

TES型X線マイクロカロリメータの製作 プロセスの構築



宇宙物理実験研究室

藤森 玉行



話の流れ

天体観測において必要とされるX線検出器

X線マイクロカロリメータの原理

開発の現状と研究目的

TES型X線マイクロカロリメータの製作

TES

アルミ配線

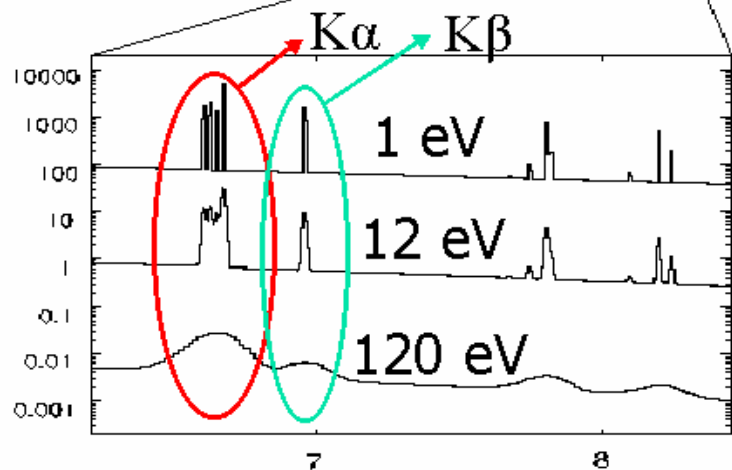
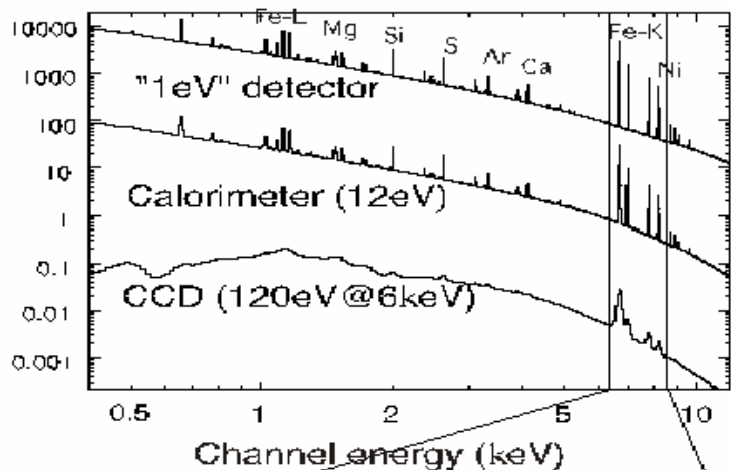
メンブレン構造

X線照射実験 性能評価

まとめと今後

天体観測で必要とされるX線検出器

5000万度のプラズマからのX線スペクトル



X線CCD検出器の場合
($\Delta E = 120 \text{ eV} @ 6 \text{ keV}$)

- 鉄のK α 線とK β 線
- × 共鳴線や禁制線などの微細構造

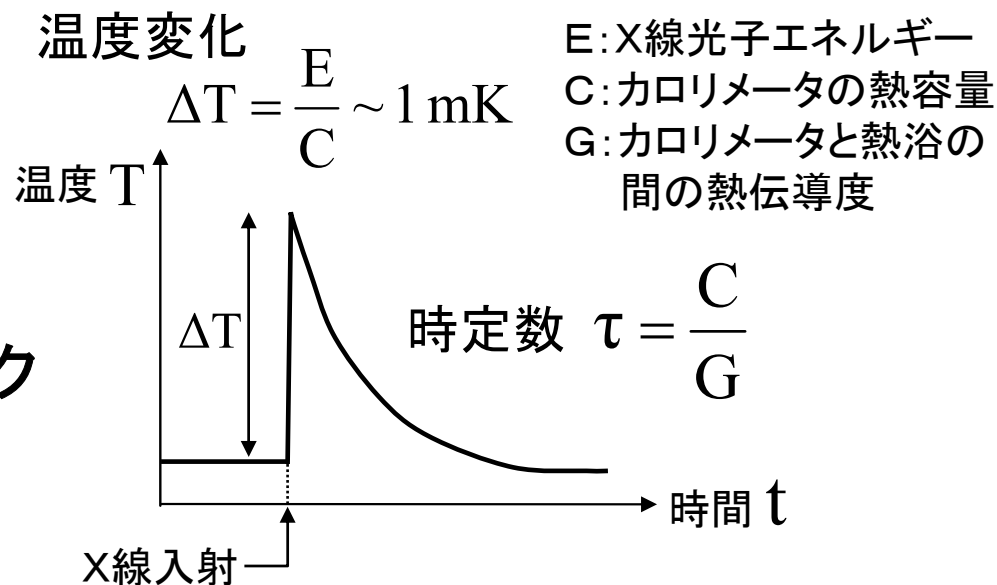
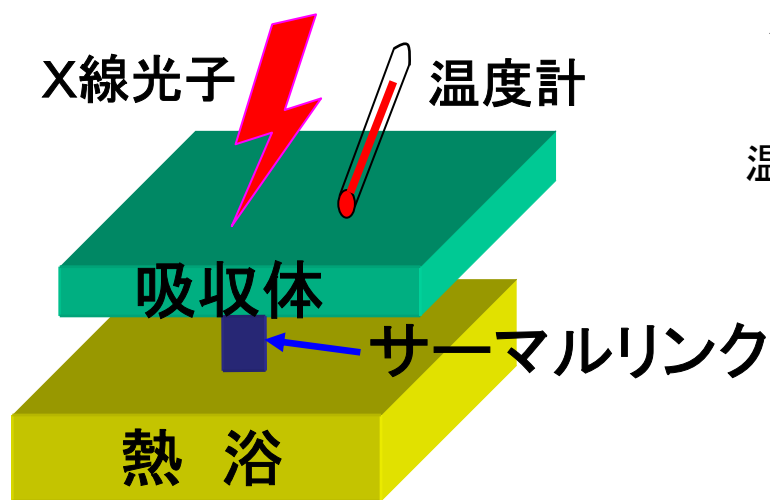
これらの微細構造を分離するには
 $\Delta E = 1 \sim 2 \text{ eV}$ が必要

天体観測の場合はさらに、撮像型で
X線の検出効率が高いものが望まれる

これらを満たすX線検出器としてX線
マイクロカロリメータが注目されている

X線マイクロカロリメータとは

X線光子エネルギーを素子の微小な温度上昇として測定する検出器

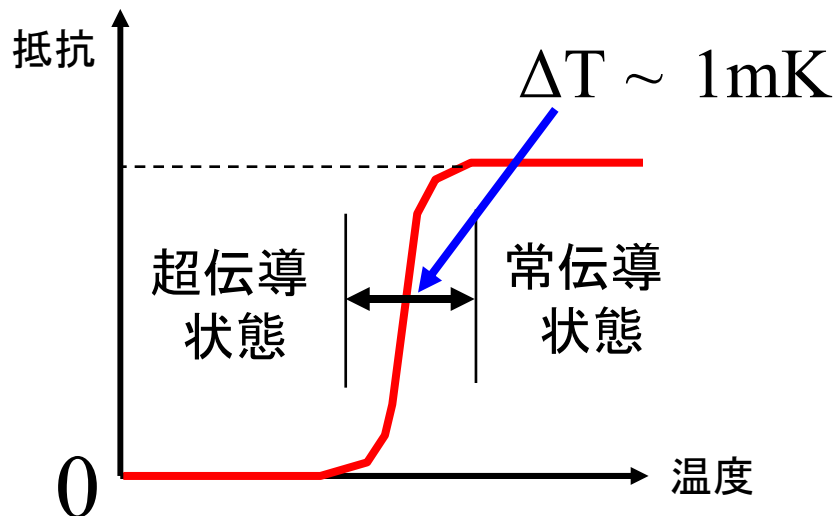


極低温($\sim 100 \text{ mK}$)で動作させることにより、高いエネルギー分解能
我々のグループでは **6 eV@5.9 KeV** を実現 (世界最高は2.4 eV)

TES温度計

(Transition-Edge-Sensor、超伝導遷移端温度計)

金属薄膜の超伝導と常伝導の間の急激な抵抗変化を温度計として利用⇒ $\alpha = \sim 1000$ の非常に高感度な温度計となる



α : 温度計の感度

$$\alpha \equiv \frac{d \ln R}{d \ln T}$$

TESカロリメータの
エネルギー分解能

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

常伝導金属の金と超伝導金属のチタンの二層薄膜を用い

近接効果を利用することにより転移温度をコントロール → $T \sim 100 \text{ mK}$

注) チタンバルクでは転移温度は390 mK



開発の現状

今までは・・・

SII(セイコーインスツル)、早稲田と役割分担してカロリメータを
製作・評価 → 6 eV@5.9 KeVを実現(目標は2 eV@5.9 KeV)

☆プロセスがバラバラだと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りすぎる！

これからは・・・

エネルギー分解能の改善のため、

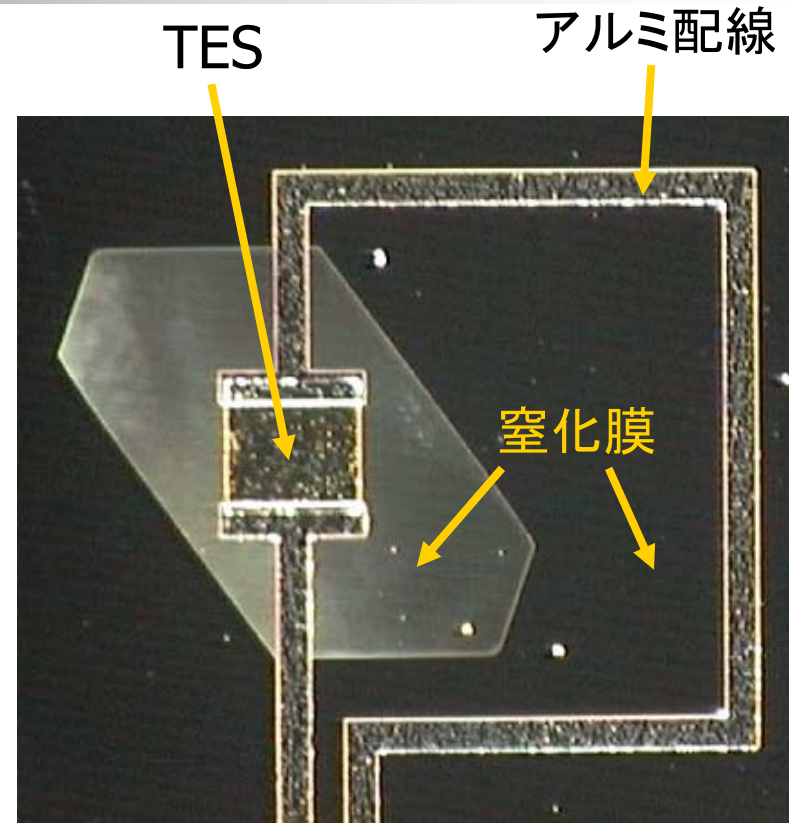
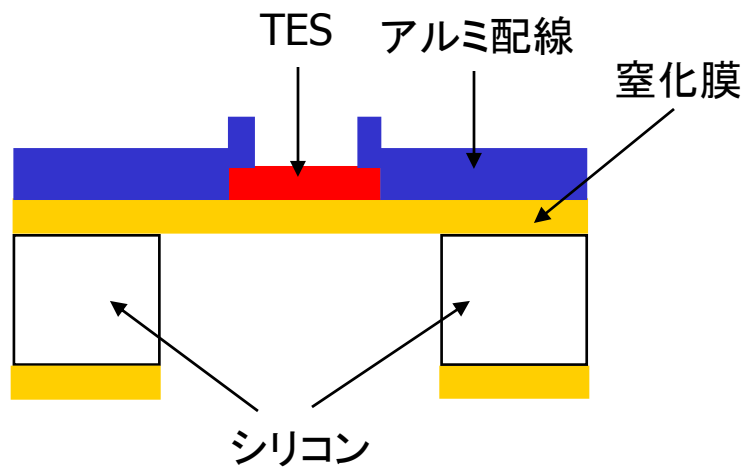
都立大スパッタ装置を用いたTES性能の向上
全ての製作プロセスをin-houseで行う！

} 本研究目的

TES型X線マイクロカロリメータ の製作

主要プロセス

- 1、TESの製作
- 2、アルミ配線の製作
- 3、メンブレン(薄膜)構造の製作



完成したTESカロリメータ

製作プロセスフロー その1

(110)シリコン基板



1、両面に窒化膜を付ける



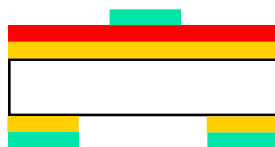
2、チタン・金(TES)をスパッタ



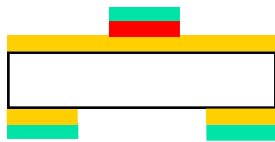
3、両面にフォトリジストを付ける



4、フォトリジストのパターニング



5、窒化膜のパターニング
(Reactive Ion Etching)

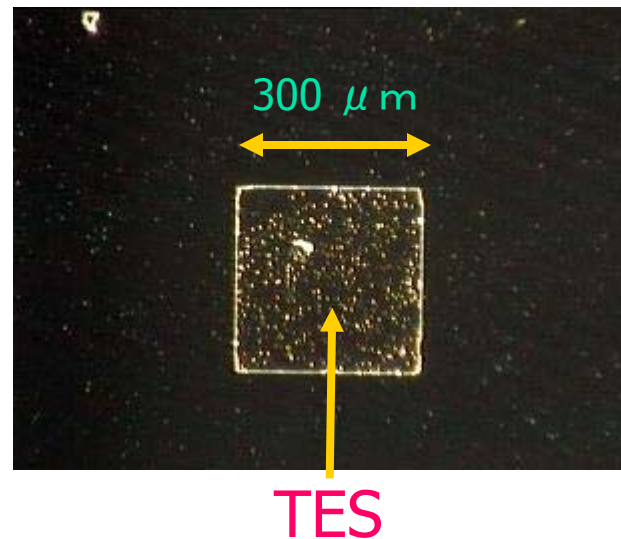


6、チタン・金のエッチング



7、フォトリジストの除去

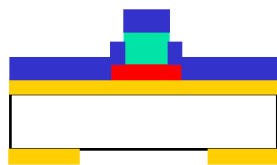
TES完成



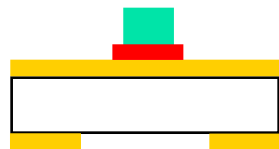
プロセスフロー その2



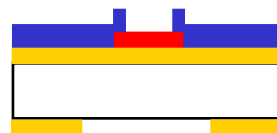
8、フォトリソを付ける



10、アルミをスパッタ



9、フォトリソのパターニング



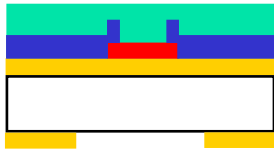
11、アルミのリフトオフ

アルミ配線完成

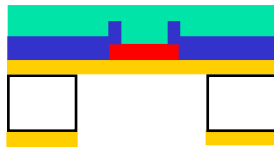


TES

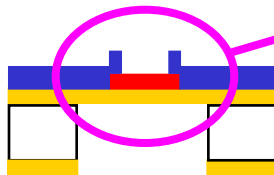
プロセスフロー その3



12、フォトリソを付ける

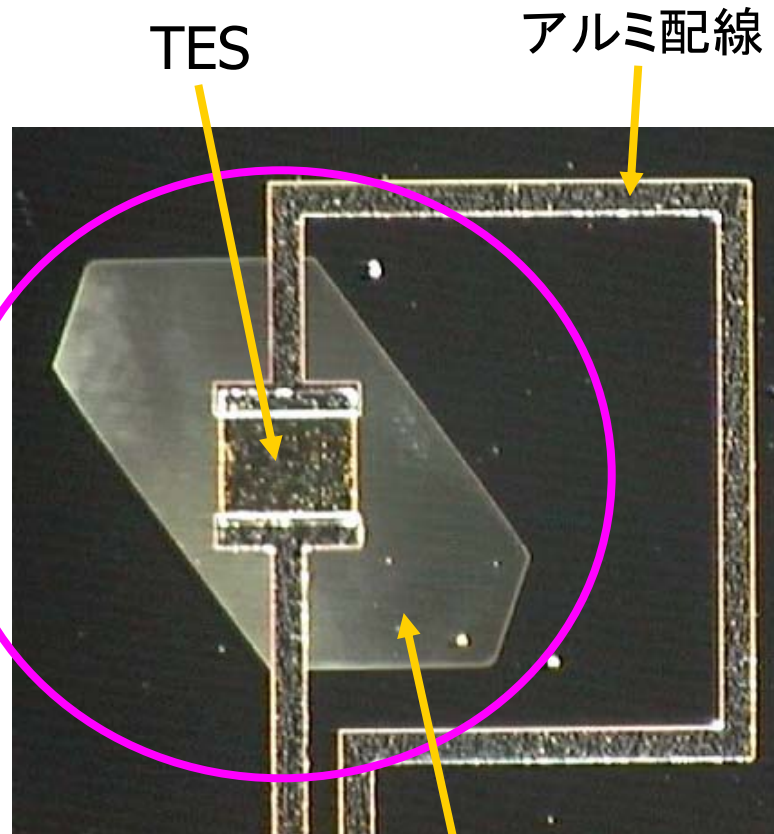


13、シリコンをエッチング



14、フォトリソの除去

完成



窒化膜

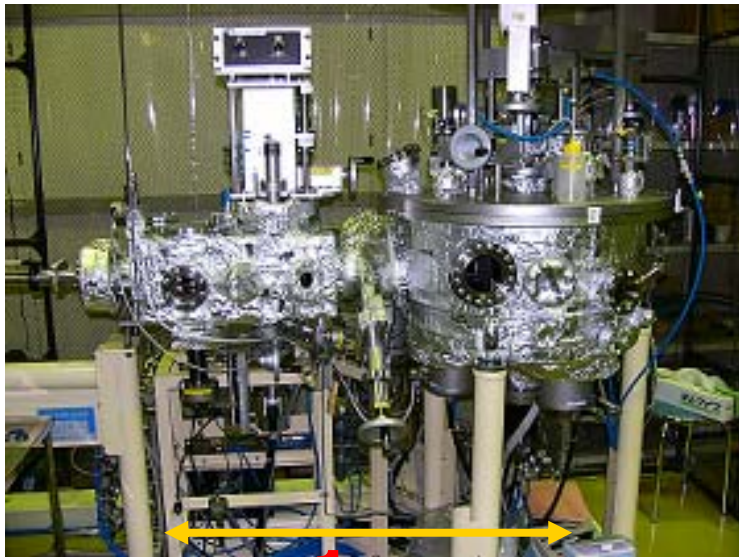
TESの製作 1

チタン・金の膜厚と転移温度の関係を調べる

都立大スパッタ装置

特徴: 高真空 $\sim 10^{-8}$ Pa

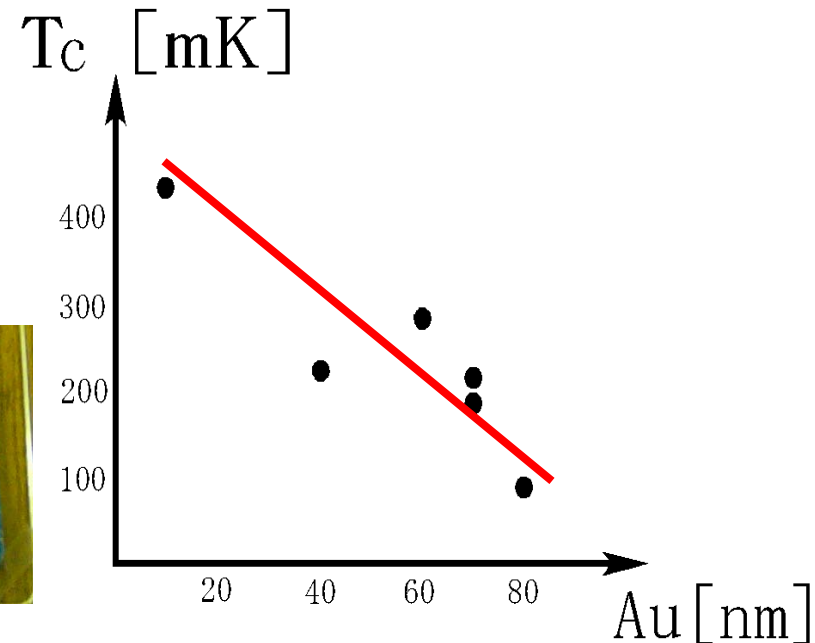
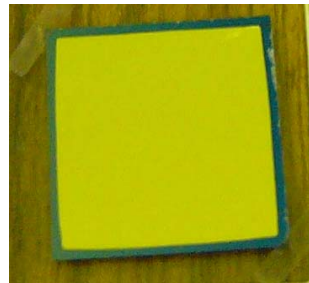
短時間でチタン・金のスパッタ切り替え



1 m

チタンの膜厚を40 nmに固定、金の膜厚を変えて転移温度を測定

2cm基板にTi,
Auをスパッタ



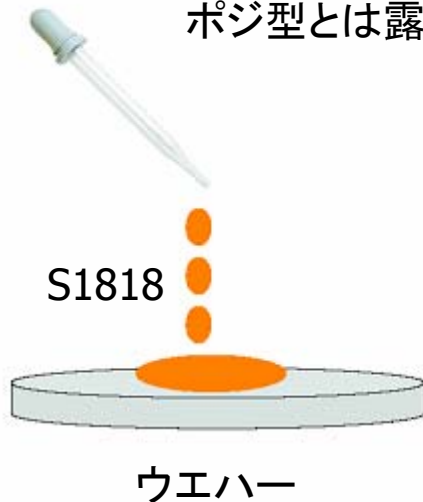
チタン=40 nm、金=80 nmで転移温度が ~ 150 mKになる

TESの製作 2

フォトリソグラフィ

1、フォトリソグ塗布(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リソグの膜厚を薄く一定にする(4000 rpm)

3、ベーク(フォトリソグの乾燥) 114°C、150s



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)

4、紫外線照射



5、現像

現像液=NMD-3



TESの製作 3

チタン 40 nm 金 80 nmのエッチング

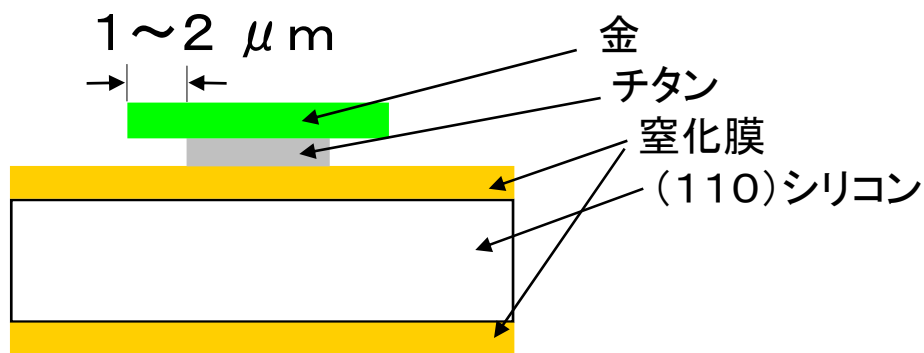
各エッチング溶液とエッチング時間

エッチングレート

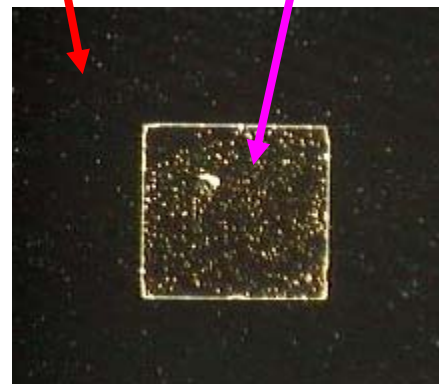
金	AURUM-101 (ヨウ素系)	5秒	550 nm/min
チタン	35%の過酸化水素水 @60°C	3時間	13 nm/min

チタンは温度計の感度を上げるためにオーバーエッチングを行う

オーバーエッチング



窒化膜 エッチングしたTES (300 μm角)

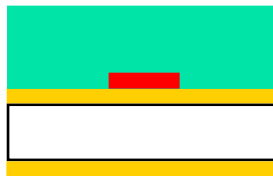


アルミ配線の製作フロー

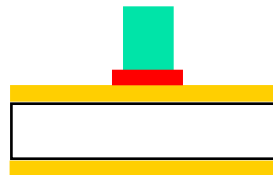
レジストパターンニング (TESと同じプロセス)

アルミスパッタ@宇宙研

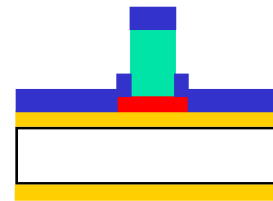
アルミのリフトオフ@宇宙研



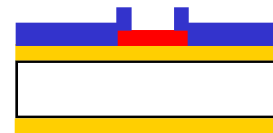
1、フォトリジスト塗布



2、フォトリジストをパターンニング



3、アルミをスパッタ

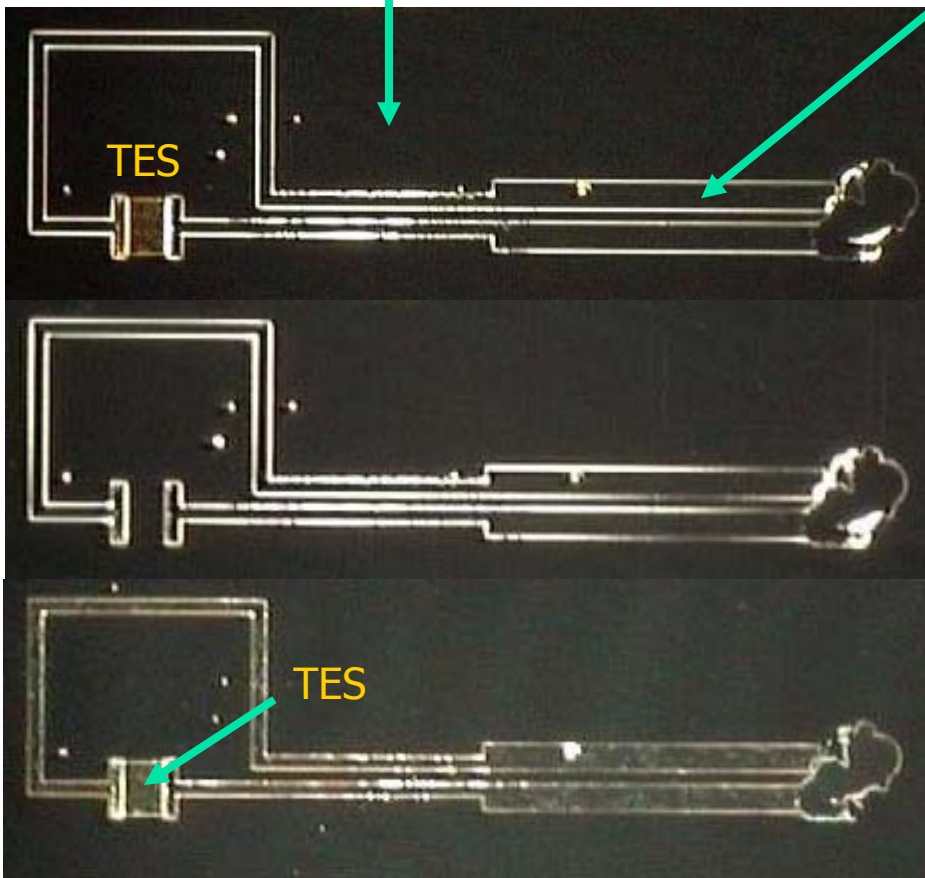


4、アルミをリフトオフ

アルミ配線の製作

レジストが付いている部分

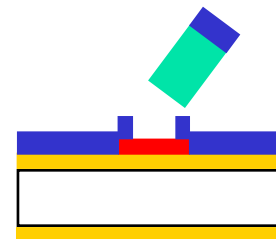
配線部分にはレジストは付いていない



フォトレジスト (S1818) をアルミ配線用にパターニング (レジスト膜厚 $2 \mu\text{m}$)

アルミを200 nmスパッタ

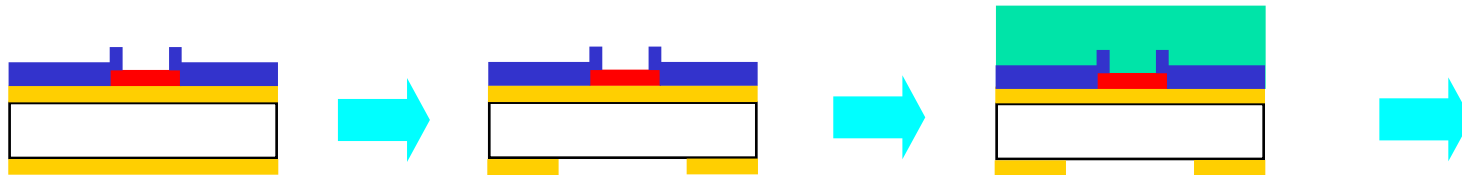
アセトンに一日漬けアルミをリフトオフ



フォトレジストごと配線以外のアルミを取り除く

メンブレン構造の製作フロー

窒化膜のパターニング@産総研
シリコンのエッチング@宇宙研



1、窒化膜のパターニング 2、TES、アルミ配線側にフォトリジストを塗る



3、シリコンのエッチング
4、フォトリジスト除去

完成

メンブレン構造の製作 1

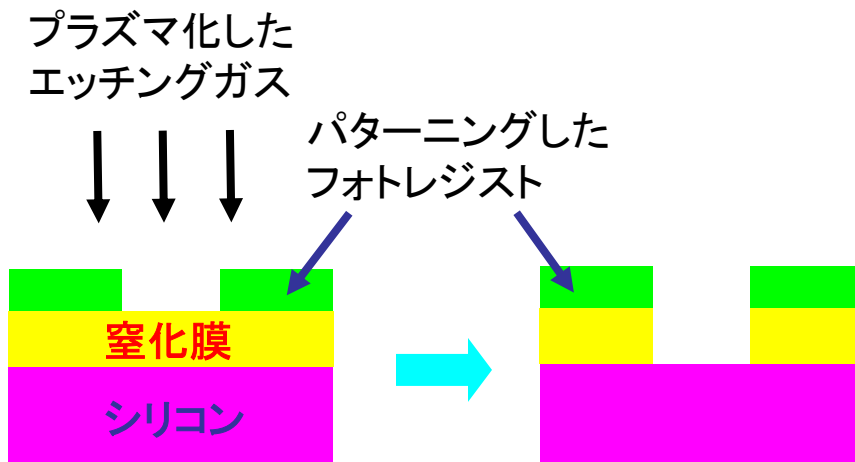
窒化膜のパターニング

フォトレジストを塗布

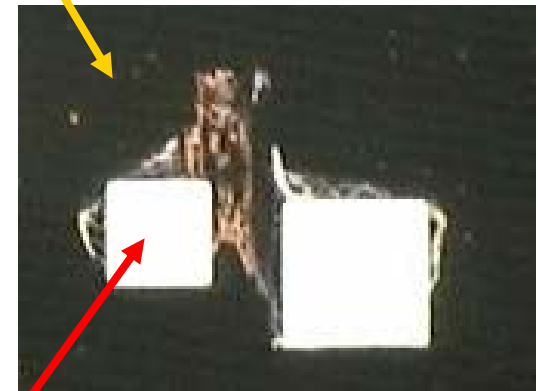
露光・現像

Reactive Ion Etchingで窒化膜をパターニング

フォトレジスト除去



窒化膜が残っている部分



シリコン

メンブレン構造の製作 2

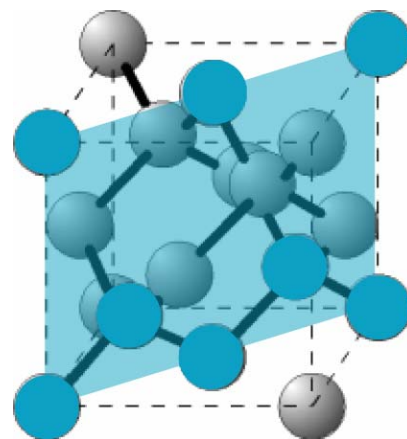
異方性エッチング

- 半導体のマイクロマシン技術を応用

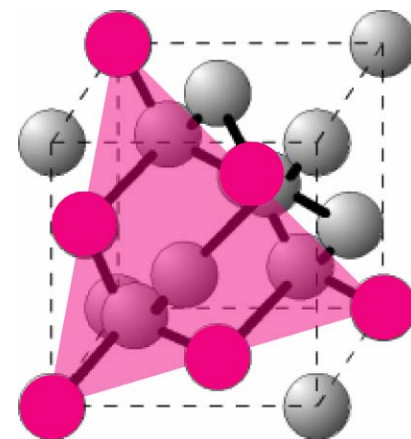
- シリコンをアルカリ(KOH)でエッチングするとエッチング速度が結晶面方位に強く依存

結晶異方性エッチング

(111)面のエッチング速度が(100)、(110)面に比べ100倍遅い



(110)面



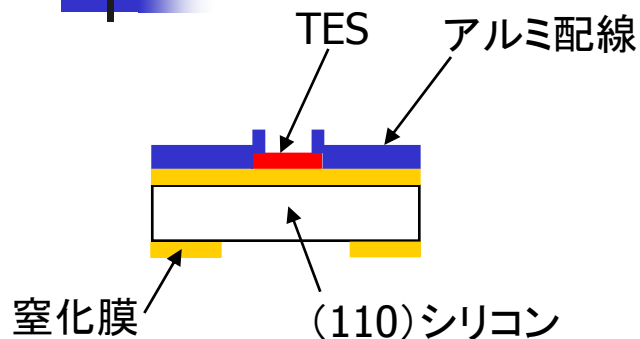
(111)面

→きれいな(111)面をだすことが可能



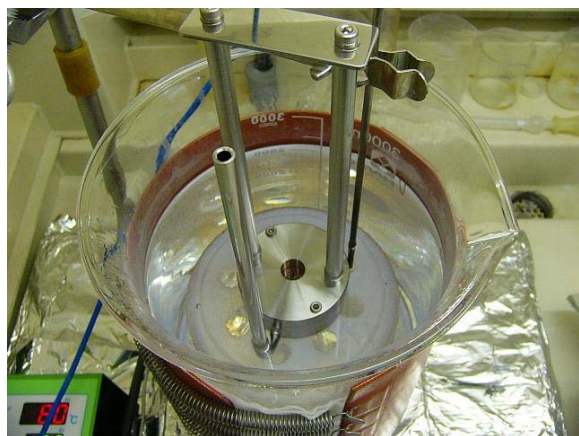
メンブレン構造の製作 3

シリコンのKOHエッチング

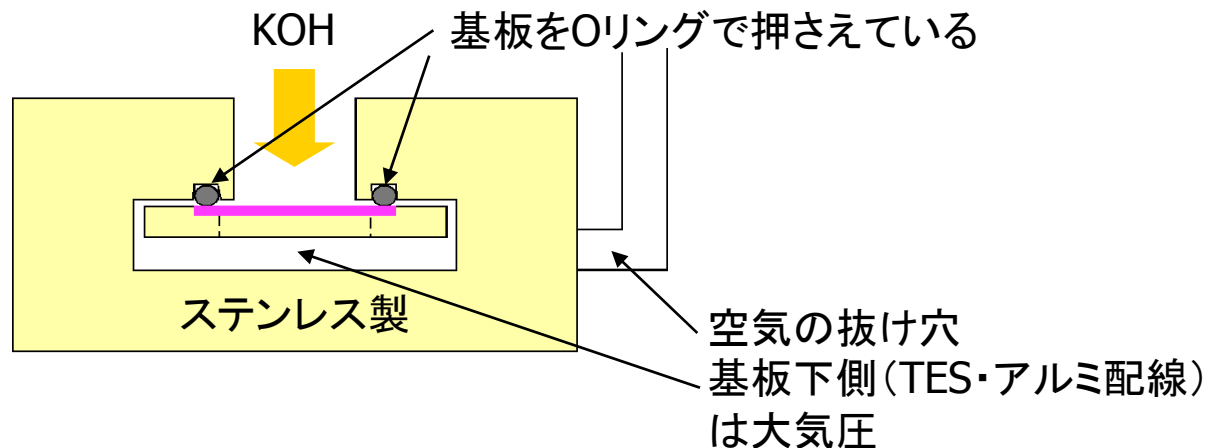


このままではKOHでエッチングできない！
フォトリソもKOHに耐性がない！
→KOHでTESやアルミ配線が溶けてしまう

TESとアルミ配線側をKOHから保護して
エッチングを行う必要がある。



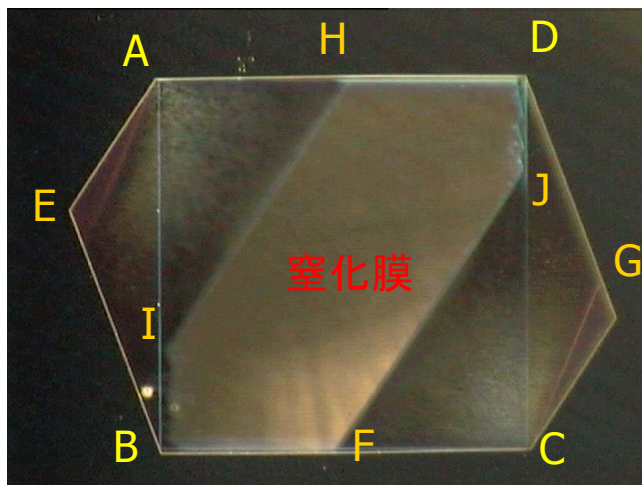
33%KOH@80°Cで6時間



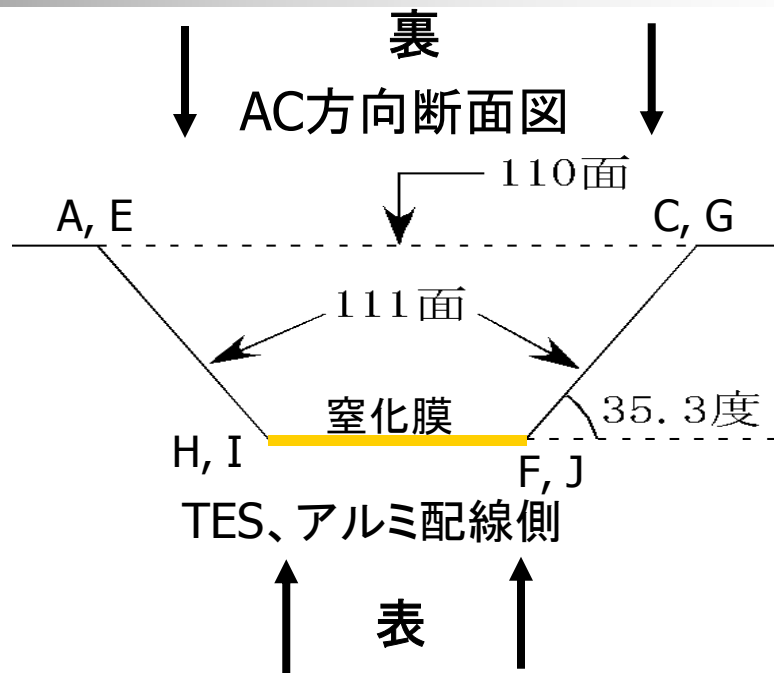
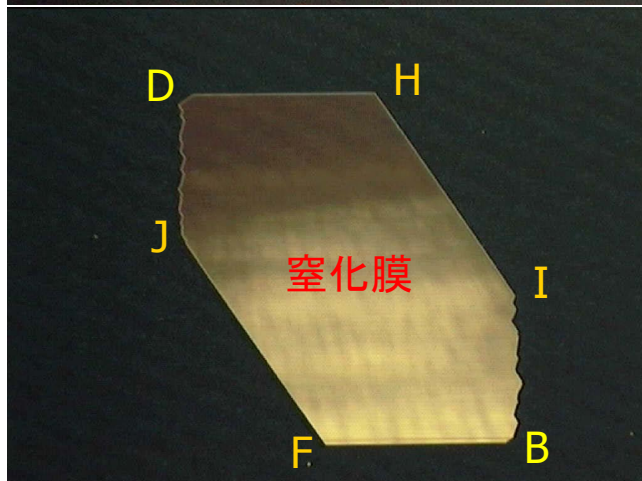
メンブレン構造の製作 4

(110)シリコンのKOHエッチング後の写真

裏

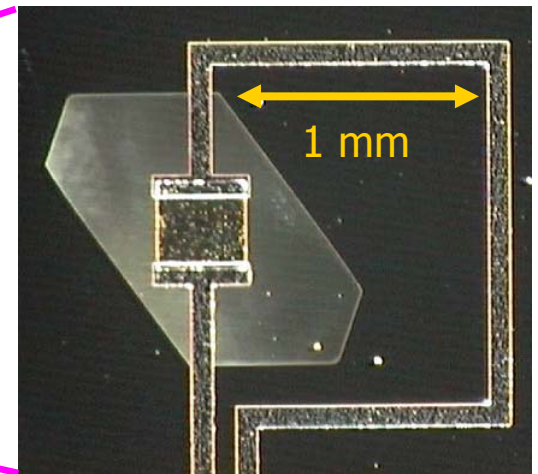
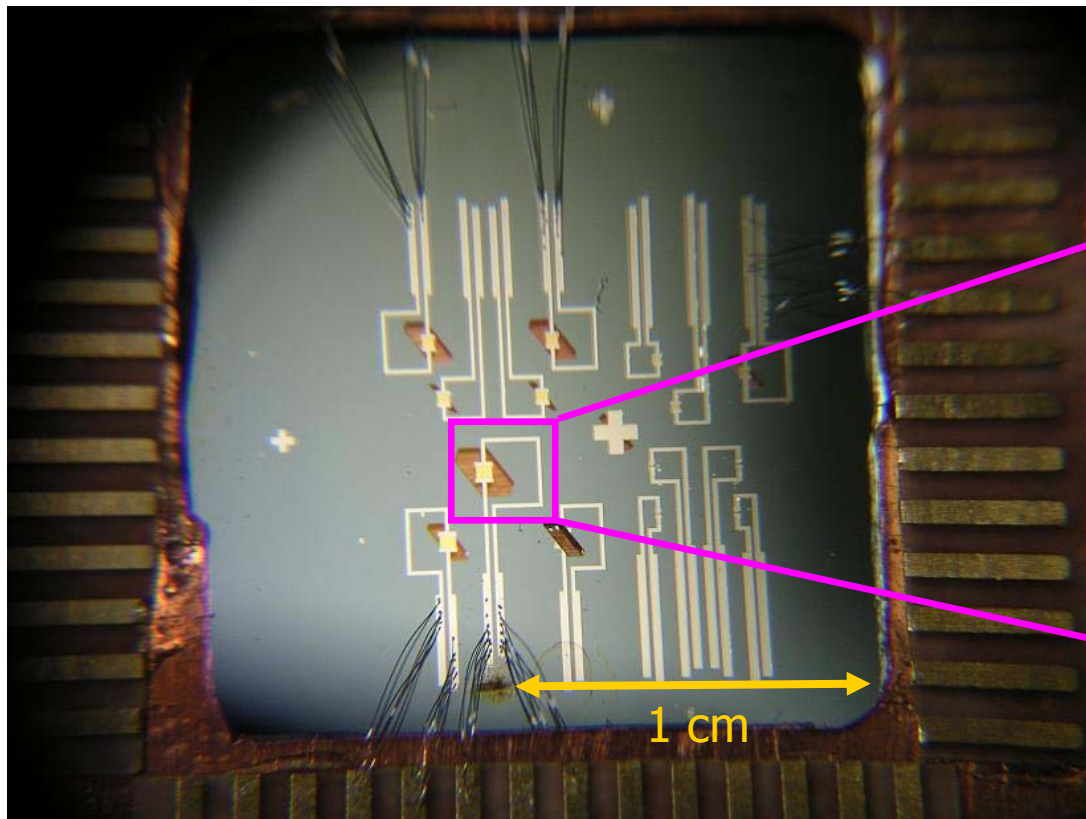


表



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

完成したTES型X線マイクロカロリメータ



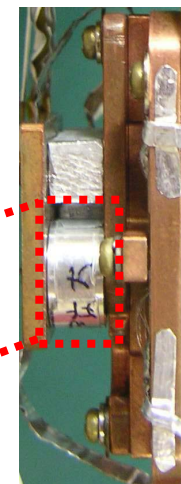
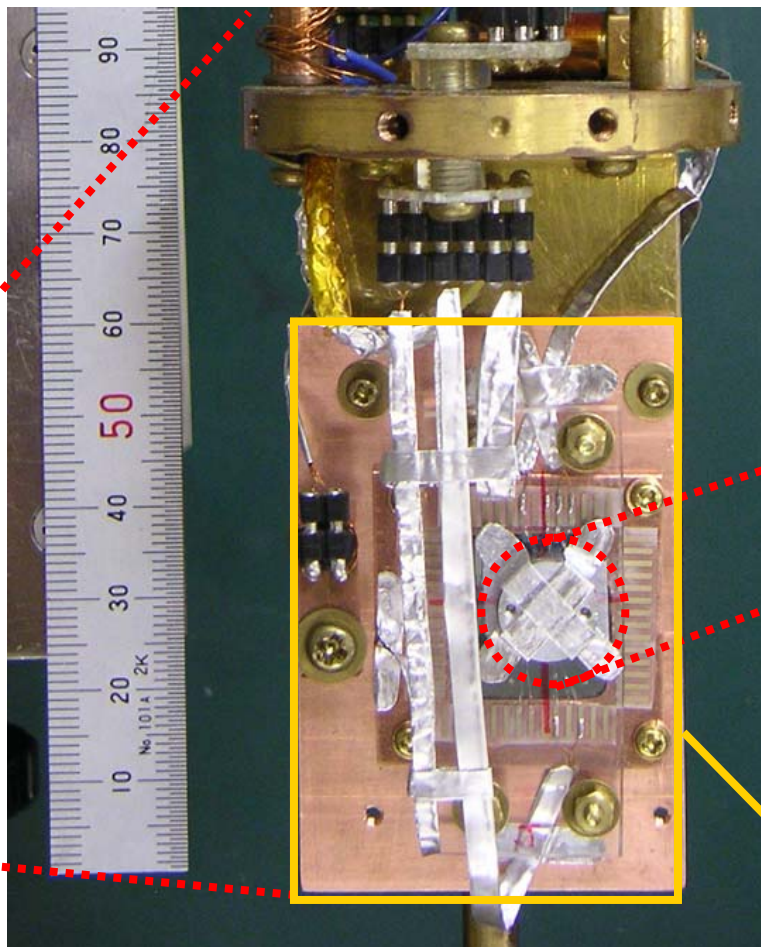
400 μ m角のTES

→X線照射実験

X線照射実験セットアップ

完成したTESカロリメータに ^{55}Fe 線源
を使ってX線を当て性能評価を行った

^3He - ^4He 希釈冷凍機



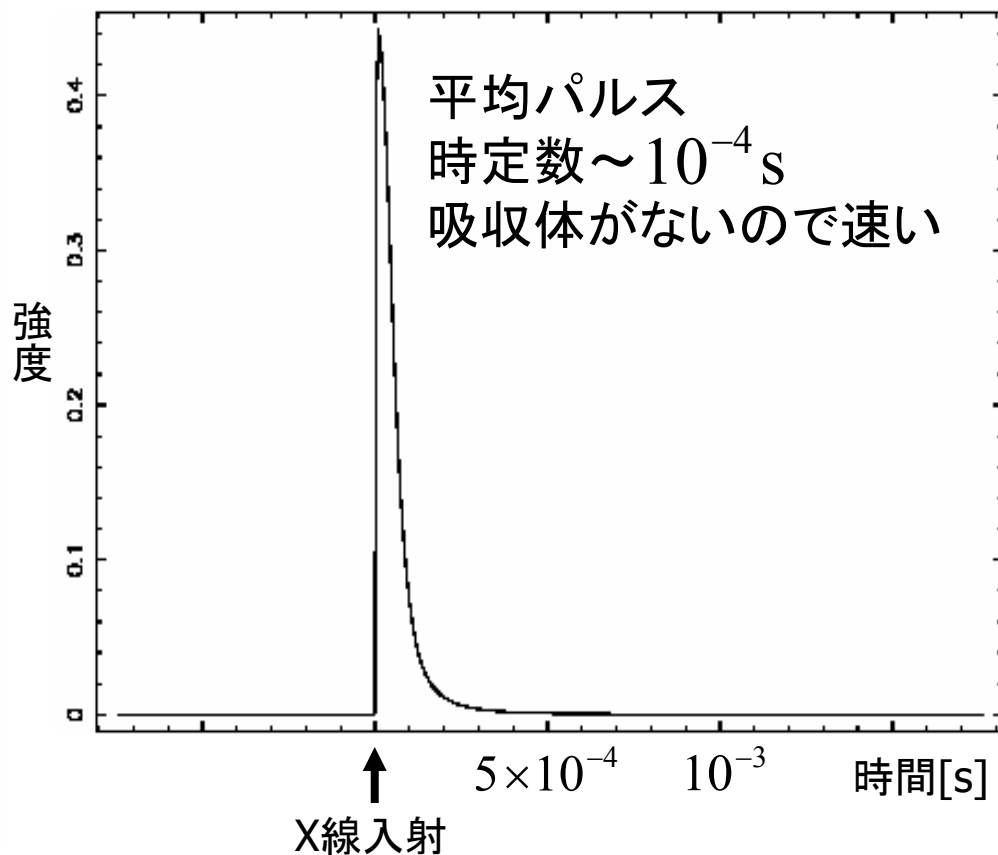
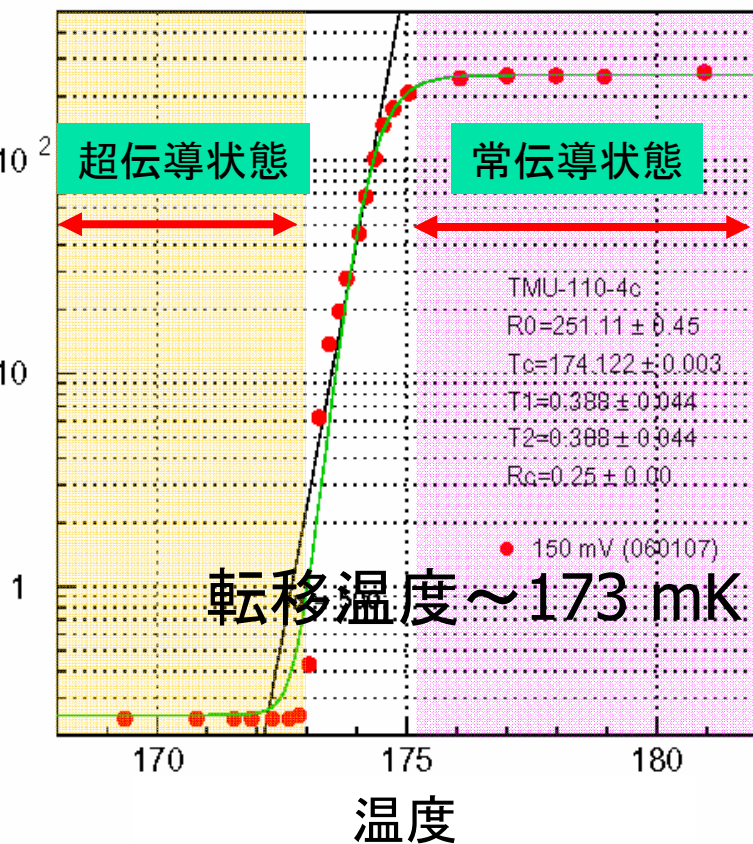
^{55}Fe
X線源

温度は ~ 100 mK
まで下がる

X線の検出に成功

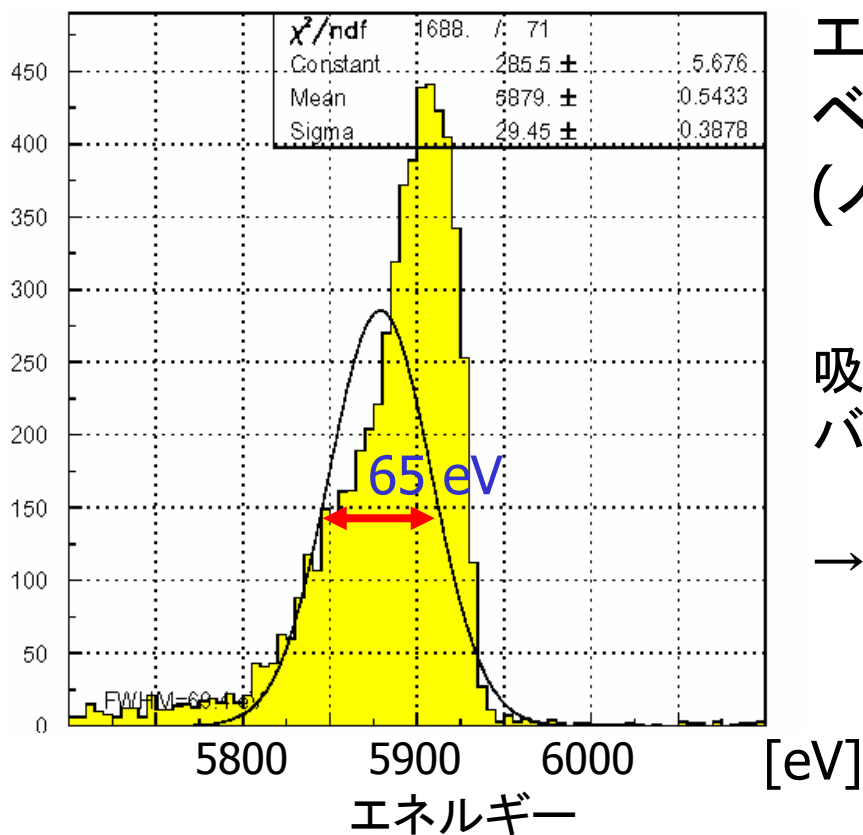
転移がシャープになり
TESの性能が改善した

抵抗
(対数表示)



エネルギー分解能

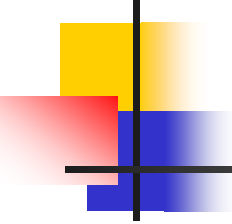
カウント数



エネルギー分解能 65 eV@5.9 KeV
ベースライン揺らぎ 7 eV
(ノイズ等価幅)

吸収体が付いていないので、パルスの
バラつきが大きく、量子効率も7%と小さい

→吸収体を付けるのが次の課題



まとめと今後

- 1、TESの転移温度の制御からレジストの条件出し、アルミスパッタ、KOHエッチングまで全てin-houseで行いTES型X線マイクロカロリメータの製作に成功。
- 2、X線照射実験を行い性能評価を行い、X線の検出に成功。
エネルギー分解能は65 eV、ベースラインは7 eV
- 3、吸収体がないため、X線の入射位置依存性によりパルスがバラつき、ベースラインに対してエネルギー分解能が悪化したと考えられる。
しかし、転移温度を下げ、吸収体をつければ有望な検出器となる。
- 4、今後は吸収体まで付けたTESカロリメータの製作プロセスを確立しエネルギー分解能の追及と多素子化に向けて取り組む予定。



カロリメータのノイズ

- ジョンソンノイズ
- フォノンノイズ
- エクセスノイズ

ノイズ揺らぎ 7 eV

除去不可能なノイズ

ジョンソンノイズ：電子の流れが熱によって乱され不均一になることによって発生し、抵抗を持った電子回路では必ず発生するノイズ

フォノンノイズ：装置全体の熱揺らぎ(フォノン数揺らぎ)

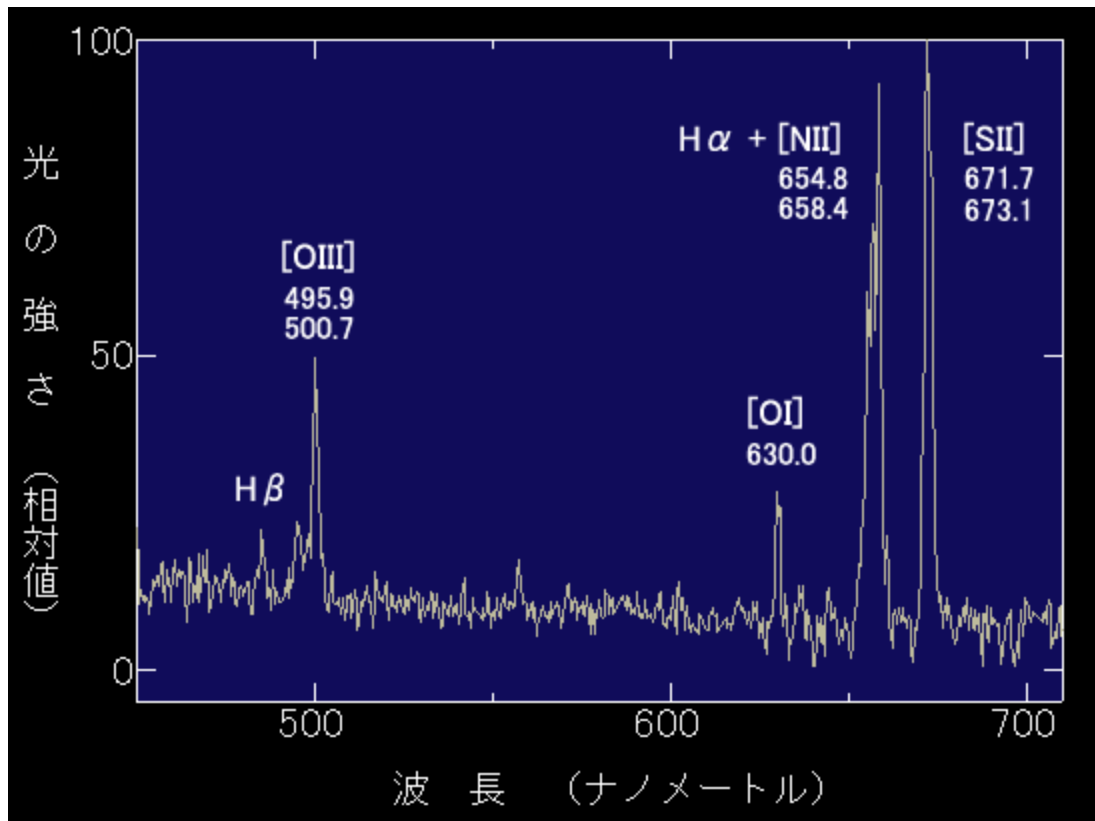
エクセスノイズ：正体不明ノイズ



X線スペクトル

共鳴線：原子がある波長の光を吸収して基底状態から励起状態に遷移すると、再び同じ波長の光を放出して基底状態に戻ることができる。放出光を他の原子が吸収して同じことを繰り返せるので、この放出現象を共鳴放射といい、そのスペクトル線を共鳴線と呼ぶ。

禁制線：原子、分子、原子核のエネルギー準位間で、ある近似のもとではおこらないはずなのに特殊な条件のもとでは遷移を起こしスペクトル線として観測される。



小型低分散分光器で観測したかに星雲M1から得たスペクトル

波長495.9nmや500.7nmに見られる強い輝線は、OIIIの禁制線です。

星からの紫外線で2階電離した酸素イオンの基底準位にある電子が、星雲の中の自由電子と衝突して準安定状態と呼ばれる準位へと励起されます。この準位からもとの準位へ光を放射して戻る確率は極めて低く、地上の実験室などでは衝突によって戻ってしまいます。ところが、星雲の中は密度が極端に低いので、衝突の頻度が低く、光を放射することになります。これが禁制線です。このような禁制線が見えるということは、ガスの密度が非常に低いことを意味しています。