

# 次世代X線天文衛星搭載へ向けたTES型X線マイクロカロリメータの開発

首都大学東京 理工学研究科 物理学専攻 宇宙物理実験研究室 M1

大石 詩穂子

私は将来のX線天文衛星搭載 DIOS (Diffuse Intergalactic Oxygen Surveyor)へ向けた、X線分光器 TES (Transition Edge Sensor) 型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。

## \* TES型X線マイクロカロリメータの原理

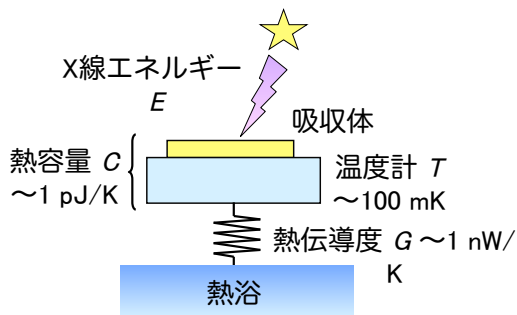


図1: マイクロカロリメータの構造

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、素子の熱量、温度計の感度で決まる。

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

## \* TESカロリメータの構造と開発現状

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  $\mu\text{m}$  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。アレイ化に向けた課題として、従来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、間に絶縁体して酸化膜を挟みこんだデザインである。3.5 cm角の基板の上に20x20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。~1  $\mu\text{m}$ 以下という非常に良い精度でアライメントがとれており、かつ試作した全種類の配線の抵抗をマイクロプローブで測ったところ、~95%と歩留まりも高かった。また、~50 mKという極低温下での転移特性をみたところ、上部配線がAlの場合はシャープな転移が見えており、良質な配線ができたのだが、Nbの場合は転移特性が悪いことがわかった。現在はNbとAlの界面状態の分析をしつつ、Al/Alの配線上にTESを作り込み、カロリメータを製作している段階である。まだ課題は山積みであるが、課題を一つ一つ解決し、衛星搭載へ向け性能の良い検出器を製作していきたい。

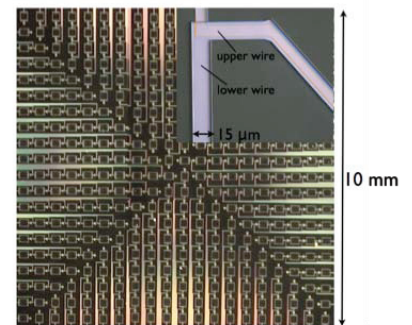
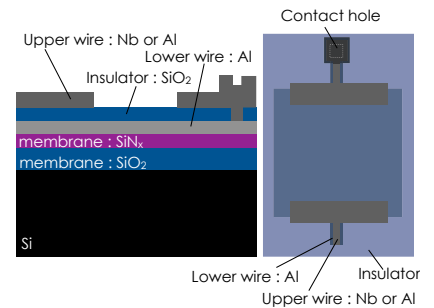


図2: 積層配線のデザイン

図3: 配線写真(400ピクセルアレイ)

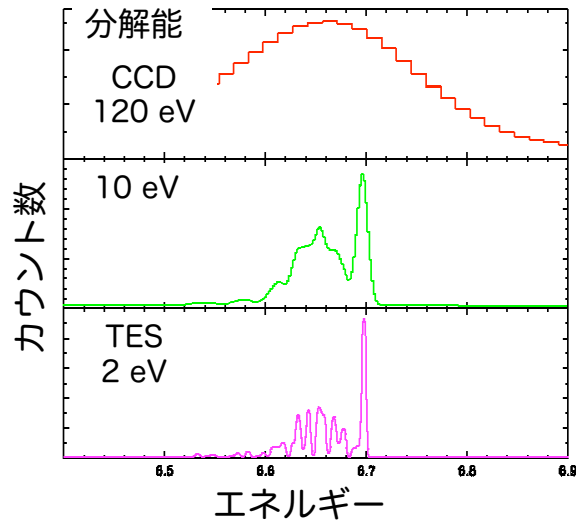
# 次世代X線天文衛星搭載へ向けた TES型X線マイクロカロリメータの開発

首都大学東京大学院 宇宙物理実験研究室 M1  
大石 詩穂子

2010.8.4 (水)  
第40回天文天体物理若手夏の学校 in 豊橋

# 研究背景

0.1 keV~10 keVのX線領域：  
宇宙に存在する主要な重元素の輝線や吸収線が存在

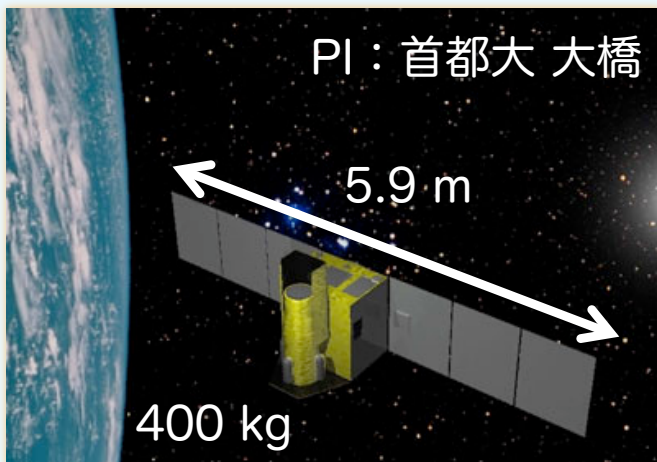


- ・微細構造線を分離できる高い分光性能
- ・広がった天体も観測できる広視野撮像能力

Feの $k_{\alpha}$ 輝線の  
スペクトルシミュレーション

TESマイクロカロリメータが最有力！

## 将来X線天文衛星 DIOS



DIOS衛星 (~2016)

DIOS (Diffuse Intergalactic Oxygen Surveyor)  
WHIM 探査ミッション

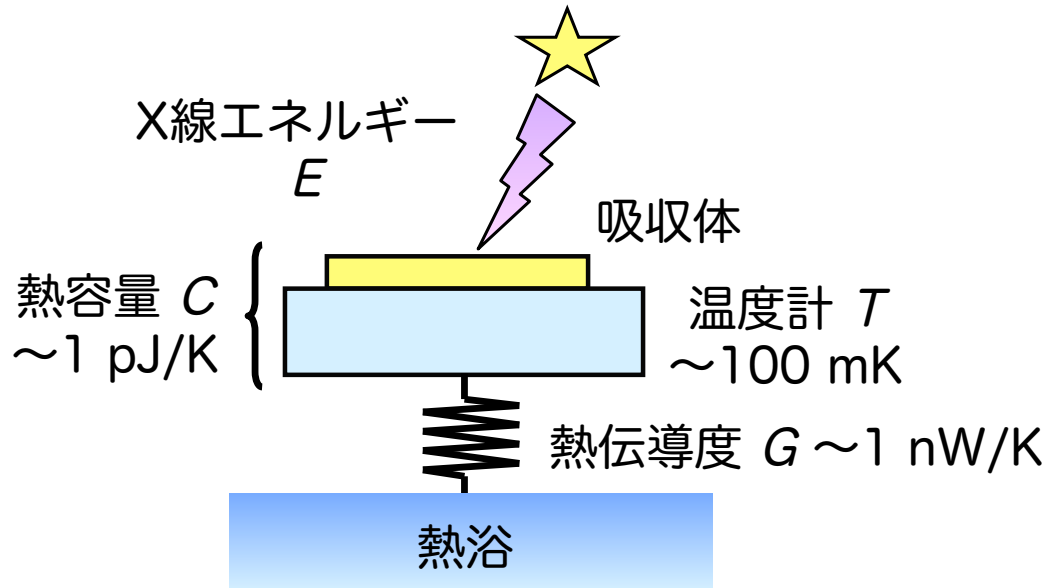
宇宙の大構造に沿って分布する中高温銀河間物質  
(Warm Hot Intergalactic Medium; WHIM)  
からの酸素輝線を観測

分光能力 → 2 eV 程度のエネルギー分解能  
撮像能力 → >256素子のアレイ検出器

# TES型X線マイクロカロリメータ

TES ; Transition Edge Sensor (超伝導遷移端温度計)

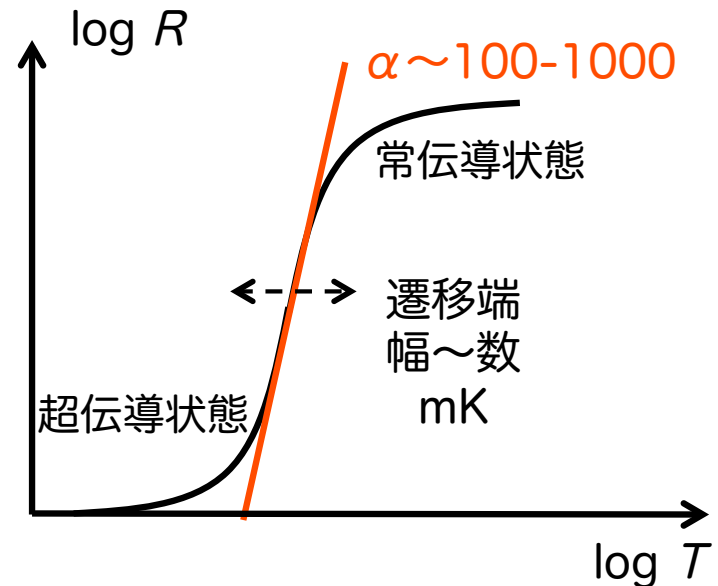
入射したX線光子の1つ1つのエネルギーを素子内部の微小な温度上昇として測る検出器



エネルギー分解能

$$\Delta E_{(FWHM)} = 2\sqrt{2\ln 2} \sqrt{\frac{K_B T^2 C}{\alpha}}$$

超伝導-常伝導遷移端での急激な抵抗変化により素子の温度上昇を計測



温度計の感度

$$\alpha \equiv \frac{\partial \log R}{\partial \log T}$$

高分光性能を達成するには・・・

温度はより低く、熱容量はより小さく、温度計の感度はより高く

# TESカロリメータの技術課題

## TESの転移温度の制御

TESカロリメータの動作温度の制御

\* 単ピクセルの課題

再現性よく高分光性能の素子を生産

衛星搭載実現へ向け・・・

受光面積の拡大→密集したピクセルアレイ

\* アレイ化への課題

1ピクセルあたりの光子検出量のアップ

# 製作プロセス1 (TESの転移温度の制御)



両面窒化膜付きのシリコン基板の上に  
Ti (超伝導)とAu (常伝導) の  
二層薄膜をスパッタにより成膜  
(近接効果を利用)

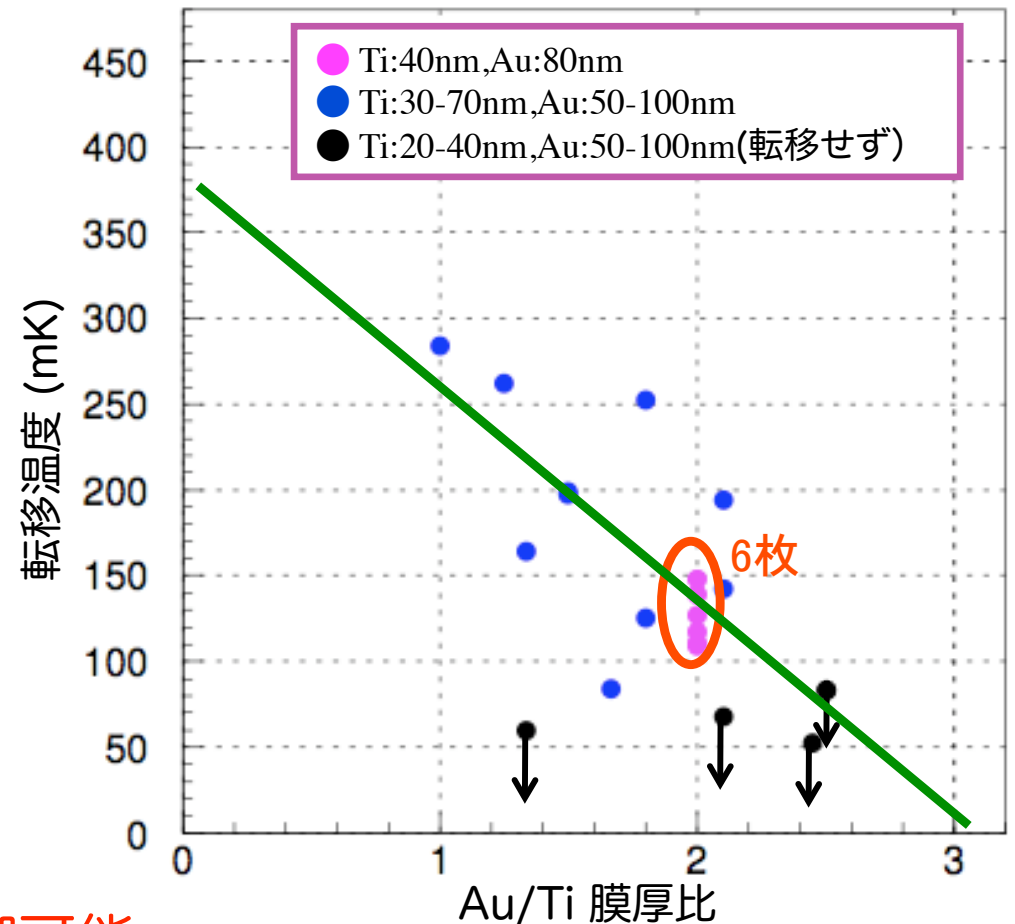
## 条件出しの方法

- ① Ti/Auを30枚スパッタ
- ② 希釈冷凍機で温度に対する抵抗変化を測定(RT測定)  
→ Ti/Au膜厚比と転移温度の関係を再確立



Ti膜厚: 40 nm, Au膜厚: 80 nm  
(Au/Ti膜厚比 2) の条件で

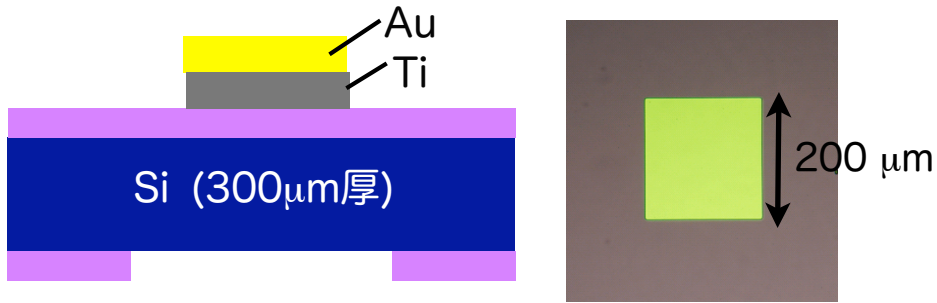
転移温度を110-150 mKの範囲に制御可能



Ti/Au 膜厚比と転移温度の相関

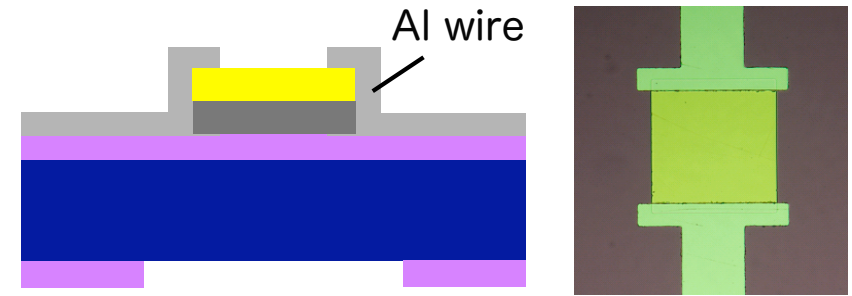
# 製作プロセス2(TES加工)

(i) 裏面窒化膜の裏彫り & TES加工



DRIE法 & フォトリソグラフィ

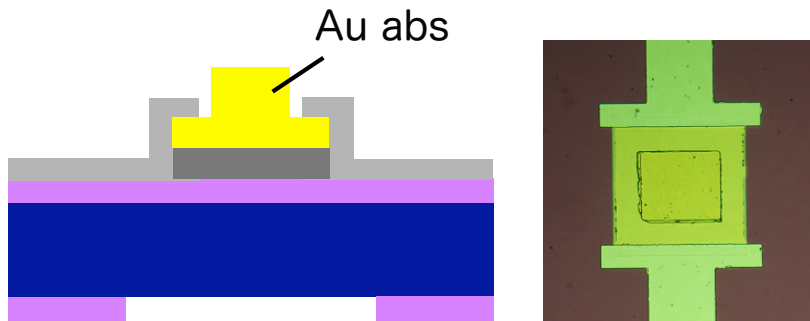
(ii) 配線パターンニングとAl配線形成



スパッタリング法 & フォトリソグラフィ

MEMS技術を利用した  
微細加工プロセス  
(全行程を製作チームで行っている)

(iii) Au吸収体の形成



電子ビーム蒸着法 & フォトリソグラフィ

(iv) メンブレン構造形成



KOH ウェットエッチング

# TESカロリメータの技術課題

## TESの転移温度の制御

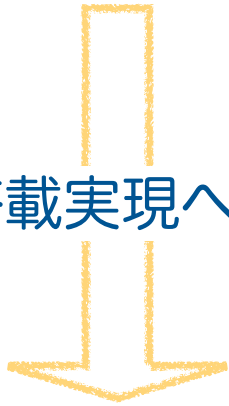
OK !!

TESカロリメータの動作温度の制御

\* 単ピクセルの課題

再現性よく高分光性能の素子を生産

衛星搭載実現へ向け・・・



## 積層配線

受光面積の拡大→密集したピクセルアレイ

\* アレイ化への課題

1ピクセルあたりの光子検出量のアップ



# アレイ化に向けた課題

~従来デザインの問題点~

## 課題1: 基板上の配線スペース

TESの両端から延ばす配線デザイン



配線のスペースが広くなり、  
密集しづらい

→ 16×16ピクセルアレイが限界

## 課題2: ピクセル間のクロストーク

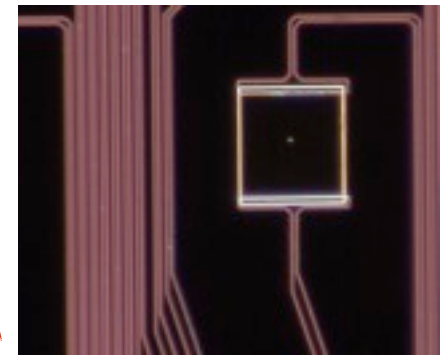
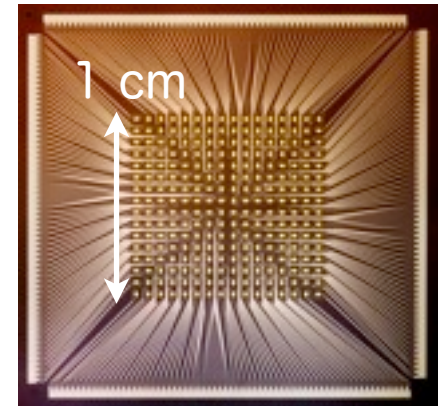
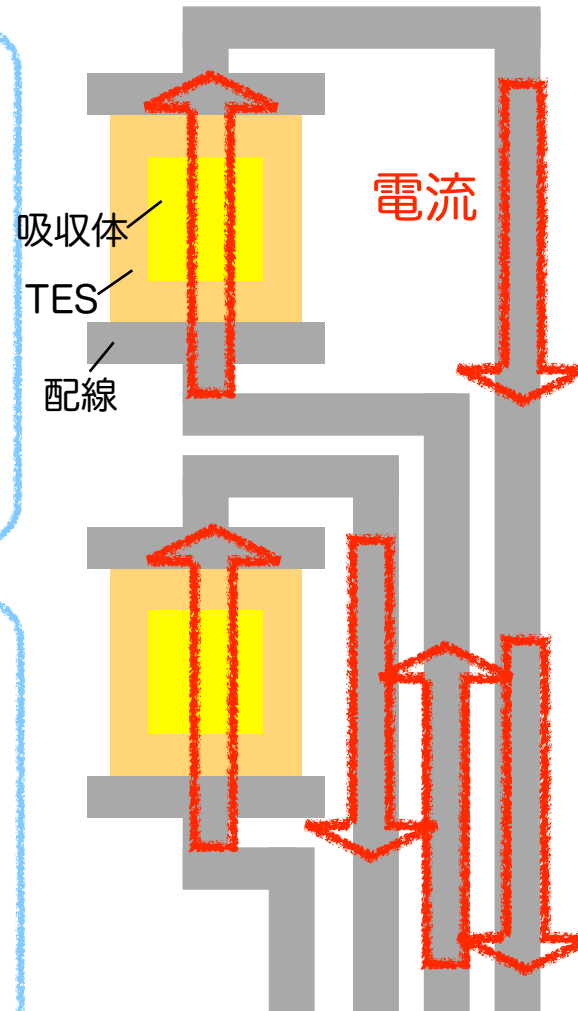
配線がループしているデザイン



電流を流すと磁場が発生

→ ノイズの原因になる

→ エネルギー分解能に影響



密集した読み出し  
配線の構造

上写真: 16×16ピクセル  
下写真: 1ピクセル拡大

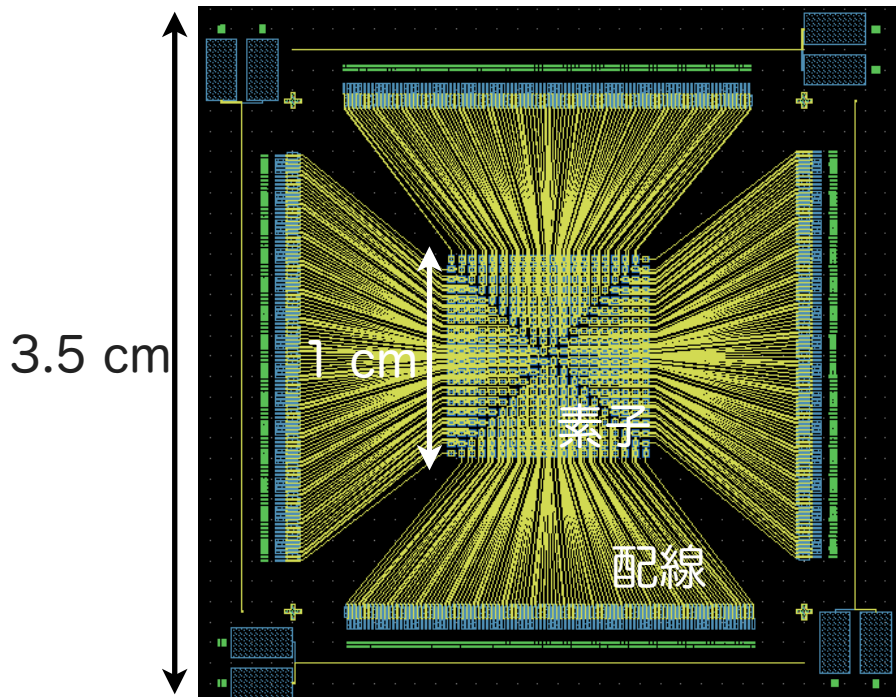
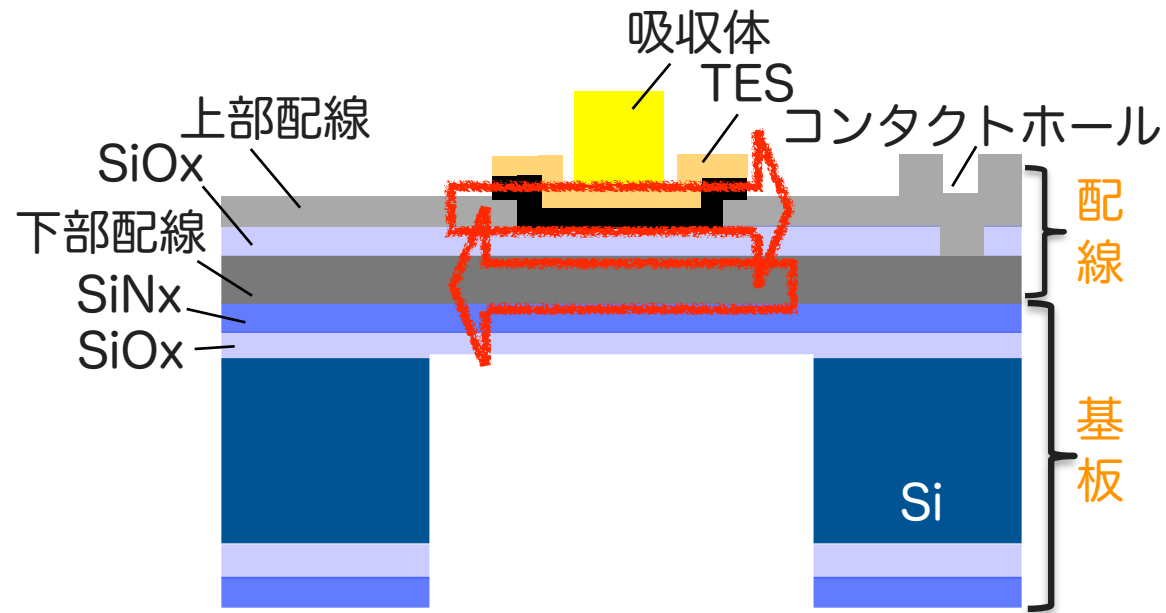
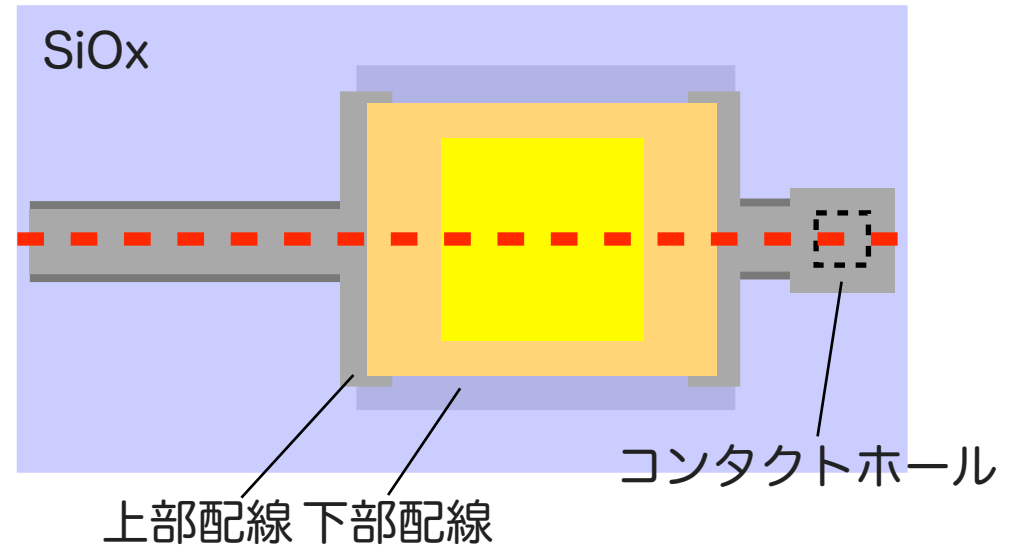
**積層配線 (折り返し配線) を開発！！**

# 積層配線デザイン

~10  $\mu\text{m}$  幅のAl or Nbの配線を  
酸化膜の絶縁膜で  
挟んだサンドイッチ構造



配線が上下に重なっているため  
スペース削減 & 磁場キャンセル

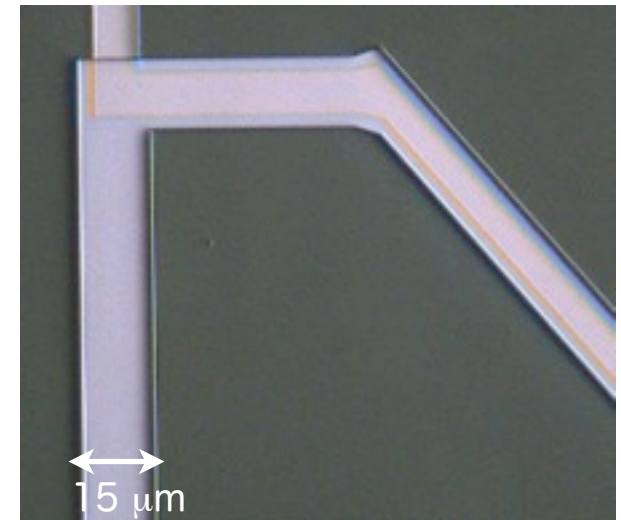
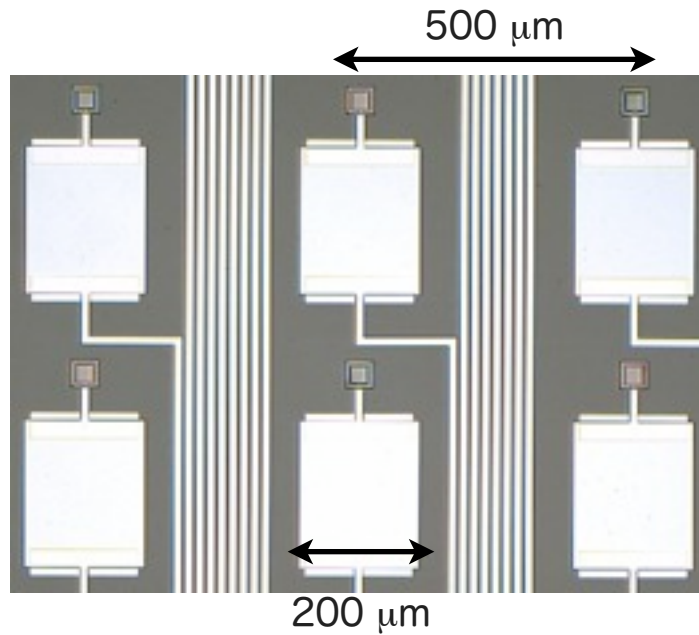
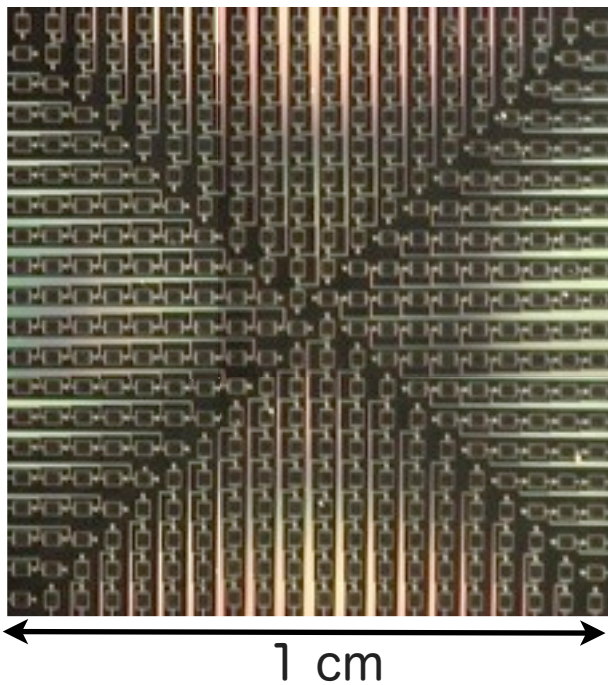
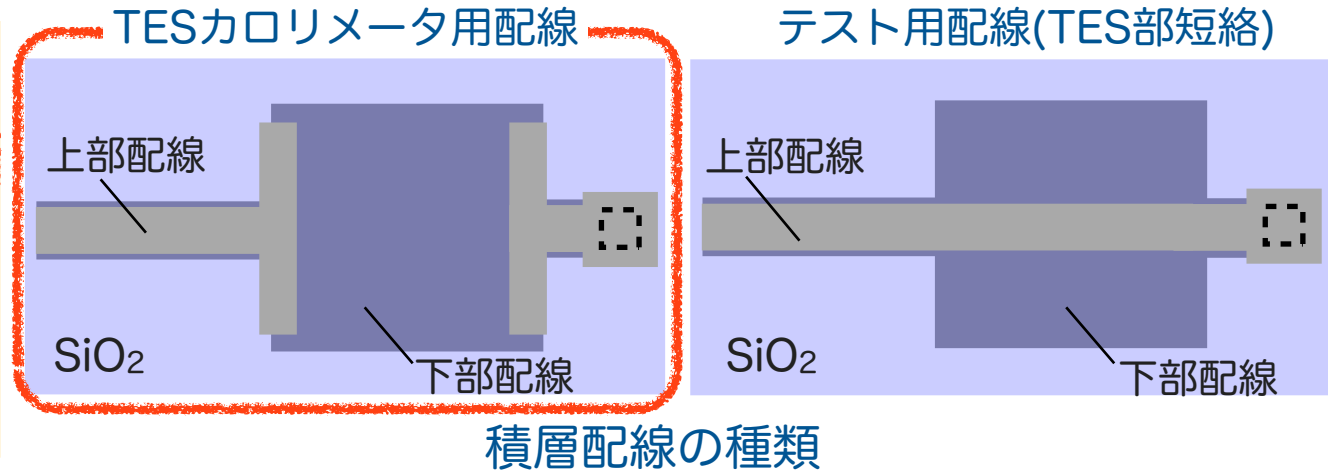


20x20ピクセルアレイ基板

上:上から見た図, 下:断面図

# 20×20ピクセル 積層配線 1

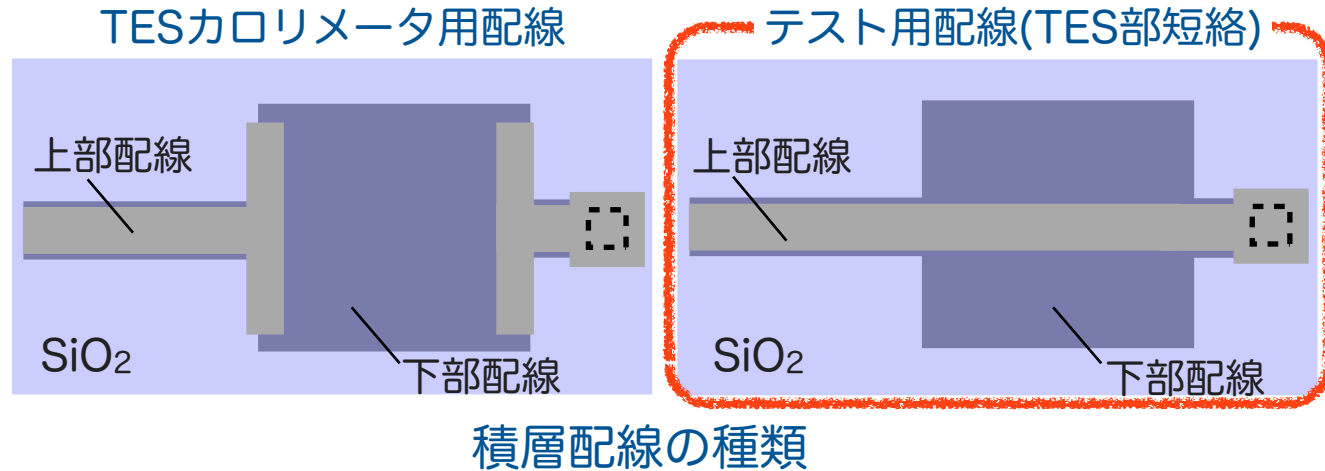
ID	上部配線 (幅 10 $\mu\text{m}$ )	下部配線 (幅 15 $\mu\text{m}$ )
#1	Al t 100 nm	Al t 100 nm
#2	Al t 50 nm	//
#3	Nb t 50 nm	//
#4	Nb t 100 nm	//



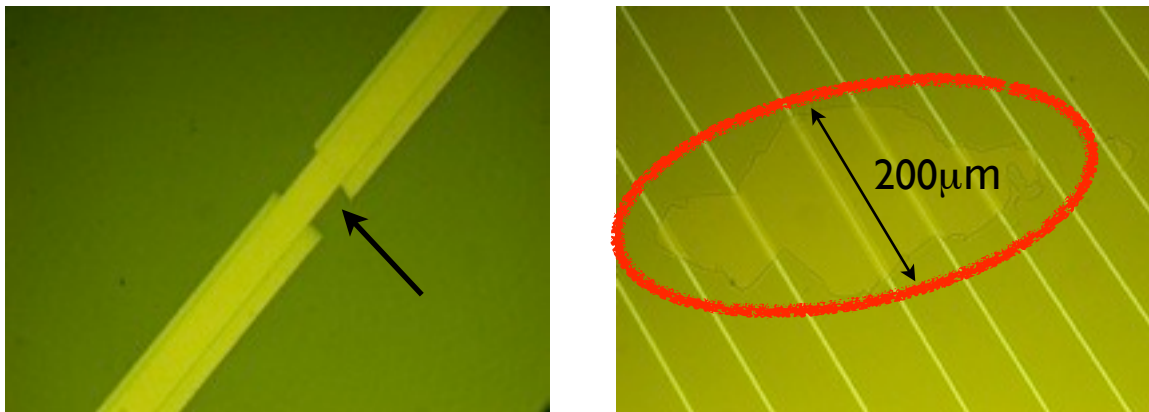
- \* 良好な精度 ( $<1\mu\text{m}$ ) で上下配線のアライメントがとれた
- \* 上部配線と下部配線も正しくコンタクトできた

# 20×20ピクセル 積層配線 2

ID	上部配線 (幅 10 $\mu\text{m}$ )	下部配線 (幅 15 $\mu\text{m}$ )
#1	Al t 100 nm	Al t 100 nm
#2	Al t 50 nm	//
#3	Nb t 50 nm	//
#4	Nb t 100 nm	//

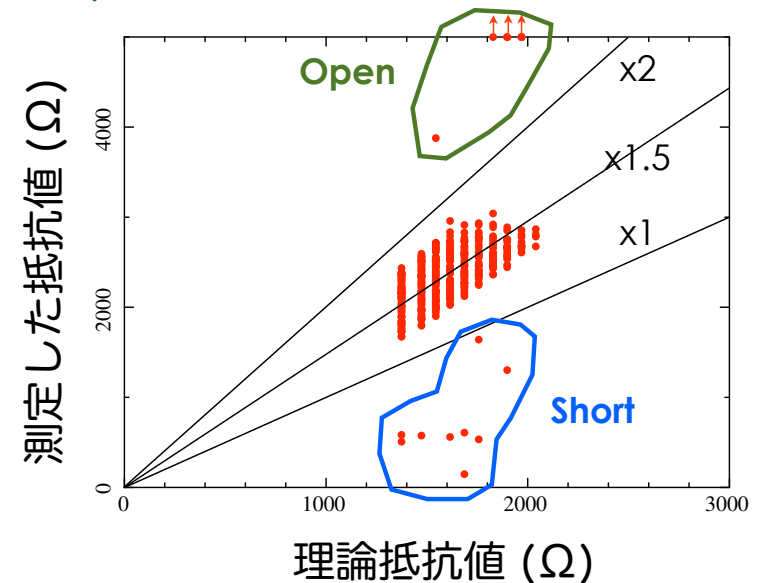


~ 10 $\mu\text{m}$ の幅の微細配線のため  
配線切れなどの不良配線が生成されやすい  
→ マイクロプローバで全配線の抵抗チェック



絶縁膜の剥離や断線

Nb/Alの20×20ピクセル配線 抵抗値



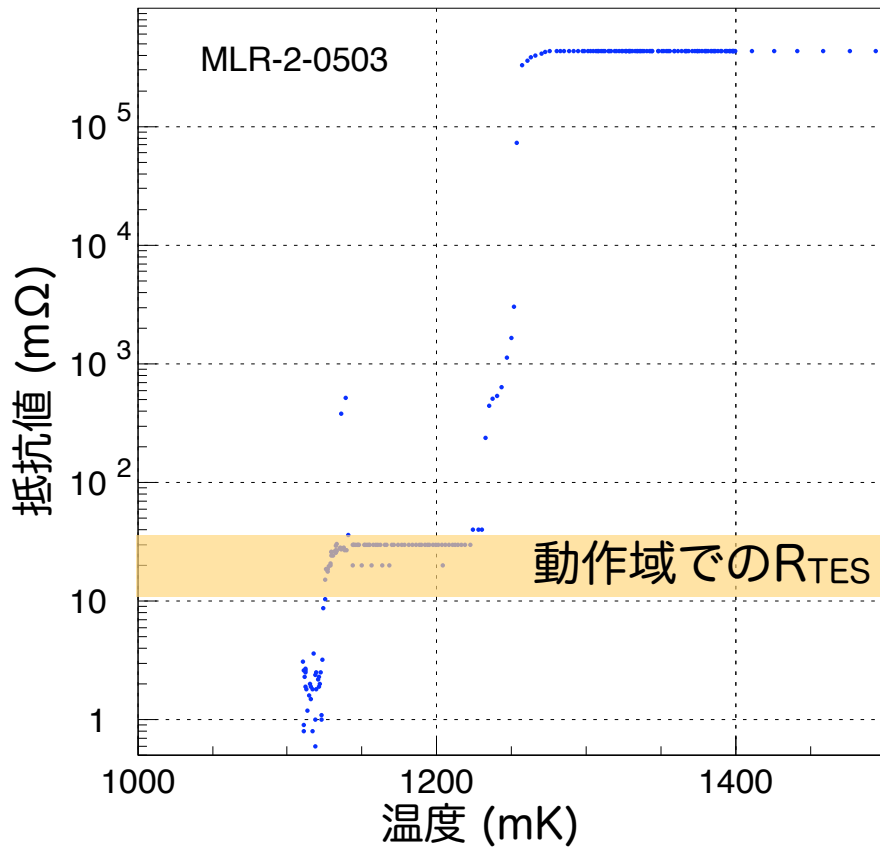
4種類全ての配線の歩留まりが95~97%とかなり高かった

# 20×20ピクセル 積層配線 3

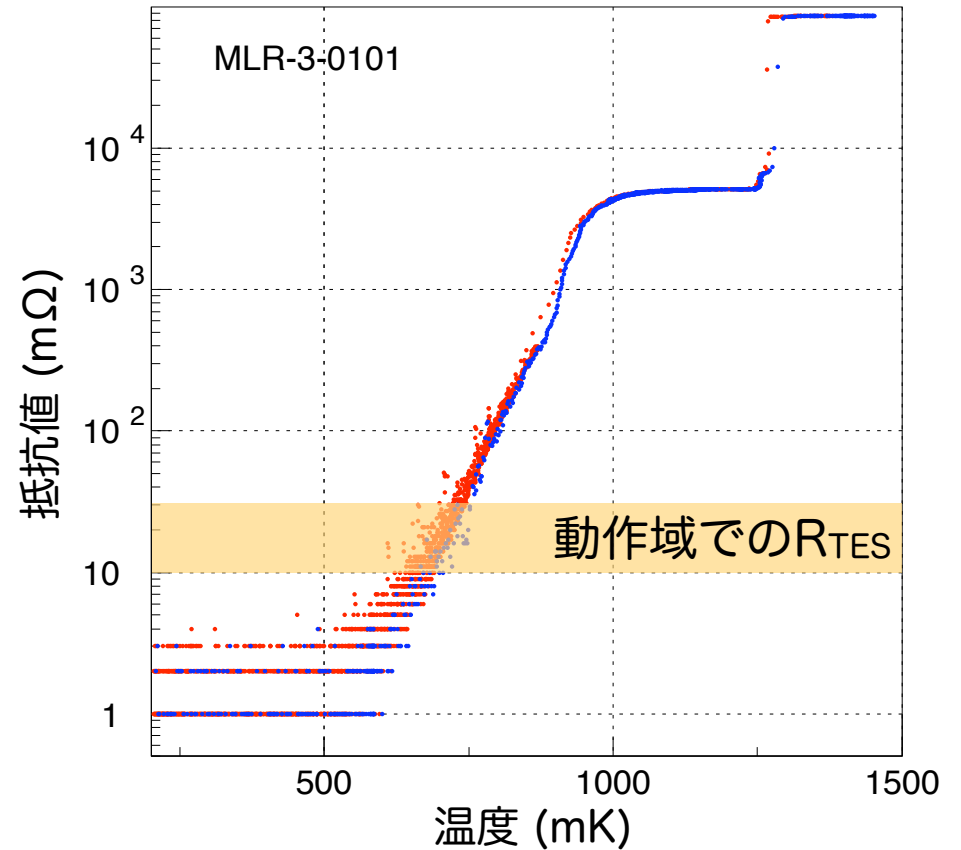
希釈冷凍機に組み込み、配線の抵抗と転移特性を測定(RT測定)

※Alバルクの転移温度(1.2 K),Nbバルクの転移温度(7.0 K)

上部配線 Al / 下部配線 Al のRTカーブ



上部配線 Nb / 下部配線 Al のRTカーブ



- 2段転移→TES動作域(100 mK)では問題なし
- 転移幅が狭くシャープに転移
- 臨界電流が大きい(>100 μA)
- 2段転移→TES動作域(100 mK)では問題なし
- ✗ 転移幅が広くだらだらとした転移
- ✗ 臨界電流が小さい(~ 10 μA)

# これから

## \* 単ピクセルの課題

- TESカロリメータの動作温度の制御
- 再現性よく高分光性能の素子を生産

## \* アレイ化への課題

- 20×20ピクセルアレイの積層配線製作
  - \* Al/Alの場合
    - Al/Alの配線上にTESカロリメータ製作中
  - \* Nb/Alの場合
    - NbとAlのコンタクト部分をFIBで調査中
- 1ピクセルあたりの光子検出量のアップ

マッシュルーム吸収体

