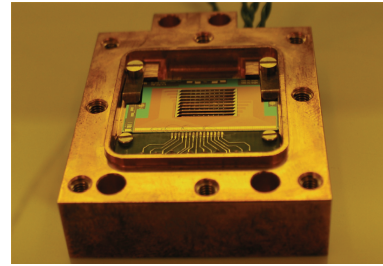


図 4: 暗時特性の試験のため、アレイはこの容器にマウントされる。試験時には容器は閉じられ、インジウムシールののち真空引きされる。(Khosropanah et al. (2012) より引用)

3 Dark Tests

8×9 ピクセルのアレイを SiN の厚みを変えて 2 つ作成し、暗時特性の比較を行っている。各アレイには、足の長さの違う TES がそれぞれ含まれている (図 3)。図 4 は暗時特性の試験時にアレイをマウントする遮光容器である。アレイを固定したのち、インジウムシールを施して真空引きを行う。また、容器内にはヒーター、温度計、コイルを内蔵する。ヒーターと温度計には内部温度の調節、コイルには残留磁場を打ち消す役割がある。暗電流の読み出しは SQUID によって行う。一度に最大で 4 つの検出器を SQUID に接続することができる。

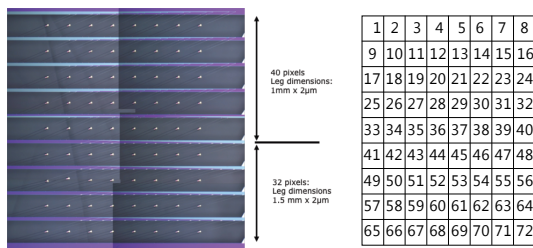


図 3: 8×9 ピクセルの TES アレイの写真。72 個の TES のうち、1-40 は足の長さが $1000 \mu\text{m}$ 、41-72 は $1500 \mu\text{m}$ 。足の幅は名目 $2 \mu\text{m}$ である。(Khosropanah et al. (2012) より引用、右側の TES の番号表は筆者による追加)

特性試験としては、第一に I-V 曲線を様々な熱浴温度で測定することから始める。超伝導転移におけるバイアス電力から出力が飽和する電力が分かり、こ

こから TES と熱浴間の熱伝導率 G が求められる。また、異なるバイアスにおいてノイズ電流を測定し、そこから NEP を計算している。

低周波バイアスにおける NEP ではフォノンノイズが支配的であるが、これは

$$\text{NEP} = \sqrt{4\gamma k_B T_c^2 G} \quad (1)$$

と見積もることができる。ここで、 k_B はボルツマン定数。 γ は熱輸送の形態、臨界温度 T_c 、熱浴温度 T_{bath} に依存して 0.5 から 1 の値をとる無次元量であり、 $T_c = 105 \text{ mK}$ 、 $T_{\text{bath}} = 30 \text{ mK}$ では $\gamma \sim 0.5$ である。

表 1 は厚さ 500 nm の SiN 薄膜を用いた TES 検出器のアレイ中での特性をまとめたものである。一見して分かるように、臨界温度 T_c 、通常の状態で電気抵抗 R_n に関してはピクセル間でのばらつきが数%程度にとどまっている。これは喜ばしい結果である。しかしながら、熱伝導率 G に関しては、 T_c や R_n と比較してばらつきが大きく、これに伴って飽和電力についても大きな差が現われている。 $1000 \mu\text{m}$ のものではファクター 1.5、 $1500 \mu\text{m}$ のものではファクター 1.9 の違いがある。

表 2 は、SiN 薄膜の厚さが 250 nm の場合に行った同様の実験の結果である。この場合でも T_c と R_n が比較的一様であるのに対し、熱伝導率 G と飽和電力には大きな個体差がある。測定された中で最小の NEP は $5 \times 10^{-19} \text{ W}/\sqrt{\text{Hz}}$ であるが、これは NEP を低減していくうえで興味深い結果である。また、厚さ 500 nm の場合に比べて厚さ 250 nm の場合の方が

飽和電力が小さい。これは、より薄い膜の方が熱伝導が小さいためだと考えられる。

次に、動作の速さを調べるため、バイアスにパルスを加えてその応答を調べた。応答の時定数はバイアス点によって 1-4.5 ms の間で変化した。が、 $R/R_n = 0.3$ となる典型的な動作点では 1.4 ms であった。

4 Conclusion

TES をアレイ化し動作させることには成功した。

臨界温度 T_c と通常の抵抗 R_n は一様に作る事ができたが、熱伝導率 G と飽和電力についてはピクセル間でのばらつきが見られた。SiN の足を顕微鏡で検査したところ、幅の違いやスポットの形成などが見つかった。特に足の幅については、表 1 の 8 ピクセルでは、名目 $2\mu\text{m}$ のところ $3.3\text{-}3.6\mu\text{m}$ であった。これは、エッチングの際に薄膜の背後にある Al の層から光が反射してしまっていることの影響と考えられる。しかし、この足の幅の違いだけでは、検出器の個体差は説明できない。深堀反応性イオンエッチング (DRIE) を用いることでより正確に SiN の足をエッチングできるので、この個体差に関わっている他の要因を究明につなげられる。

実測した NEP は、(1) 式による計算値と比較して大きい。加えて、足が長く膜が厚い場合 (表 1 測定 2) で実測値と計算値の比が 2-2.5 であるのに対し、同じ足の長さで膜が薄い場合 (表 2 測定 4) では 3-3.5 である。これは、軽い足の方がノイズが少ないという予想と相反する結果になった。何らかの余分な電力が加わっていて飽和電力の測定値が小さくなり、 G を過小評価しているのかもしれない。 G のより正確な評価が必要となっている。

今後の自分の研究では、SPICA およびさらに先の衛星に向けて、従来より高感度の TES あるいは BIB 検出器の開発をしていく予定である。

Reference

- T. Nakagawa et al. (2012), Proc. of SPIE, Vol. 8442, 844200
- P. Khosropanah et al. (2012), Proc. of SPIE, Vol. 8452, 845209

表 1: 500 nm 厚 SiN 薄膜を用いた場合の TES 検出器のアレイ中での特性。

検出器	測定 1				測定 2			
	P33	P16	P32	P09	P56	P45	P41	P70
足の長さ [μm]	1000	1000	1000	1000	1500	1500	1500	1500
T_c [mK]	106	103	106	105	103	103	103	103
R_n [m Ω]	167	164	158	160	168	166	163	160
飽和電力 [fW]	22.4	28.9	35.6	33.4	13.1	15.8	14.2	24.7
G [pW/K]	0.57	0.73	0.87	0.83	0.31	0.38	0.34	0.59
NEP (計算) [$\times 10^{-19}\text{W}/\sqrt{\text{Hz}}$]	4.15	4.7	5.2	5	3	3.3	3.2	4.2
NEP (測定) [$\times 10^{-19}\text{W}/\sqrt{\text{Hz}}$]	8-9	9	10-11	10-11	7	8	7.5	10

表 2: 250 nm 厚 SiN 薄膜を用いた場合の TES 検出器のアレイ中での特性。

検出器	測定 3			測定 4		
	P16	P69	P09	P66	P64	P72
足の長さ [μm]	1000	1500	1000	1500	1500	1500
T_c [mK]	103	106	105	105	101	102
R_n [m Ω]	169	158	160	170	170	166
飽和電力 [fW]	21.3	3.5	10	3.6	5.5	3.4
G [pW/K]	0.55	0.067	0.25	0.07	0.11	0.065
NEP (計算) [$\times 10^{-19}\text{W}/\sqrt{\text{Hz}}$]	4.0	1.42	2.7	1.45	1.8	1.4
NEP (測定) [$\times 10^{-19}\text{W}/\sqrt{\text{Hz}}$]	7.5	5	6	5	6	5