

TES型X線マイクロカロリメータの 磁場に対する応答特性と 自作素子の性能向上を目指した研究

宇宙物理実験研究室

倉林 元

目次

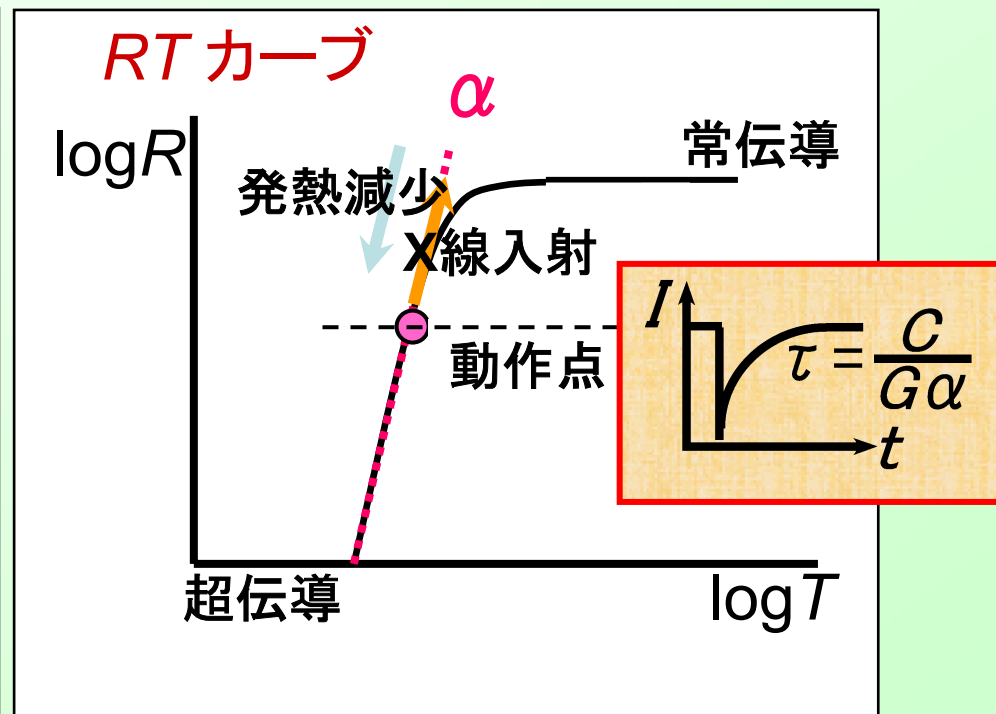
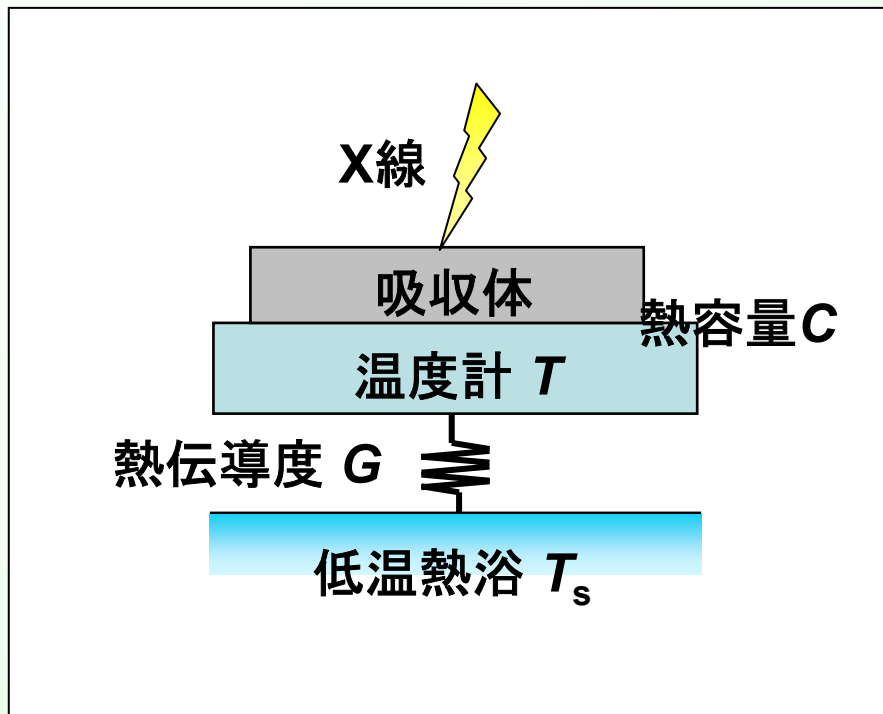
1. TESカロリメータの動作原理
2. 研究背景と目的
3. 製作の過程
4. 製作した素子の評価
5. 考察
6. まとめ

1. TESカロリメータの動作原理

- ・X線マイクロカロリメータ
- ・TES温度計 (Transition Edge Sensor)

X線光子のエネルギーを
素子の温度上昇として検出

超伝導転移端を温度計として利用



エネルギー分解能

$$\Delta E \propto \sqrt{k_B T^2 C / \alpha}$$

温度計の感度 $\alpha = \frac{d \log R}{d \log T}$

2. 研究背景と目的

- 次世代X線天文衛星

NeXT ・ ・ 銀河団のガスダイナミクスを探る

- Feライン(6.7 keV)のドップラーシフトの精密測定
- 5 eV 以下のエネルギー分解能、アレイ化が必要

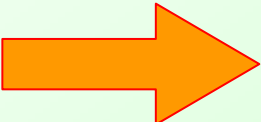
- 自作素子の開発

これまで、首都大、宇宙研が性能評価

セイコーインスツル(SII) or 三菱重工 & 早稲田で素子製作

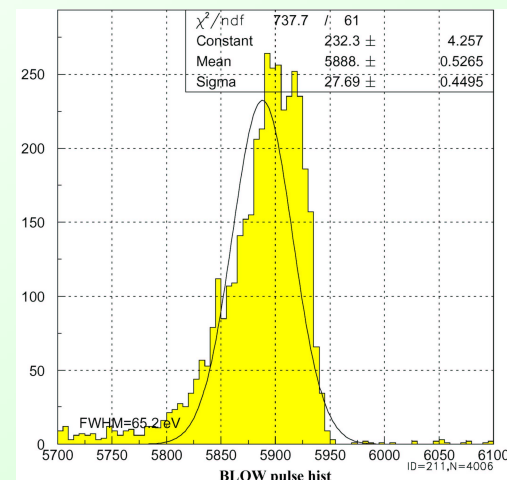
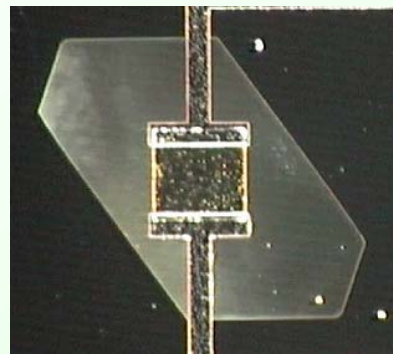
→ 性能をリミットしている原因追求が困難！

プロセス変更到手間と時間がかかってしまう！

- 
- ・in-houseで製作して開発効率を上げる
 - ・衛星搭載に向けて、より実用的な素子を作る

昨年度までの成果

- in-house製作に成功
- 吸収体を付けていない
- 転移温度が高い



→ エネルギー分解能 65 eV@ 5.9 keV

➡ 十分な性能とは言えない...

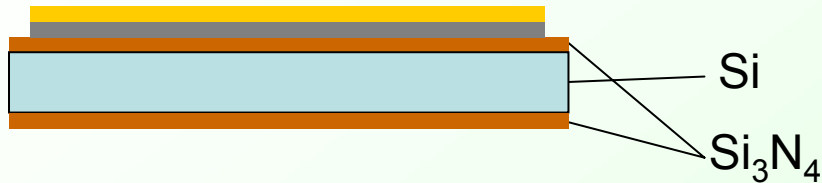
今年度の目標

- 吸収体を付ける
- 転移温度を下げる
- エネルギー分解能 5 eV を切る

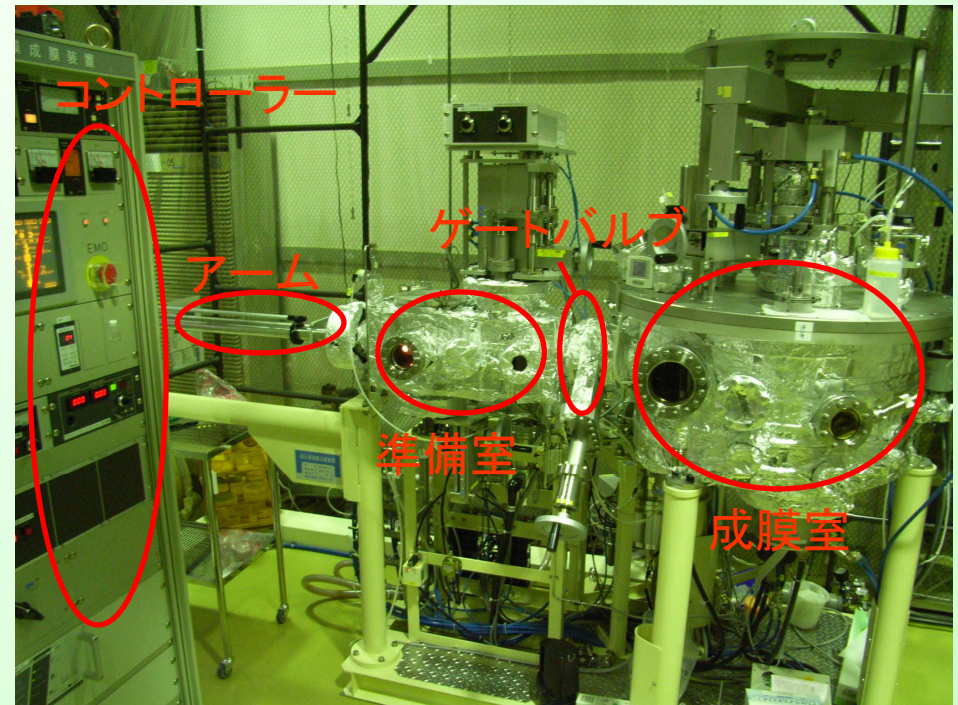
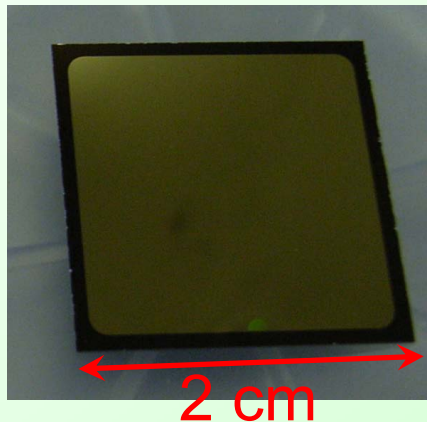
(チーム内の記録: 6.3 eV、世界記録: 2.4 eV)

3. 製作の過程

①窒化膜付きSi基板にAu・Ti を成膜



- Si基板: 200 μm
- 窒化膜: 260 nm
- Au: ~ 100 nm
- Ti: ~ 40 nm



首都大スパッタ装置
成膜真空度: $\sim 10^{-7}$ Pa

②裏面窒化膜のパターニング



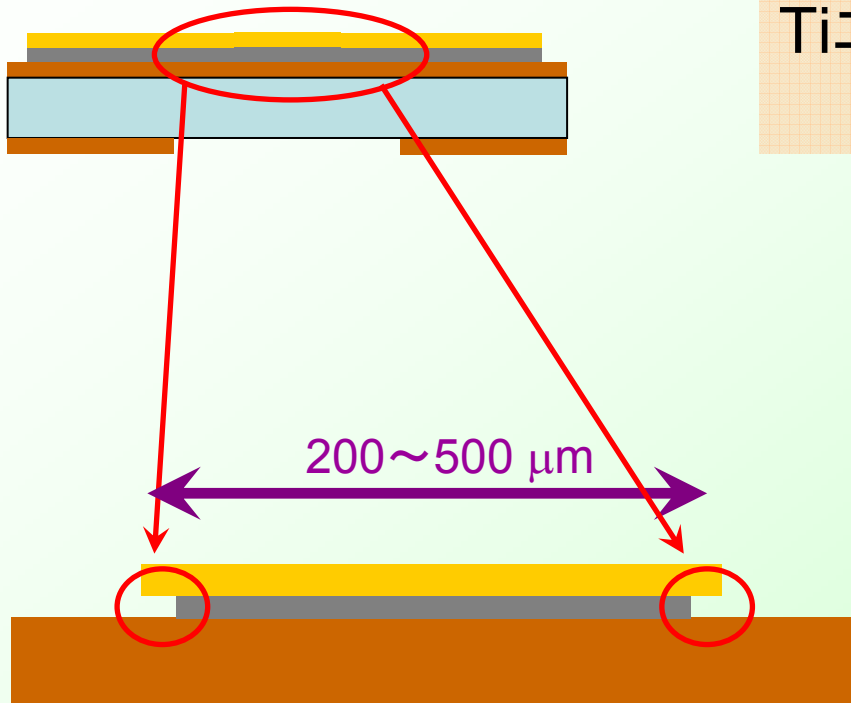
DRIE (Deep Reactive Ion Etching)

- ・ ・ ドライエッチングの1つ
- イオンを叩きつけて膜を削る



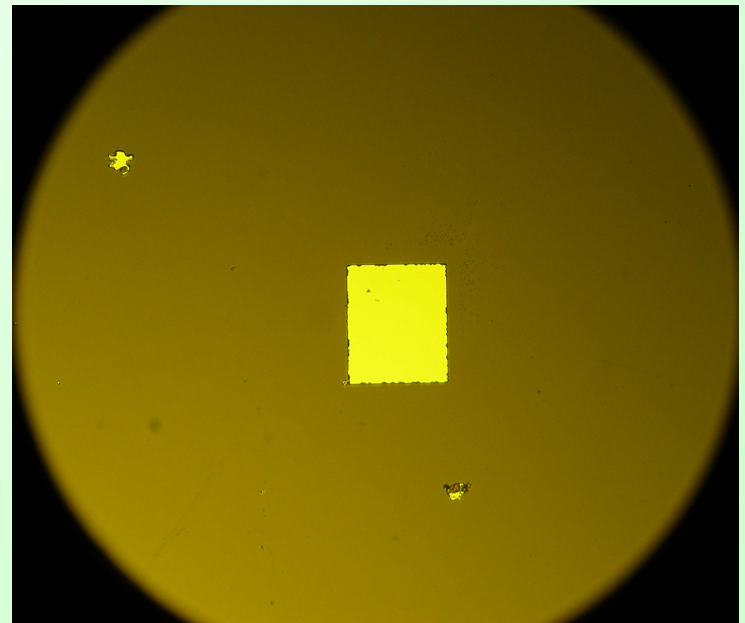
産総研DRIE装置

③TESパターニング

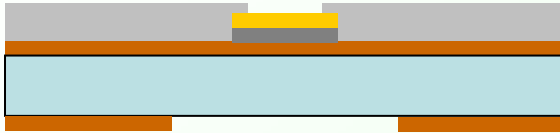


オーバーエッチング $1 \sim 2 \mu\text{m}$

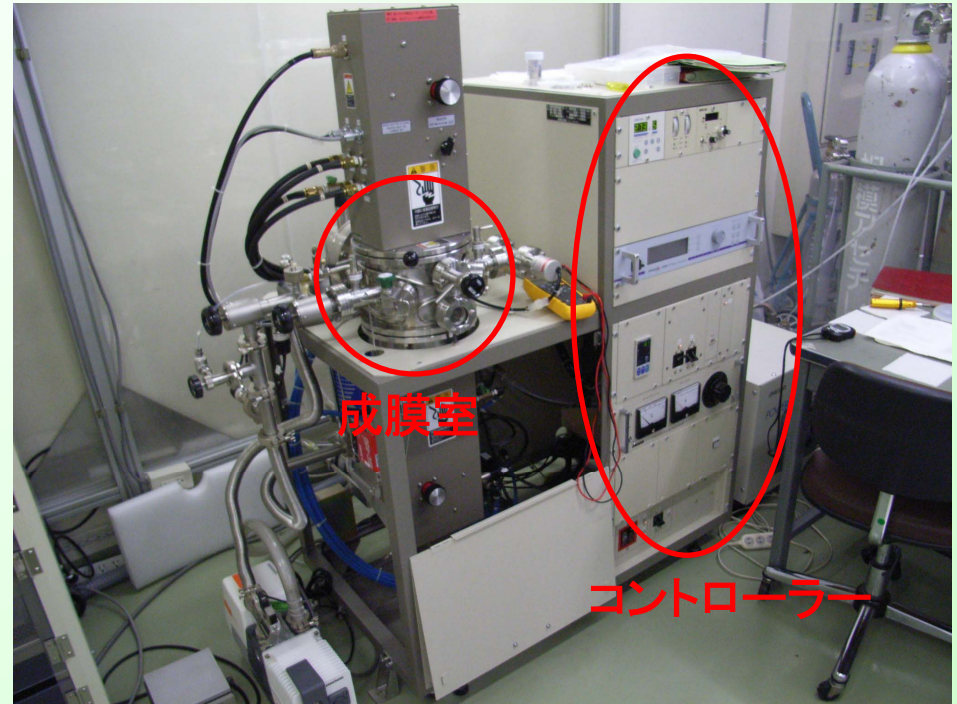
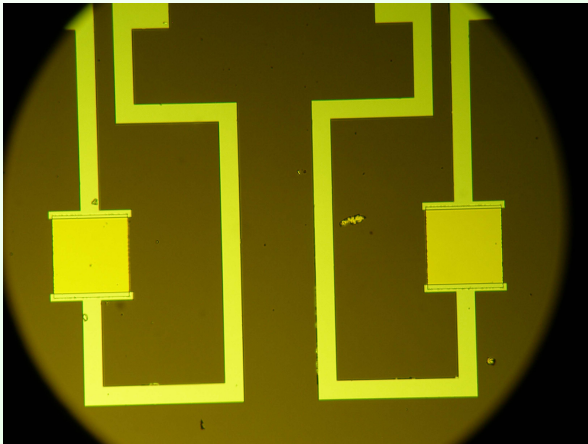
Auエッチング・・AURUM101に約10秒
(ヨウ素系溶剤)
Tiエッチング・・過酸化水素水に
約3時間



④Al配線形成



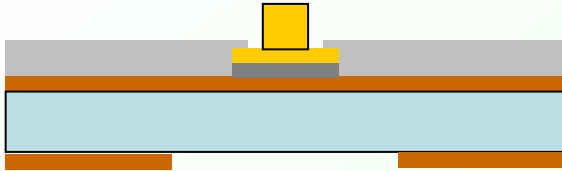
Al配線: 200 nm厚
100 μm 幅



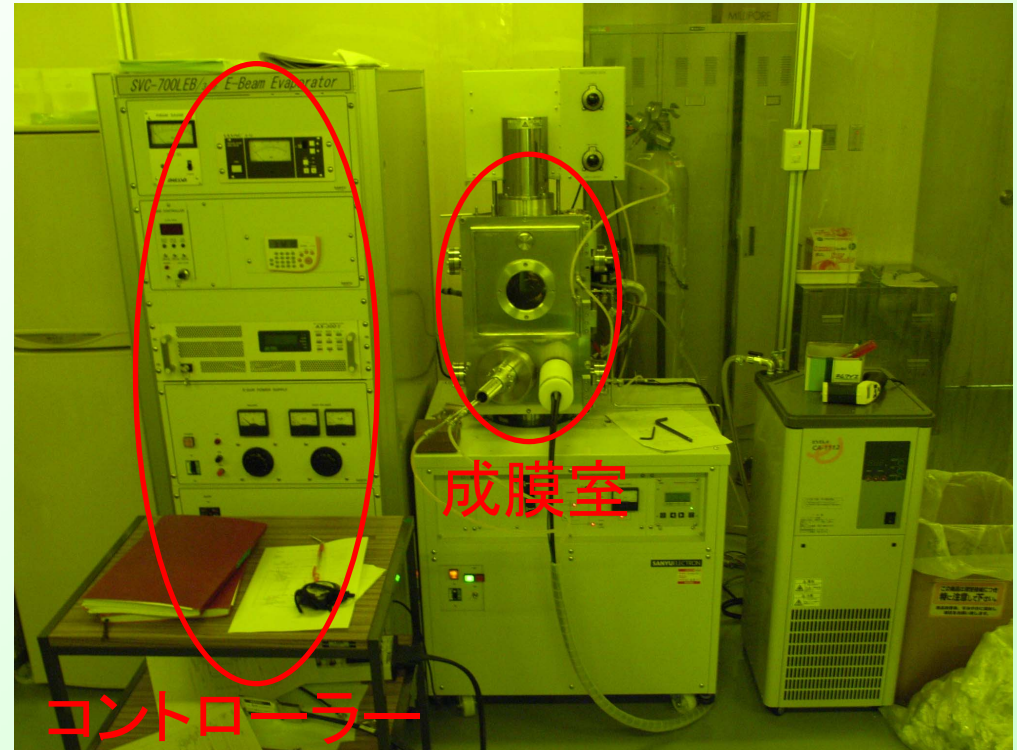
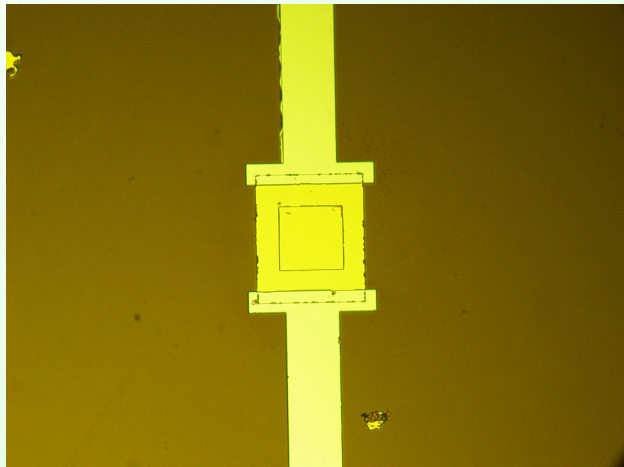
宇宙研Alスパッタ装置
成膜真空度: $\sim 10^{-5}$ Pa

今年度から

⑤Au吸収体形成

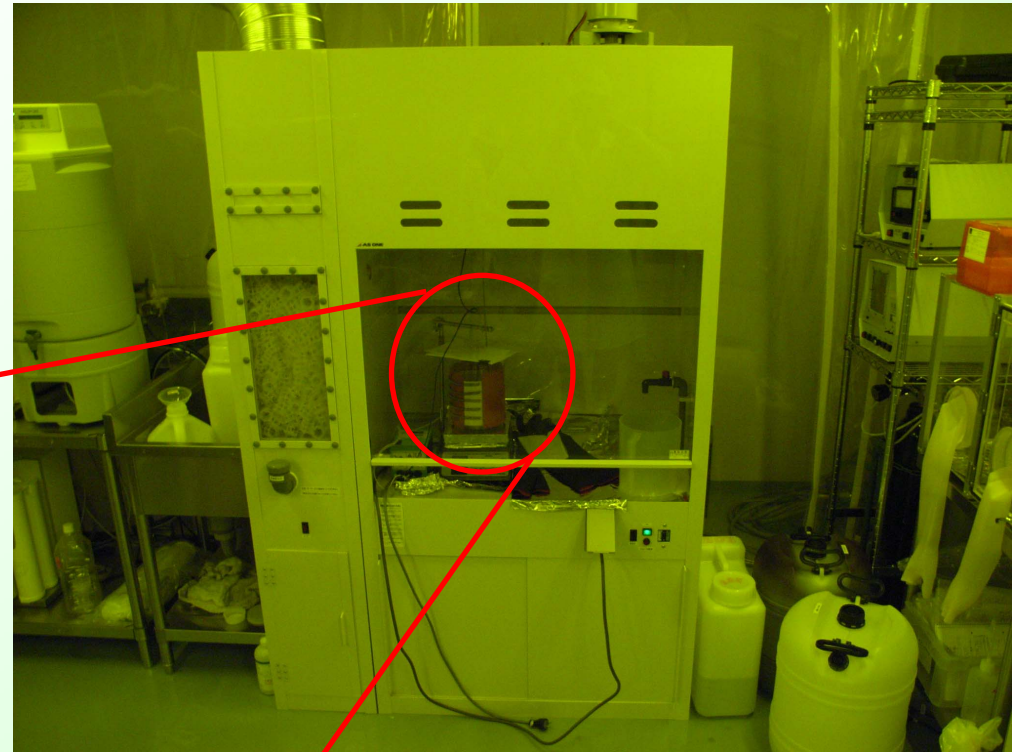
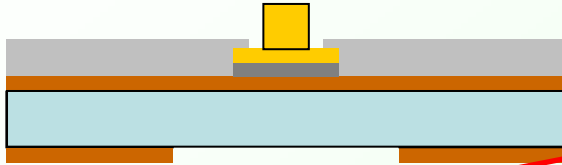


Au吸収体: 数100 nm厚
1辺がTESの6割のサイズ

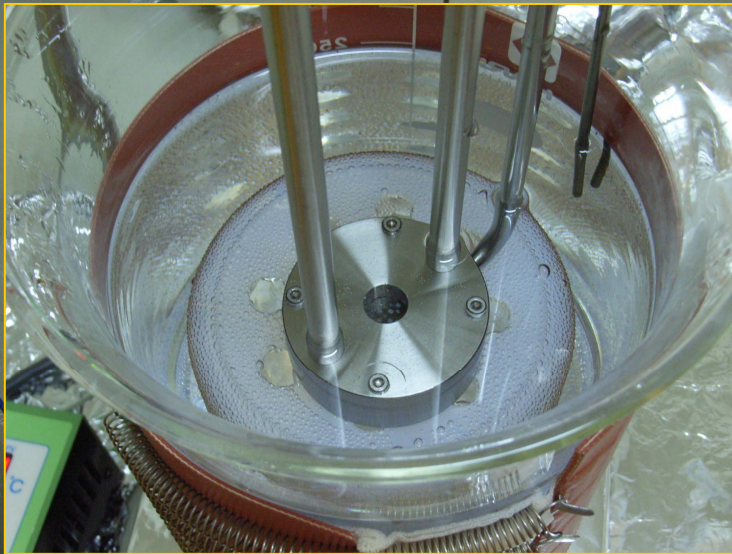


宇宙研電子ビーム蒸着装置
成膜真空度: $\sim 10^{-5}$ Pa

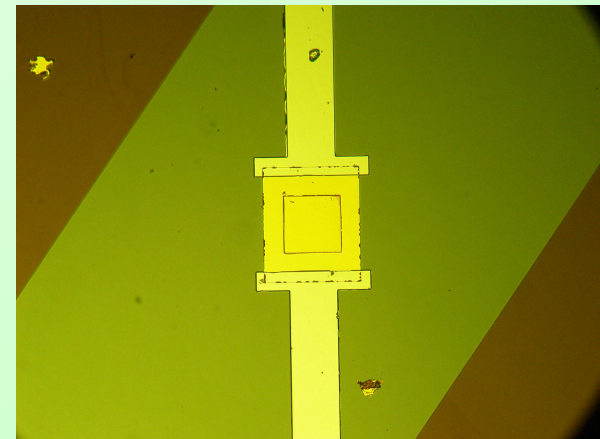
⑥メンブレン構造形成



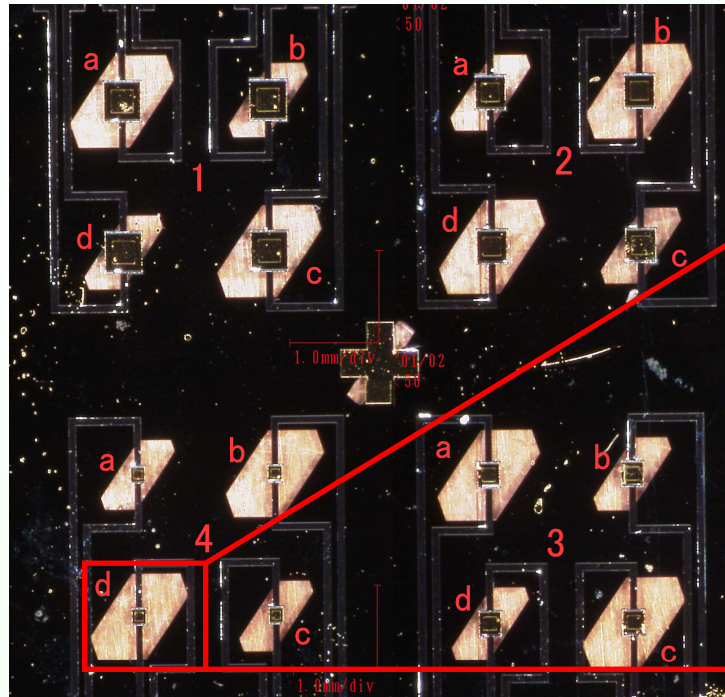
宇宙研KOHエッチング用ドラフト



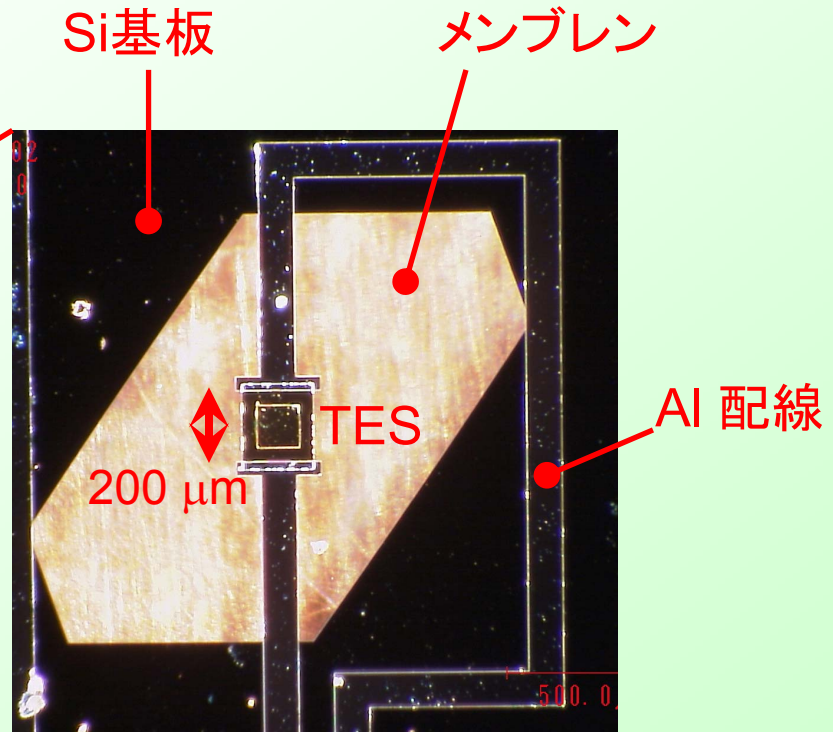
約5時間エッチング



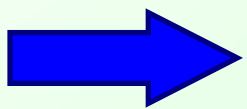
TESの完成！！



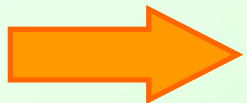
顕微鏡写真(TMU-146)



さらに拡大

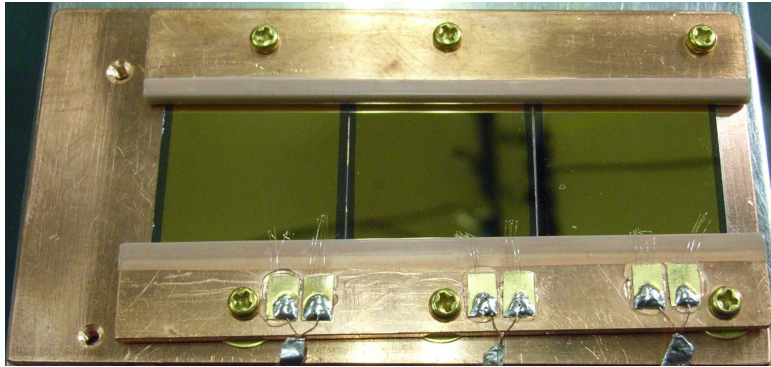


1週間余りかけて製作を進めて完成させたのに、
転移温度が高い or 転移しないことがある。



プロセスを始める最初の段階で転移温度を評価。

転移温度と膜厚の関係を評価

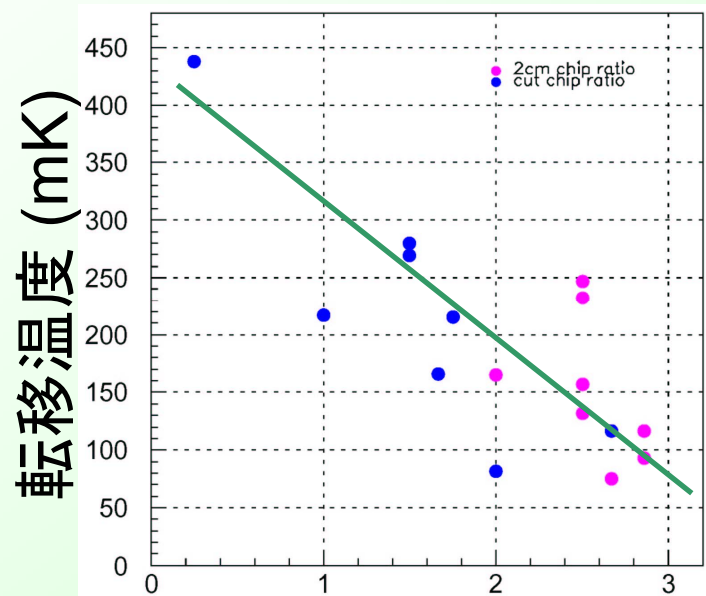


転移温度と膜厚の関係

- Au/Ti の膜厚比が大きいほど T_c 小
- Ti が薄すぎると転移しない

近接効果・薄膜効果

Au/Tiをスパッタした2cm角の
Si基板を同時に3枚組み込み可能



-
- ・膜厚比を～2.5 に決定
 - ・Au/Ti = 100/35,40 (nm)

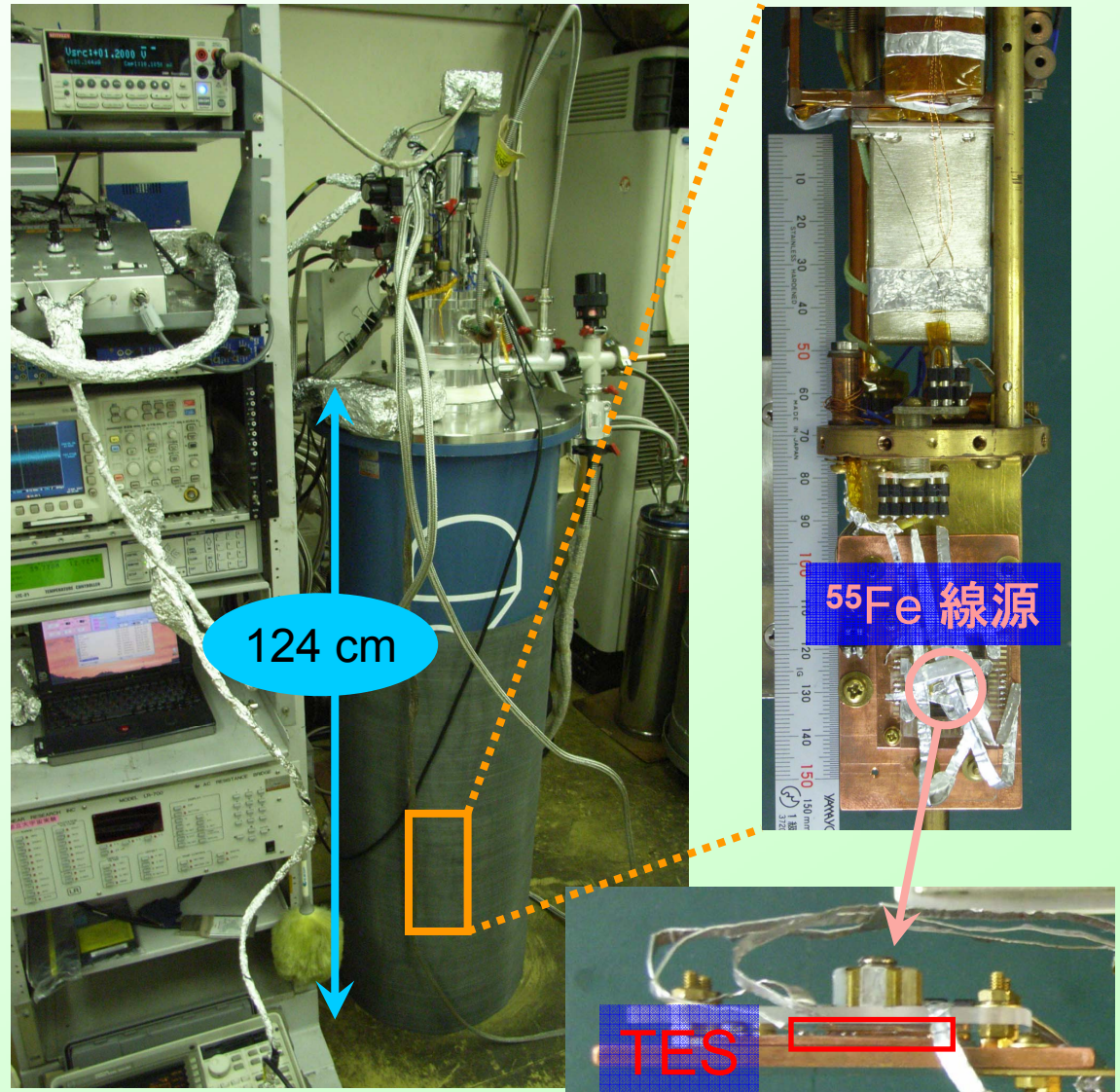
これまでに自作した素子

Chip-ID	吸収体	Au/Ti	転移温度
TMU-110 (昨年度)	なし	80/40 nm	170 mK
TMU-134 (今年度)	あり (170 nm厚)	100/40 nm	244 mK
TMU-146 (今年度)	あり (1.5 μm 厚)	100/35 nm	92 mK (あらかじめ測定)

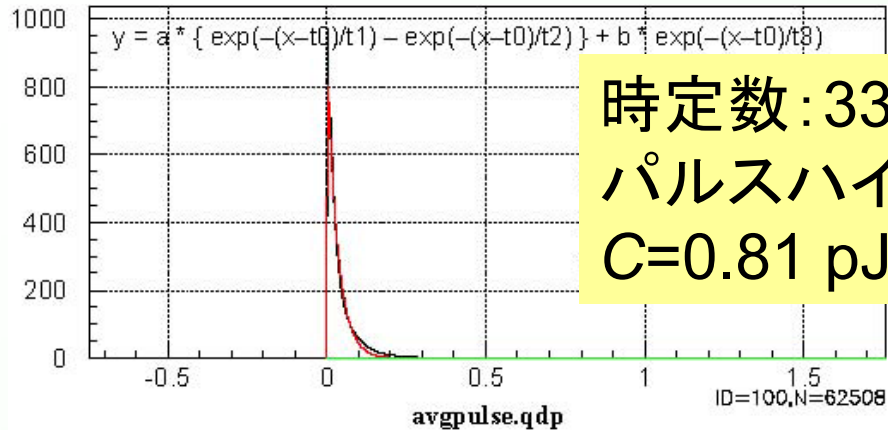
4. 性能評価

首都大希釈冷凍機

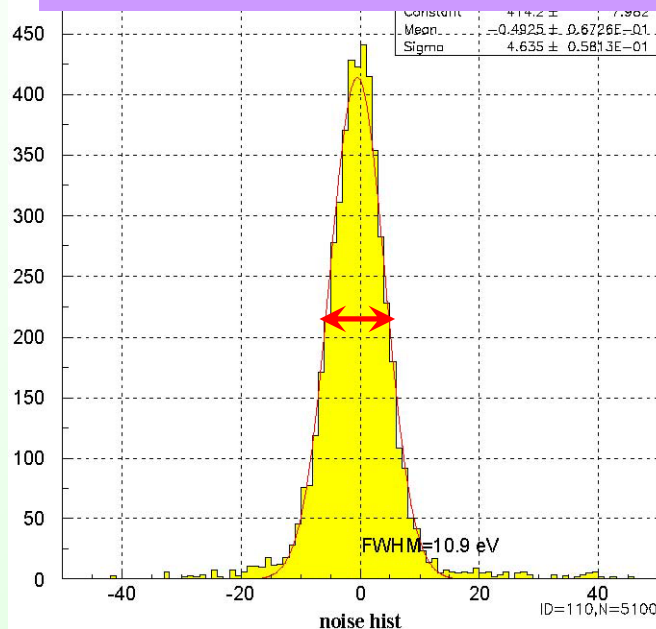
- 最低到達温度
~50 mK
- 温度安定度
数10 μ K



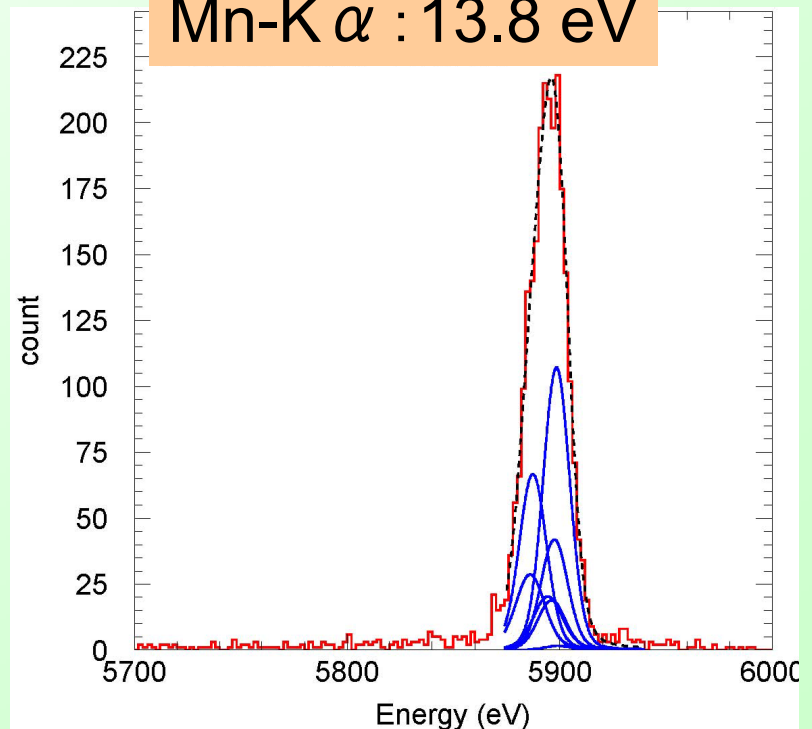
TMU-134の測定結果



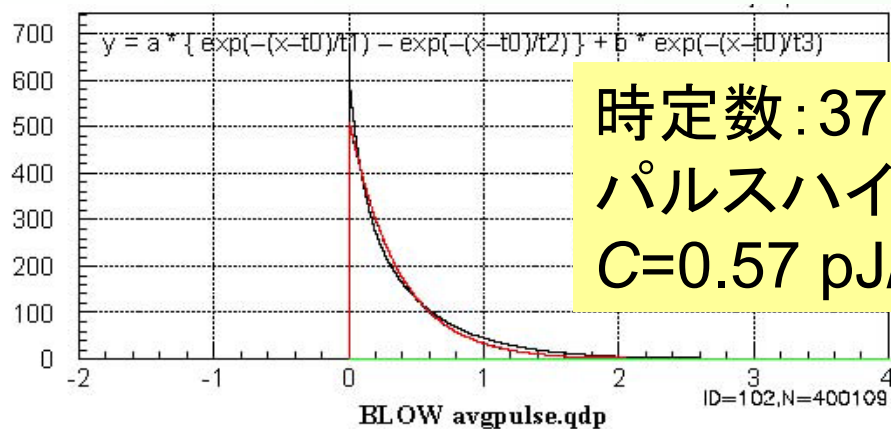
ベースライン: 10.9 eV



Mn-K α : 13.8 eV



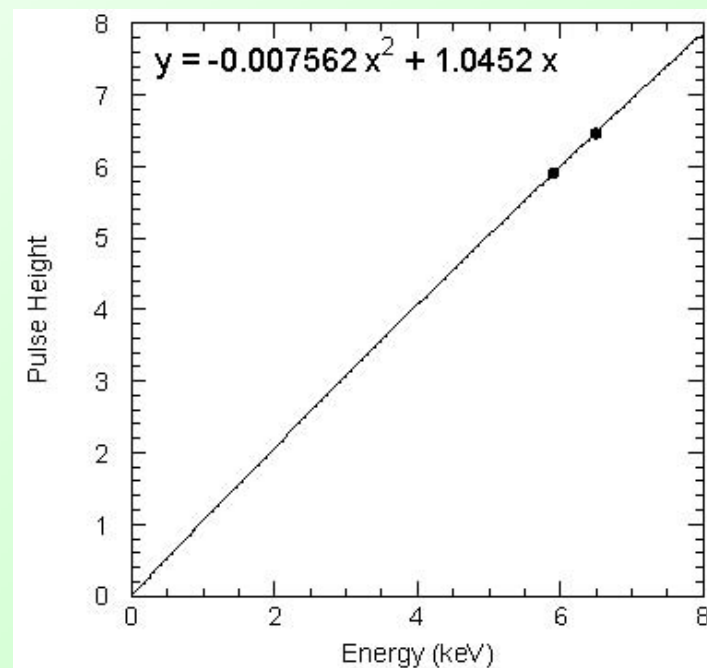
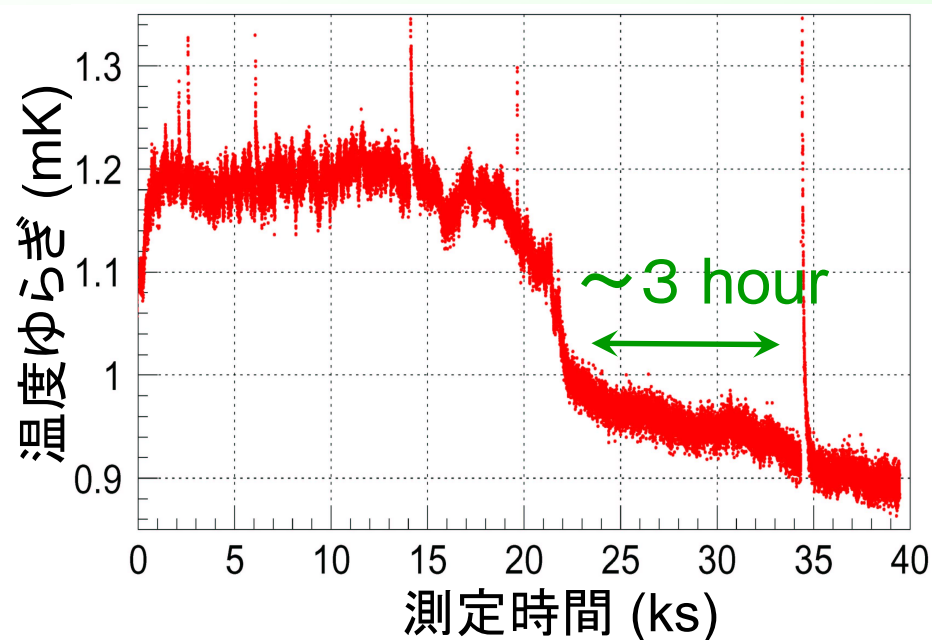
TMU-146の測定結果 その1



時定数: $370 \mu\text{s}$, $T_c=92 \text{ mK}$

パルスハイト: $35 \mu\text{A}$

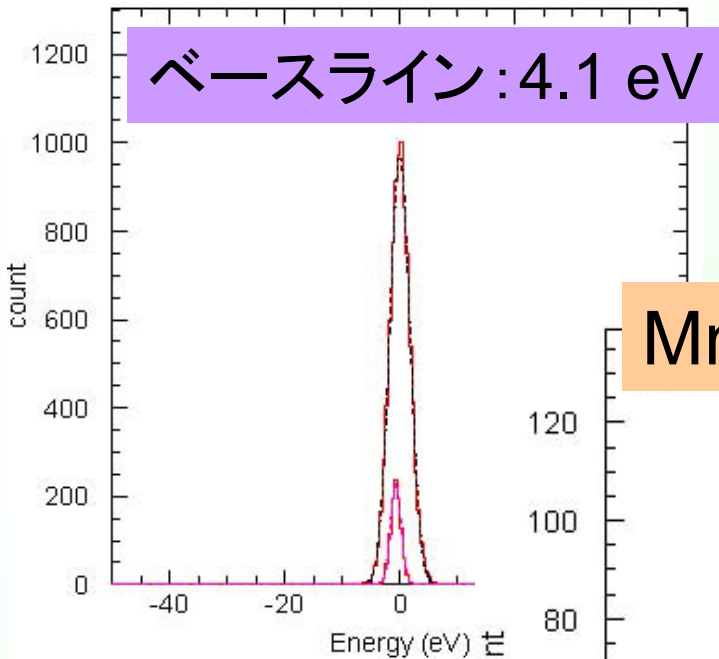
$C=0.57 \text{ pJ/K}$, $G=0.25 \text{ nW/K}$, $\alpha \sim 24.5$



温度ゆらぎの小さいところ
を選んで解析

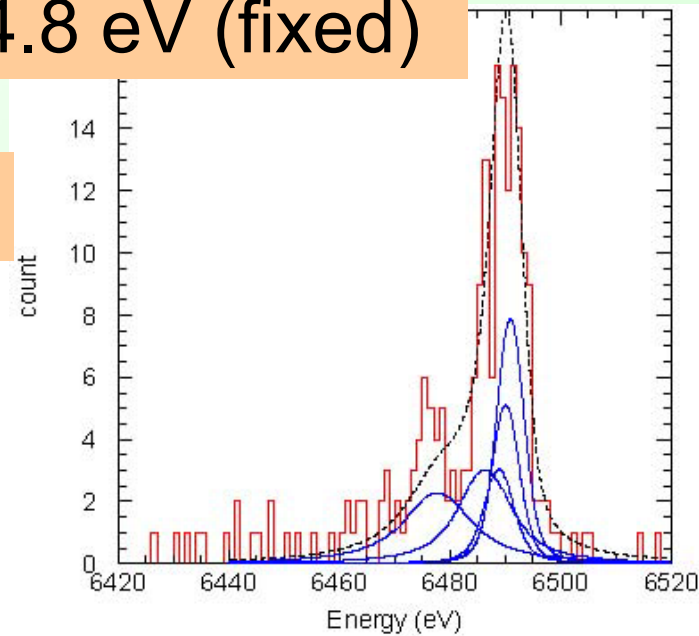
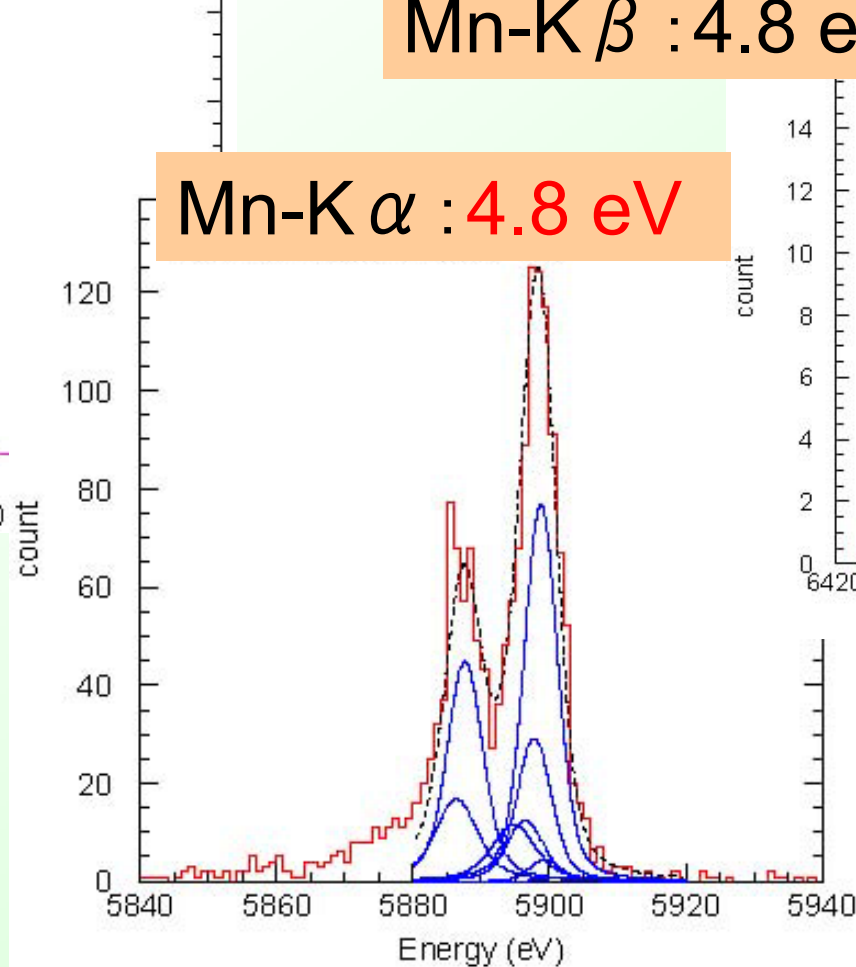
2次関数を使ってリニアリティ補正

TMU-146の測定結果 その2



Mn-K β : 4.8 eV (fixed)

Mn-K α : 4.8 eV



チーム内での新記録！

エネルギー分解能 (TMU-146) の内訳

$$\begin{array}{l}
 \Delta E_{\text{FWHM}} \\
 \text{4.8 eV}
 \end{array}
 \left\{
 \begin{array}{l}
 \begin{array}{l}
 \Delta E_{\text{ばらつき}} \\
 2.5 \text{ eV}
 \end{array}
 \left\{
 \begin{array}{l}
 \text{熱浴の温度揺らぎ} \propto E \\
 \text{波高値のX線入射位置依存性}
 \end{array}
 \right. \\
 \begin{array}{l}
 \Delta E_{\text{ベースライン}} \\
 \text{4.1 eV}
 \end{array}
 \left\{
 \begin{array}{l}
 \Delta E_{\text{TES}} \\
 3.5 \text{ eV}
 \end{array}
 \left\{
 \begin{array}{l}
 \text{Unknown noise} \\
 \text{Johnson noise} \\
 \text{Phonon noise} \\
 \cdot \text{TES - 熱浴間}
 \end{array}
 \right. \\
 \begin{array}{l}
 \Delta E_{\text{readout}} \\
 \text{2.1 eV}
 \end{array}
 \left\{
 \begin{array}{l}
 \text{SQUID noise} \\
 \text{外乱 noise}
 \end{array}
 \right.
 \end{array}
 \right.
 \end{array}$$

5. 考察 ～性能向上の理由～

	吸収体	ΔE	$\Delta E_{\text{ベースライン}}$	$\Delta E_{\text{ばらつき}}$
TMU-110	なし	65 eV	9.4 eV	64 eV
TMU-134	170 nm	14 eV	11 eV	9 eV
TMU-146	1.5 μm	4.8 eV	4.1 eV	2.5 eV

$$\Delta E \propto \sqrt{k_B T^2 C / \alpha}$$

①吸収体を付けた

- 入射X線の熱化が吸収体で十分行われる
- TESへの熱の伝わりが改善
- パルスのバラつきが抑えられる
- 分解能向上！

	転移温度	熱容量 C	ΔE ベースライン
TMU-110	170 mK	1.55 pJ/K	9.4 eV
TMU-134	244 mK	0.81 pJ/K	11 eV
TMU-146	92 mK	0.57 pJ/K	4.1 eV

②転移温度について

$$\Delta E \propto \sqrt{k_B T^2 C / \alpha}$$

TMU-146では転移温度を事前に測定

- TMU-134よりも低い転移温度を実現
- 厚い吸収体をつけても、熱容量は同程度
- 動作温度を下げたことで固有ノイズが減少
- ベースライン分解能向上！

6. まとめ

- Au 吸収体付きカロリメータを in-house 製作した
- 転移温度を 92 mK まで下げた
- 分解能 4.8 eV を達成 → チーム内での新記録！！

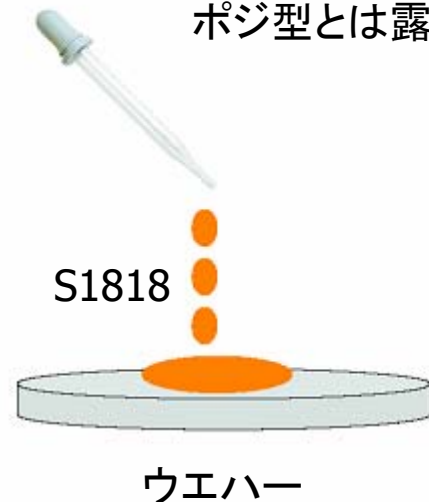
今後の課題

- 開口面積の大きな素子、アレイ化
 - 吸収体の大型化、マッシュルーム構造用の新マスク
- ピクセルサイズとエネルギー分解能の両立
 - サイズの異なるピクセルの測定データの詳細解析
 - 最適パラメータの決定

フォトリソグラフィ

1、フォトレジスト塗布(ポジ型レジストS1818)

ポジ型とは露光した部分が現像によって溶けてなくなる型のこと



2、高速回転によりフォトレジストの膜厚を薄く一定にする(4000 rpm)

3、バーク(フォトレジストの乾燥) 115°C、150s



4、紫外線照射



ガラスマスク(TESやアルミ配線のパターンが描かれている)

5、現像

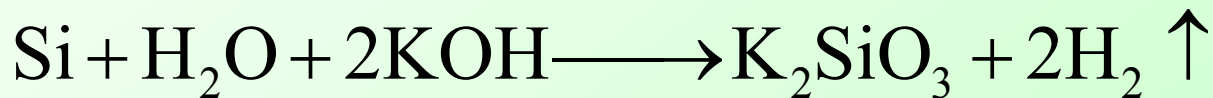
現像液=NMD-3



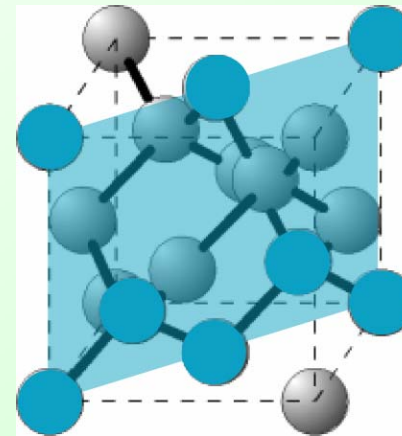
異方性エッチング

- 半導体のマイクロマシン技術を応用
- シリコンをアルカリ(KOH)でエッチングするとエッチング速度が結晶面方位に強く依存

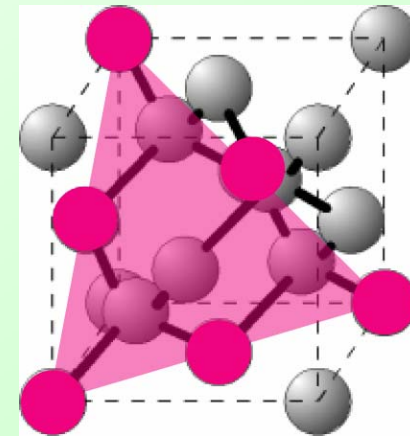
(111)面のエッチング速度が
(100)、(110)面に比べ100倍遅い
→きれいな(111)面をだすことが可能



結晶異方性エッチング



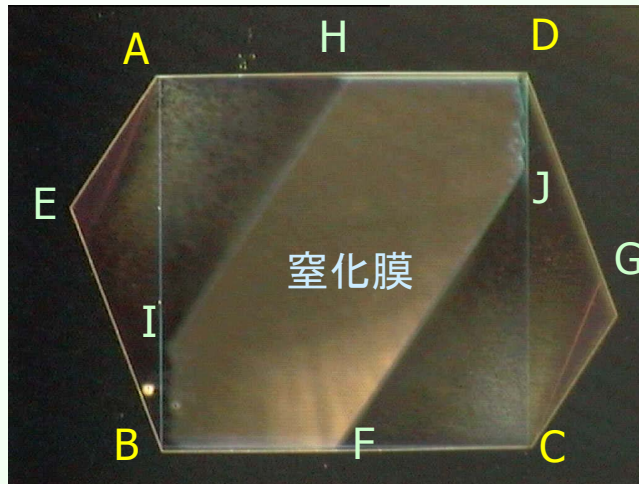
(110)面



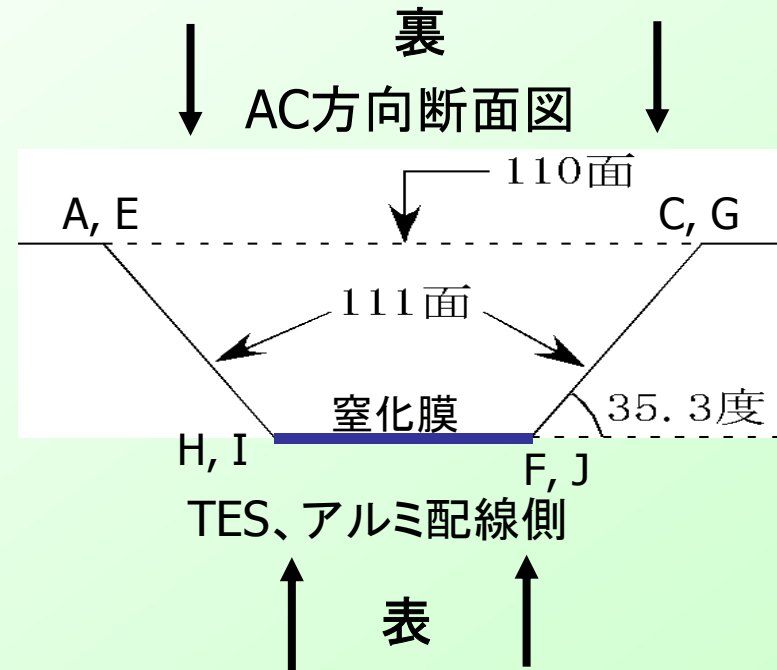
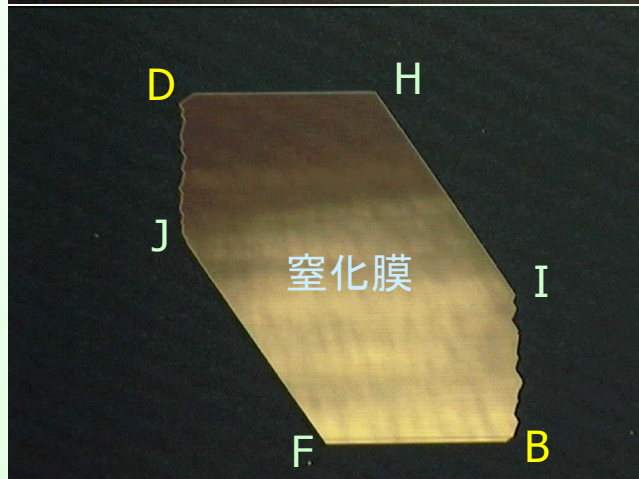
(111)面

(110)シリコンのKOHエッチング後の写真

裏



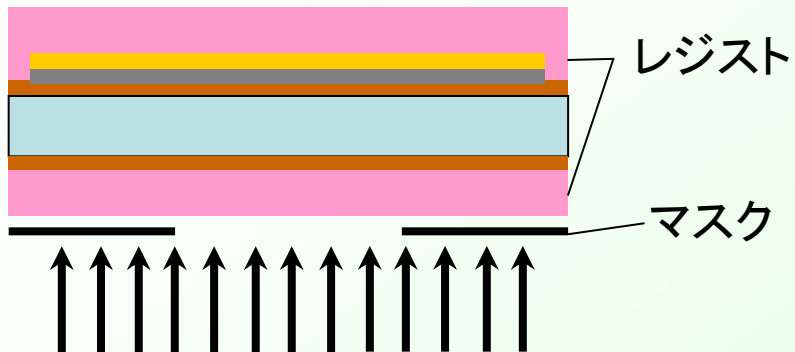
表



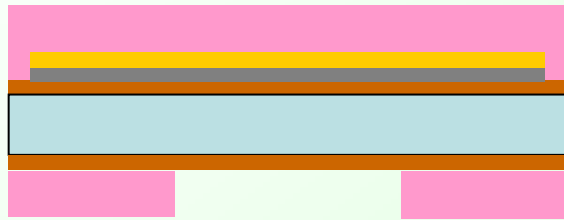
辺BCを(110)シリコンのオリエンテーションフラットに平行になるように合わせた
→辺BCとADは(110)面に対して(111)面が垂直に現れる

③その他

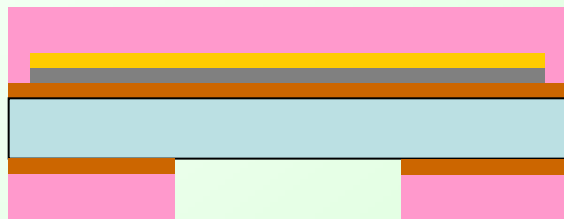
- ・コリメータによる入射位置依存性の改善、
ノイズ環境が良かった
 - パルスのバラつきが抑えられる
 - 分解能向上！



②窒化膜DRIEパターン用レジストと
TES面保護膜レジスト(S1818)を塗布し、
窒化膜DRIEパターン用マスクを当て露光



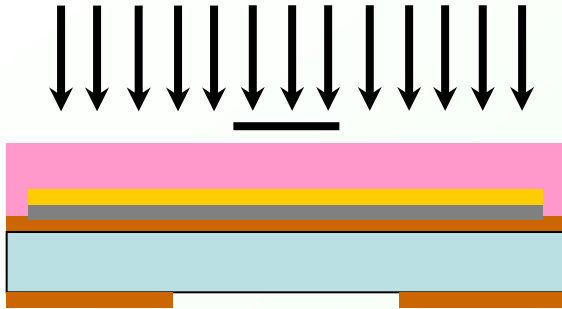
③NMD-3で現像



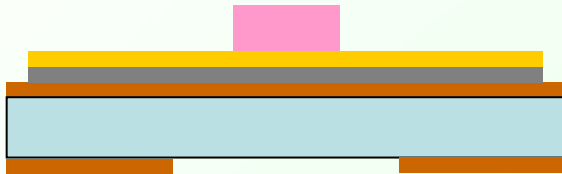
④DRIE



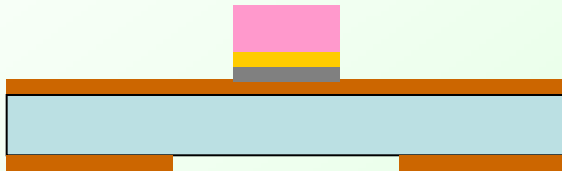
⑤レジストをアセトン・IPA・純水洗浄で除去



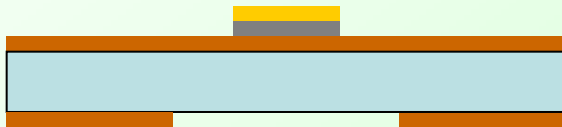
⑥TES面にレジストを塗布し、
TESパターン用マスクを当て露光



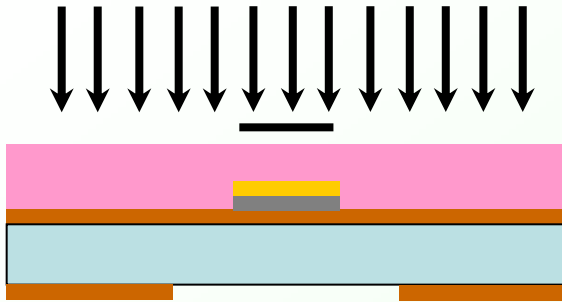
⑦現像



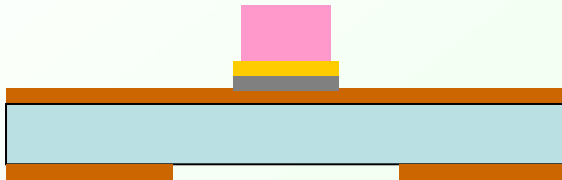
⑧Au,Tiの順にそれぞれAURUM101、
過酸化水素水でエッチング



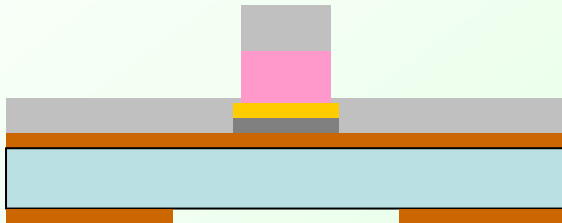
⑨レジストを除去



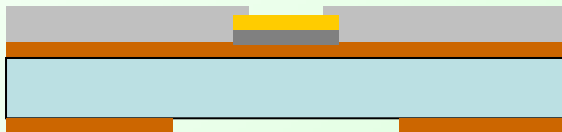
⑩TES面にレジストを塗布し、
Al配線パターン用マスクを当て露光



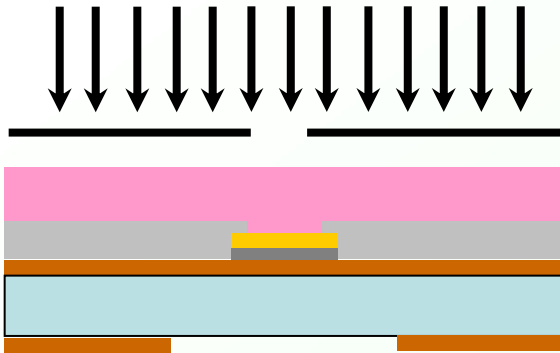
⑪現像



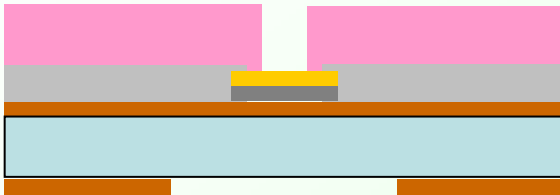
⑫Alをスパッタ



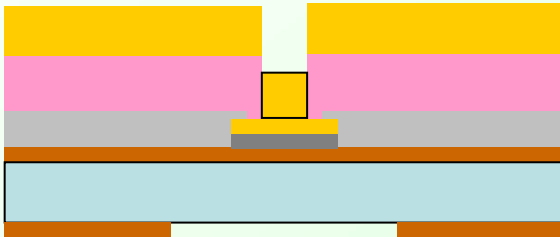
⑬レジストを除去



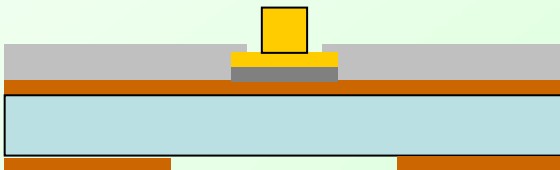
⑭TES面にレジストを塗布し、
吸収体パターン用マスクを当て露光



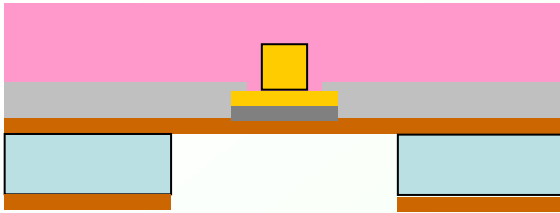
⑮現像



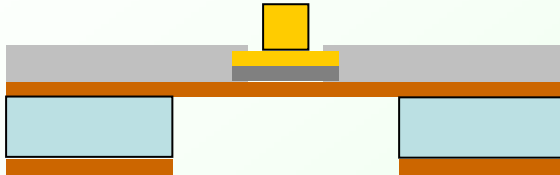
⑯AuをEB蒸着



⑰レジストを除去



⑮ TES面保護膜レジストを塗布し、
SiをKOHエッチング



⑯ レジストを除去して完成