

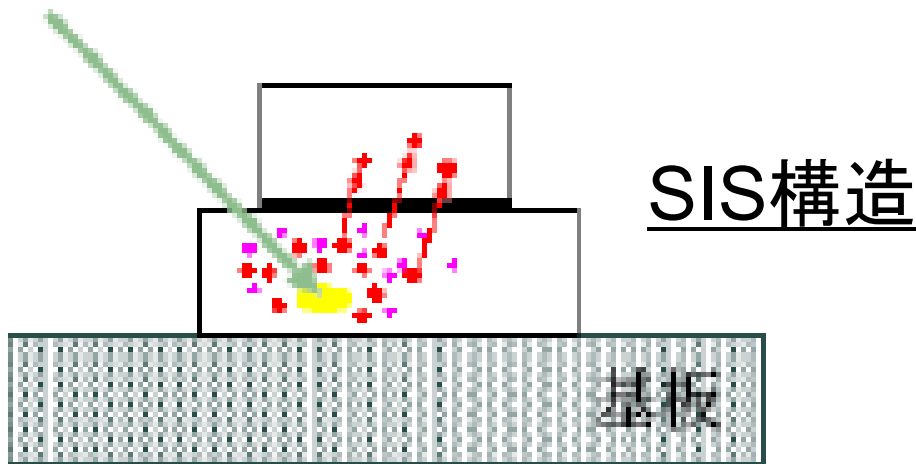
STJプロジェクト

羽澄昌史 (KEK)

STJ Overview

- Superconducting Tunneling Junction Detector (超伝導接合検出器)
- meVの光子に対するphotoconductor
- 他の超伝導検出器よりノイズが小さく、高速、ダイナミックレンジが大きい: **最高の次世代検出器**

meV光子



クーパー対が壊れ、
電子に戻る。

量子物性理論的には
「準粒子が生まれる」

宇宙と素粒子の新しい研究を拓く

観測対象

マイクロ波背景放射(CMB)
とインフレーション宇宙

手段

meVレベルの光子の
超高感度測定が必要

ニュートリノ背景放射
とニュートリノ崩壊

Beyond Einstein

human curiosity

超伝導体の選別

応用1

宇宙マイクロ波
背景放射
(30-300GHz)
AlとNbの厚み
の比を変えて
帯域を
コントロール

| 超伝導体 | 臨界温度 (T_C) [K] | ギャップエネルギー (2Δ) [meV] | フォトン検出閾値 [GHz] | ビデオ検出帯域 [GHz] |
|------|-----------------------|----------------------------------|-------------------|------------------|
| Nb | 9.23 | 3.1 | 750 | 375-750 |
| Pb | 7.193 | 2.4 | 580 | 290-580 |
| Ta | 4.39 | 1.4 | 340 | 170-340 |
| In | 3.4035 | 1.1 | 270 | 135-270 |
| Al | 1.196 | 0.34 | 80 | 40-80 |
| Ga | 1.091 | 0.31 | 75 | 37-75 |
| Mo | 0.92 | 0.26 | 60 | 30-60 |
| Zn | 0.852 | 0.22 | 50 | 25-50 |
| Cd | 0.56 | 0.15 | 36 | 18-36 |
| Ti | 0.39 | 0.10 | 24 | 12-24 |
| Hf | 0.165 | 0.04 | 10 | 5-10 |

応用2

宇宙ニュートリノ背景放射のニュートリノ崩壊
遠赤外線エネルギー測定

STJグループの目標

- AI STJアレイ(1000ch)の開発
- Hf STJの開発

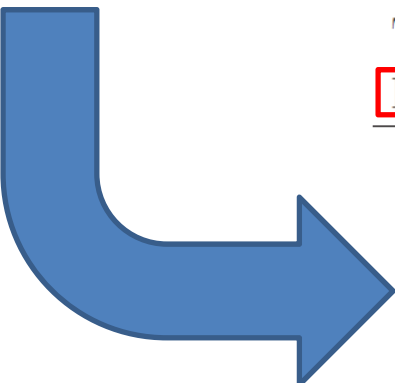
成功すればどちらも世界初

- 宇宙観測への応用にとどまらず、幅広い応用を考えていく
(測定器開発室のraison d'être)
- 低温検出器設備(クリーンルーム等)を大学共同利用に供する

低温装置への要求

ノイズを十分
小さくするため
に、臨界温度
の1/10で
使用する

| 超伝導体 | 臨界温度 (T_C) [K] | ギャップエネルギー (2Δ) [meV] | フォトン検出閾値 [GHz] | ビデオ検出帯域 [GHz] |
|------|-----------------------|----------------------------------|-------------------|------------------|
| Nb | 9.23 | 3.1 | 750 | 375-750 |
| Pb | 7.193 | 2.4 | 580 | 290-580 |
| Ta | 4.39 | 1.4 | 340 | 170-340 |
| In | 3.4035 | 1.1 | 270 | 135-270 |
| Al | 1.196 | 0.34 | 80 | 40-80 |
| Ga | 1.091 | 0.31 | 75 | 37-75 |
| Mo | 0.92 | 0.26 | 60 | 30-60 |
| Zn | 0.852 | 0.22 | 50 | 25-50 |
| Cd | 0.56 | 0.15 | 36 | 18-36 |
| Ti | 0.39 | 0.10 | 24 | 12-24 |
| Hf | 0.165 | 0.04 | 10 | 5-10 |



Al: 120mK
Hf: 16mK

ADRか希釈冷凍機

希釈冷凍機

STJグループメンバー

青: AI STJ (ミリ波カメラ)

赤: Hf STJ (赤外スペクトロスコープ)

黒: 両方

* ミリ波カメラ代表

** 赤外スペクトロスコープ代表

岡山大学

近畿大学

KEK加速器研究施設

KEK素粒子原子核研究所

KEK超伝導低温工学センター

KEK物質構造科学研究所

JAXA宇宙科学研究本部

ソウル国立大学

筑波大学

東北大学

理化学研究所

: 石野宏和、樹林敦子、美馬寛

: 大田泉

: 吉田光宏

: 石本茂、後田裕、佐藤伸明、住澤一高、田島治、
羽澄昌史*、長谷川雅也、樋口岳雄、山内正則

: 鈴木敏一、都丸隆之

: 清水裕彦、森嶋隆裕

: 池田博一

: Soo-Bong Kim

: 金信弘**、武内勇司、武政健一

: 服部誠

: 有吉誠一郎、大谷知行、佐藤広海

CMBサイエンスプロジェクトとの関係

KEK CMB group (QUIET+PolarBeaR)

- Formed in Dec. 2007
- Members:
 - Masashi Hazumi
 - Masaya Hasegawa
 - Takeo Higuchi
 - Osamu Tajima
 - Takayuki Tomaru
 - Yuji Chinone (D1)

Future CMB satellite WG (LiteBIRD)

Formed in Sep. 2008
JAXA, KEK, NAOJ,
Berkeley, Caltech, Tohoku,
Okayama, RIKEN, Kinki

測定器開発室STJグループ
KEK, RIKEN, Okayama, Tohoku

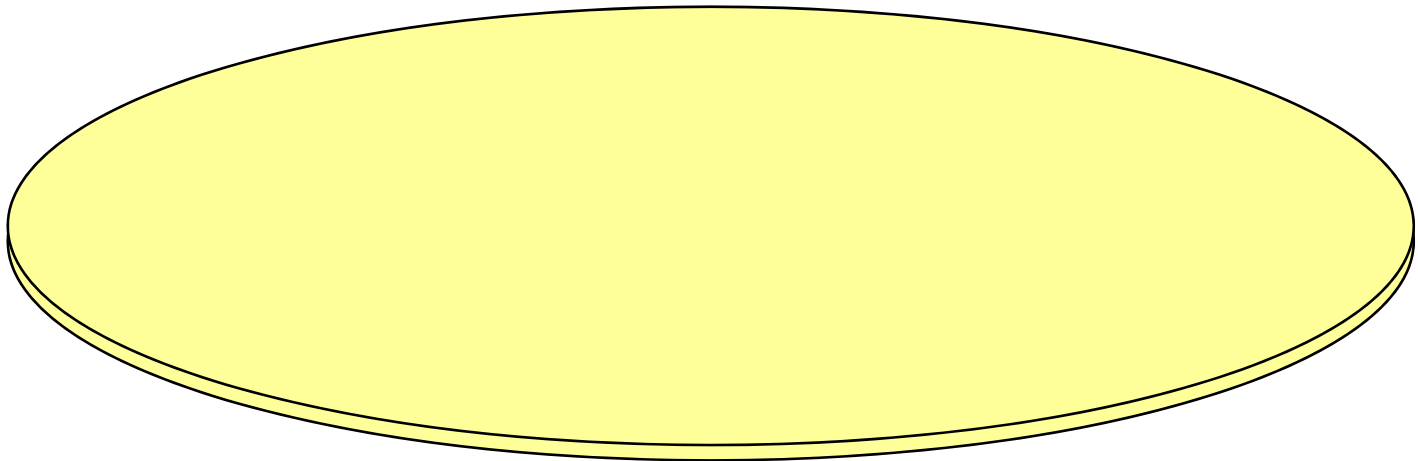
STJグループ活動概要

- Hf STJは2007年2月、Al STJは2007年5月に開始
- 測定器をゼロから手作り！
設計、STJ製作、アセンブリ、試験を全て自らの手で行う
 - 理研クリーンルームを用いて製作
 - 装置の一部を理研からKEKへ移設
→今年度の終わりにはKEKでも製作開始
- KEKでの性能試験システムの導入

典型的な製作工程 (X線用アルミSTJの例)

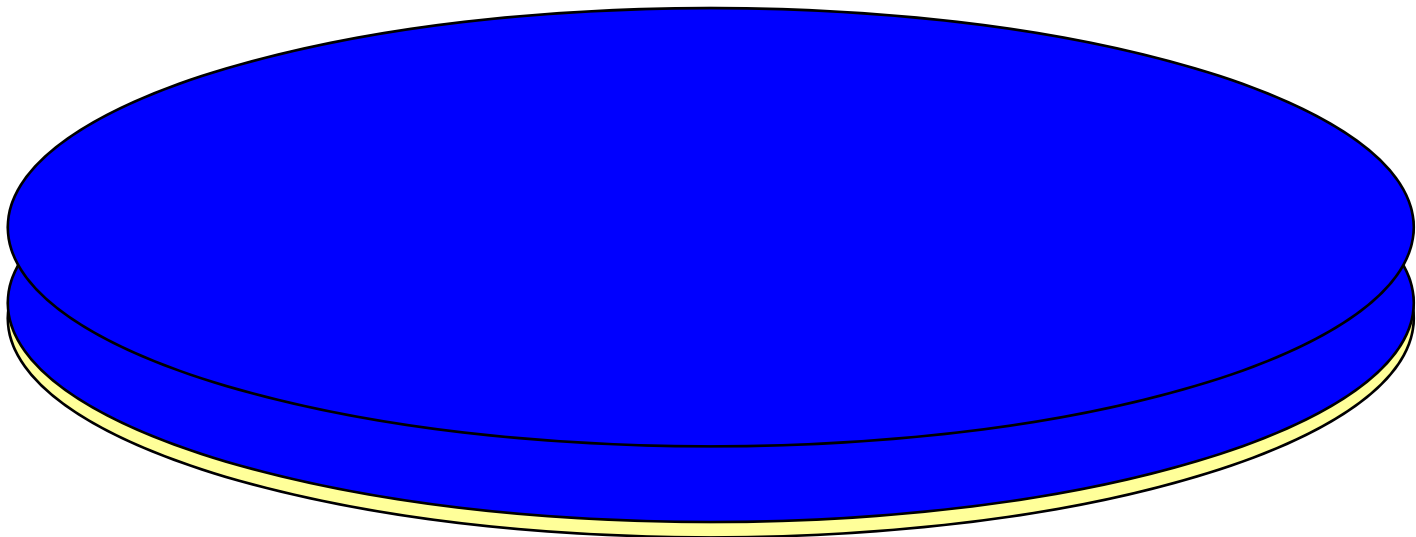


サファイア基盤



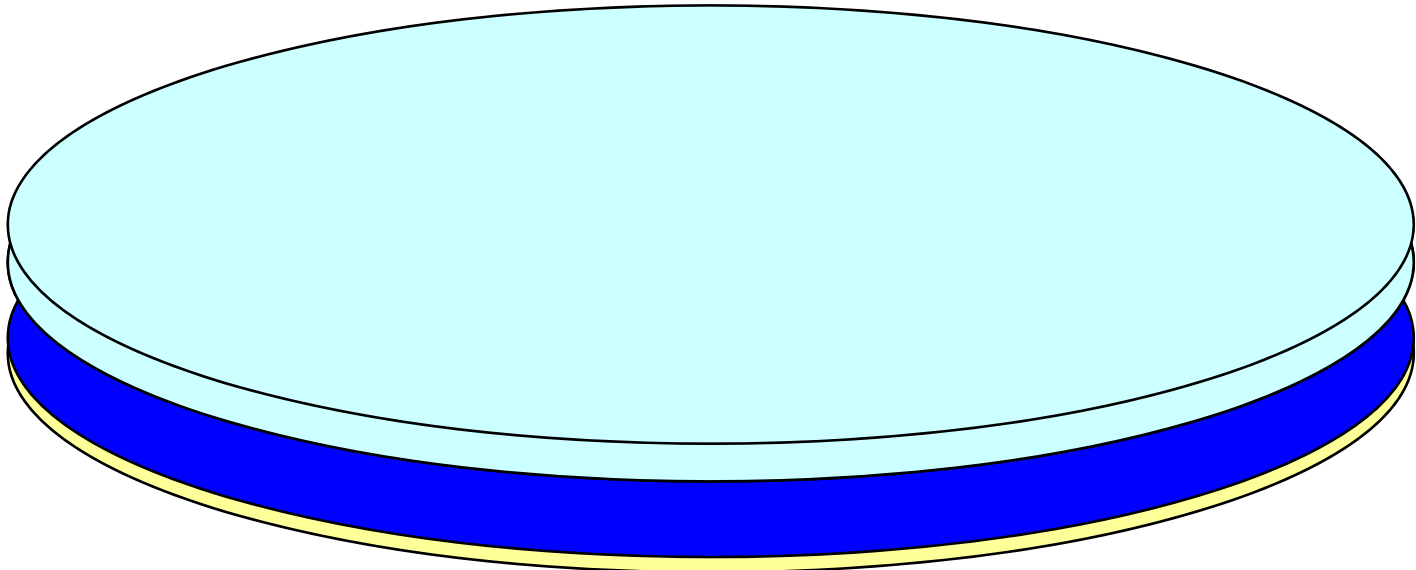
Buffer Layer(Al_2O_3) sputtering

| | Layer | | material | Condition | Rate | Thickness | time | |
|---|--------|---------|-------------------------|------------------------|-----------|-----------|-------|--|
| 1 | Buffer | Sputter | Al_2O_3 | Ar 50sccm: 1.3Pa, 400W | 215 Å/min | 1,000 Å | 4'40" | |



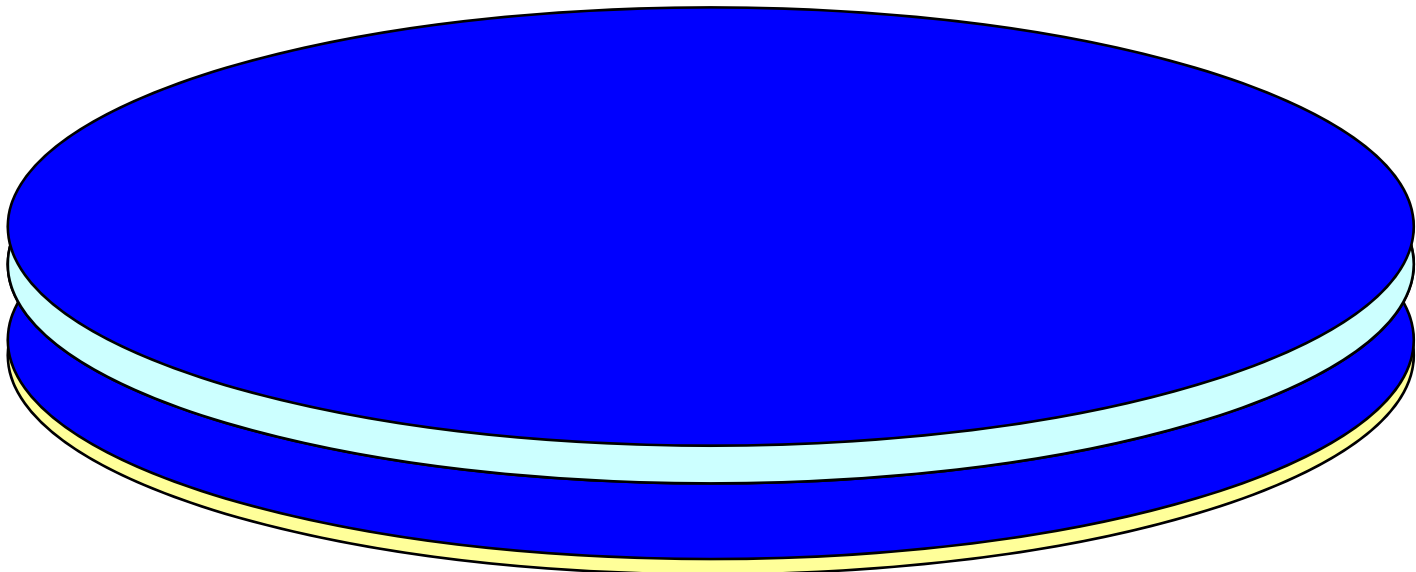
Tri-Base Al sputtering

| | Layer | | material | Condition | Rate | Thickness | time | |
|---|-------|-----------|----------|------------------------|------------|-----------|------------|-------------|
| 2 | Tri | Sputter | Al | Ar 50sccm: 1.1Pa, 250W | 922 A/min | 500 Å | 33" | |
| | | Oxidation | AlOx | O2 100 sccm: 30Torr | 2~3nm/30TH | 20~30 Å | 60' (30TH) | Torr x Hour |
| | | Sputter | Al | Ar 50sccm: 1.1Pa, 250W | 922 A/min | 500 Å | 33" | |



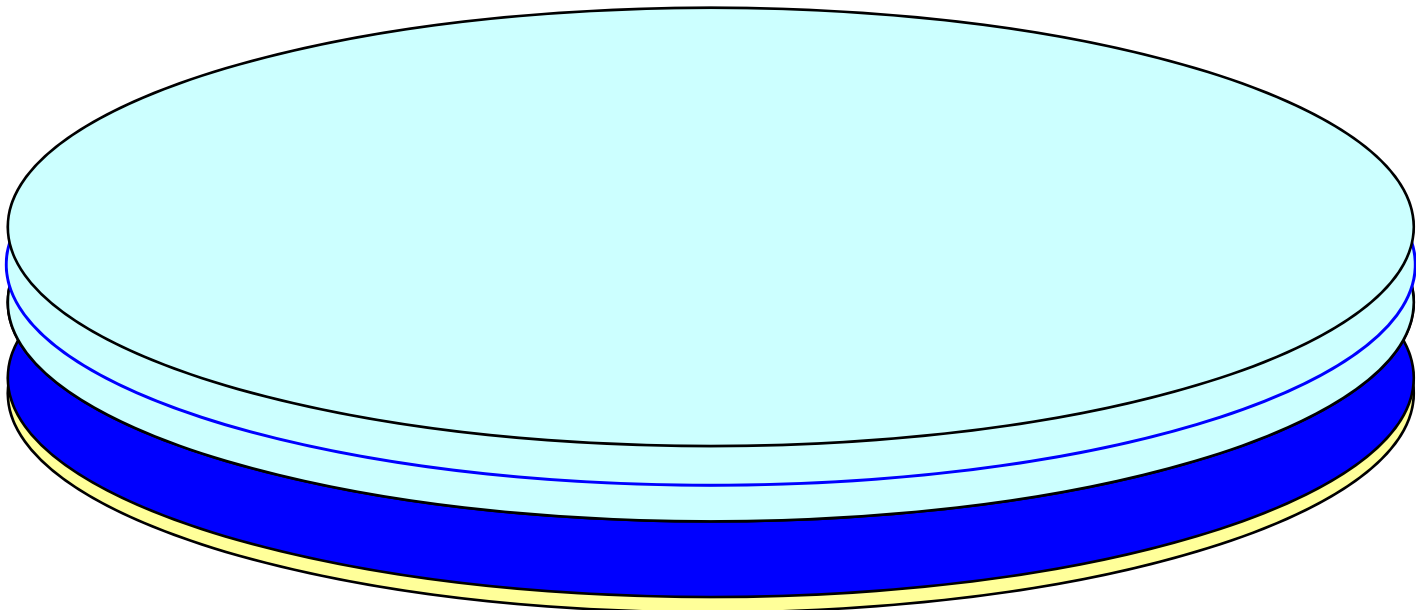
Tri-Middle AlOx

| | Layer | | material | Condition | Rate | Thickness | time | |
|---|-------|-----------|----------|------------------------|------------|-----------|------------|-------------|
| 2 | Tri | Sputter | Al | Ar 50sccm: 1.1Pa, 250W | 922 A/min | 500 Å | 33" | |
| | | Oxidation | AlOx | O2 100 sccm: 30Torr | 2~3nm/30TH | 20~30 Å | 60' (30TH) | Torr x Hour |
| | | Sputter | Al | Ar 50sccm: 1.1Pa, 250W | 922 A/min | 500 Å | 33" | |



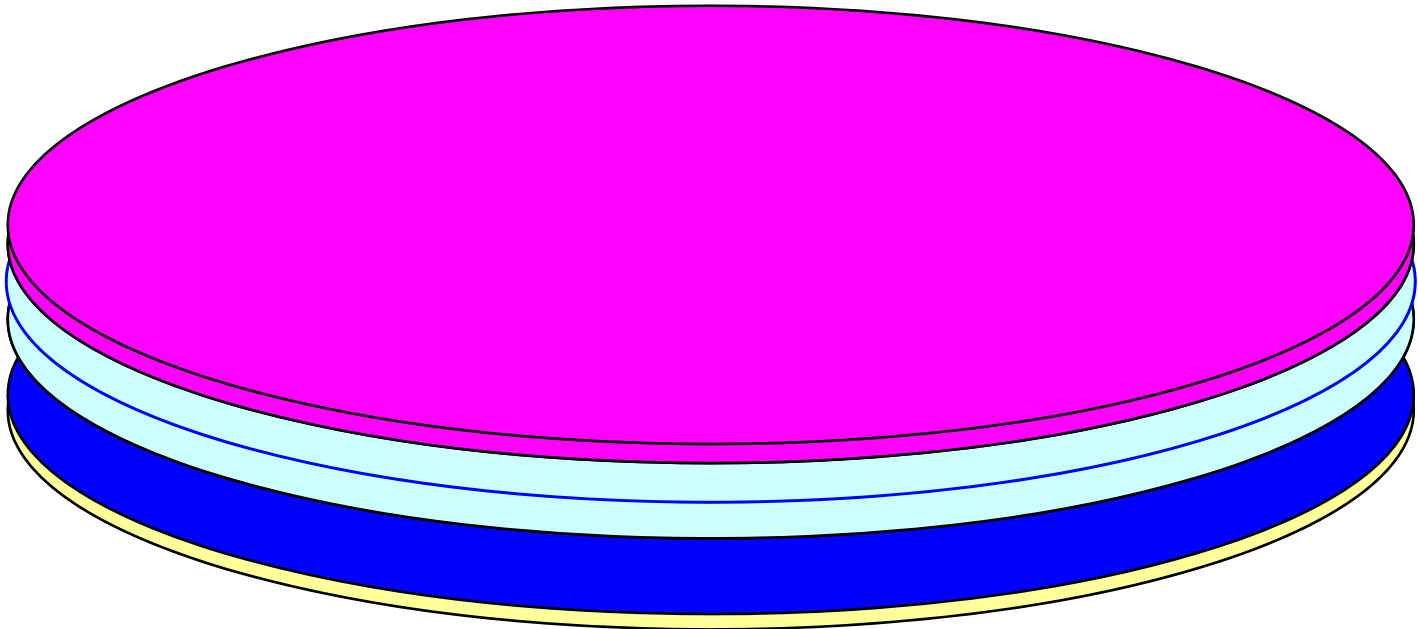
Tri-JD Al

| | Layer | | material | Condition | Rate | Thickness | time | |
|---|-------|-----------|----------|------------------------|------------|-----------|------------|-------------|
| 2 | Tri | Sputter | Al | Ar 50sccm: 1.1Pa, 250W | 922 A/min | 500 Å | 33" | |
| | | Oxidation | AlOx | O2 100 sccm: 30Torr | 2~3nm/30TH | 20~30 Å | 60' (30TH) | Torr x Hour |
| | | Sputter | Al | Ar 50sccm: 1.1Pa, 250W | 922 A/min | 500 Å | 33" | |



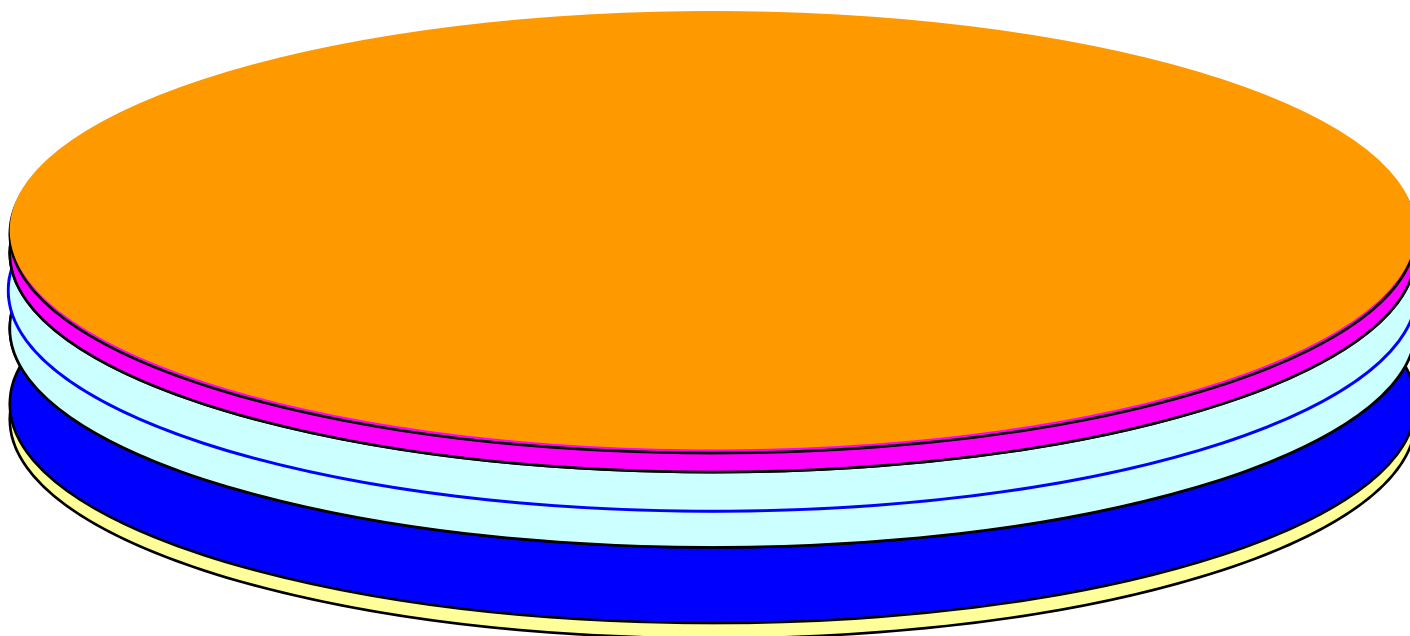
保護膜

| | Layer | | material | Condition | Rate | Thickness | time | |
|---|------------|---------|------------------|------------------------|-----------|-----------|------|--|
| 3 | Protection | Sputter | SiO ₂ | Ar 50sccm: 1.3Pa, 400W | 554 Å/min | 240 Å | 26" | |



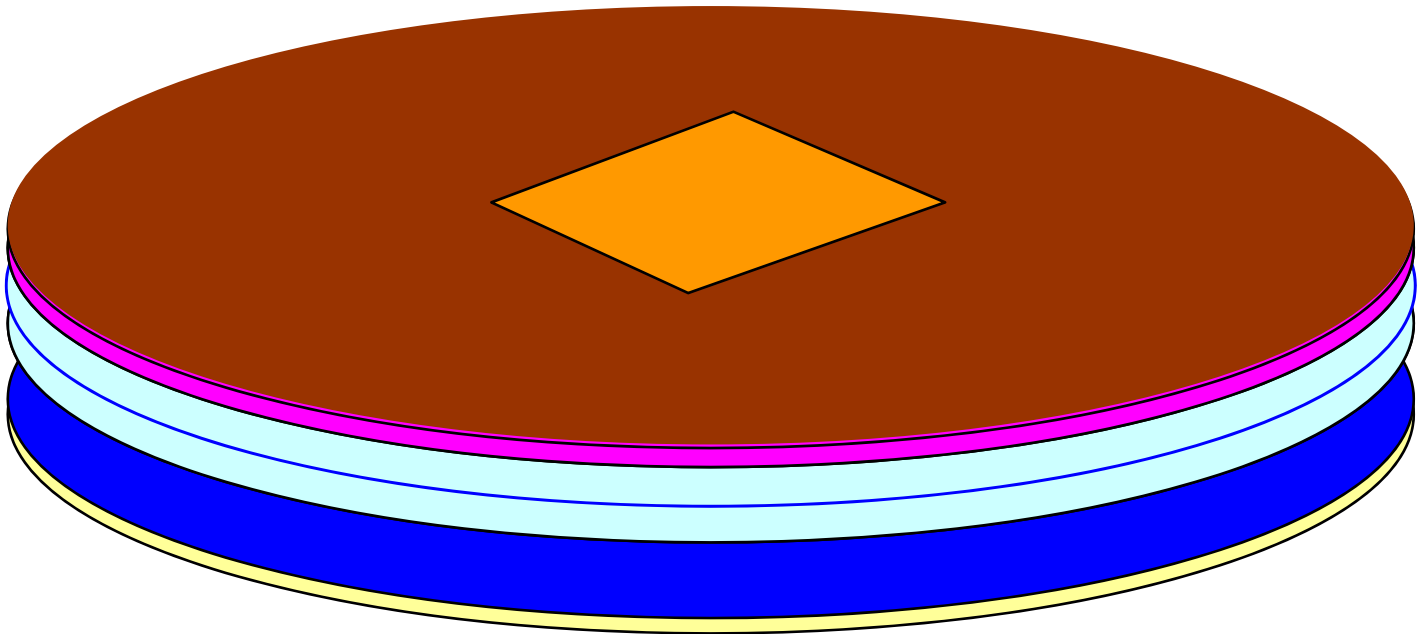
レジスト塗布

| | Layer | | material | Condition | Rate | Thickness | time | |
|---|--------|----|----------|-------------|------|-----------|------|--|
| 4 | Resist | JD | | RE11 MD5-JD | | | | |



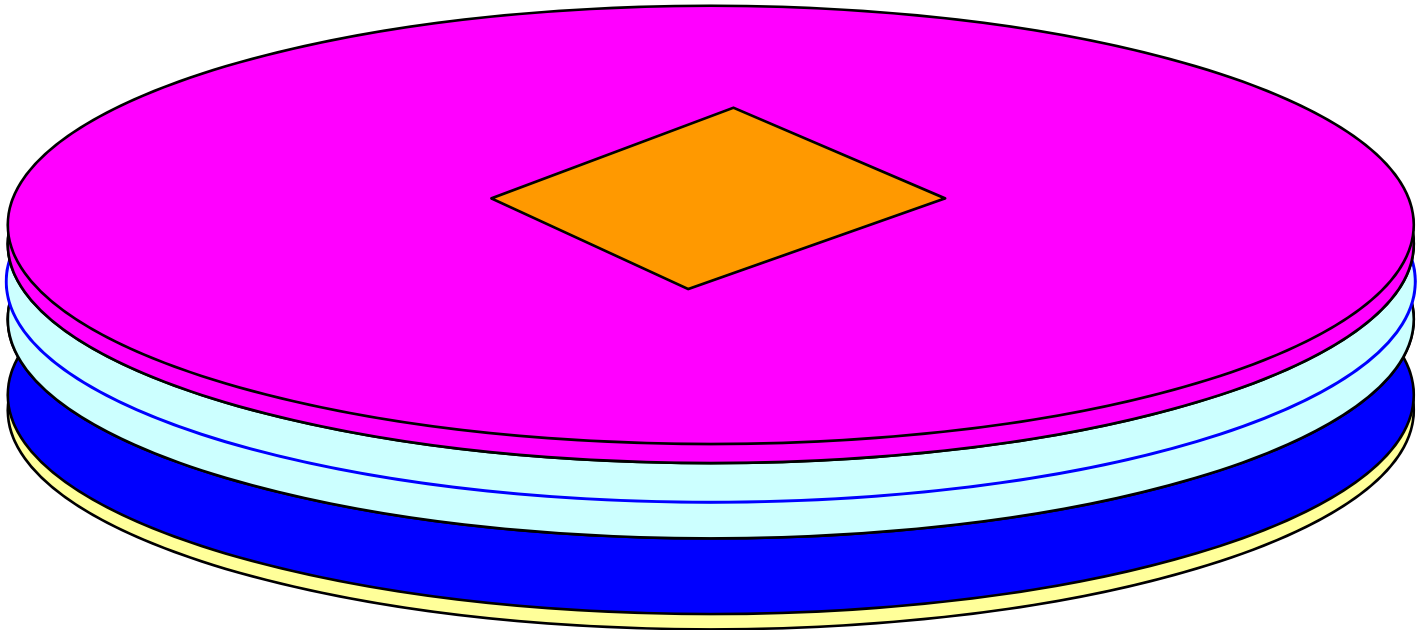
露光

| | Layer | | material | Condition | Rate | Thickness | time | |
|---|--------|----|----------|-------------|------|-----------|------|--|
| 4 | Resist | JD | | RE11 MD5-JD | | | | |



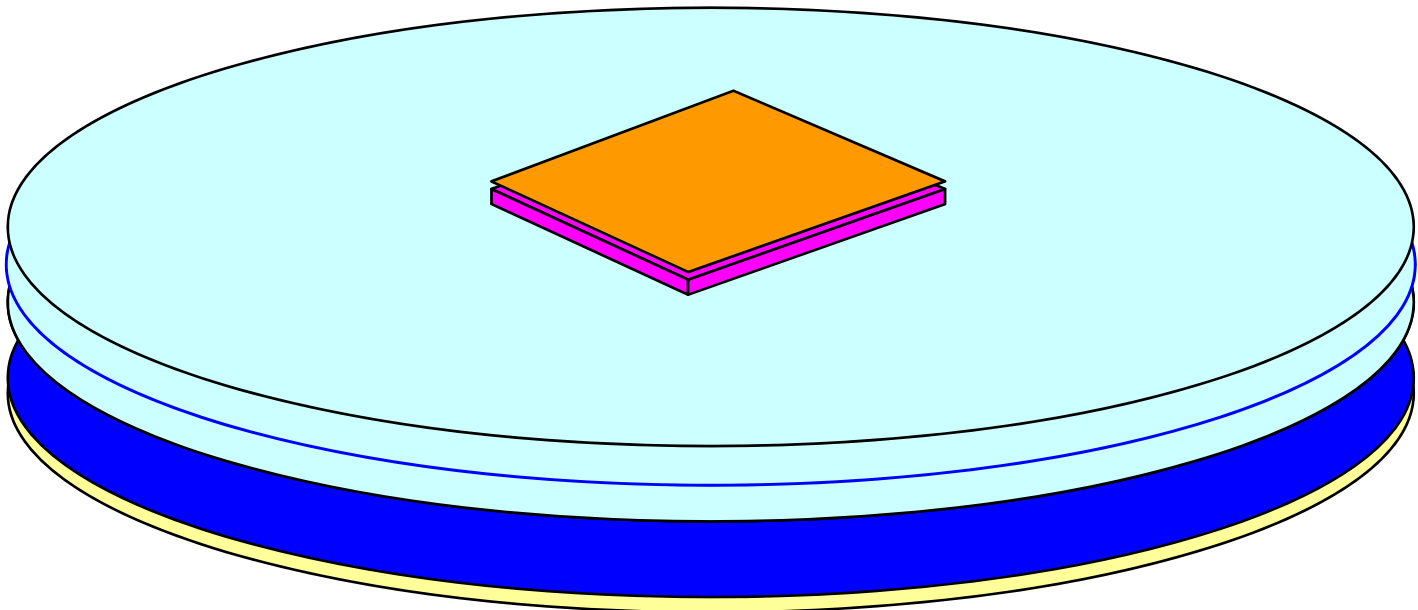
現像

| | Layer | | material | Condition | Rate | Thickness | time | |
|---|--------|----|----------|-------------|------|-----------|------|--|
| 4 | Resist | JD | | RE11 MD5-JD | | | | |



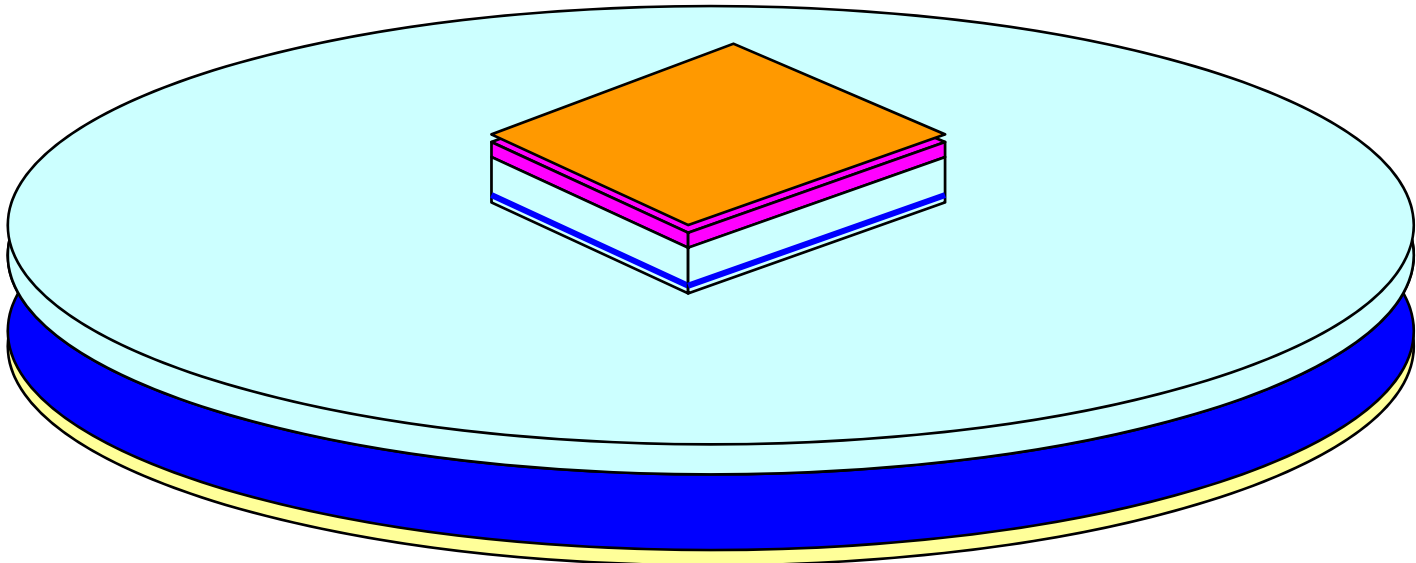
JDプリエッチング

| | Layer | | material | Condition | Rate | Thickness | time | |
|---|-------------------------|--------------------|------------------|-----------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| 5 | Junction Define (JD) | Etching (RIE 1) | SiO ₂ | CF4 50sccm: 20Pa, 30W | 477 A/min | 250 Å | 1' | |
| | | | Al | CF4 50sccm: 4Pa, 30W | 46 A/min | 550 Å | 2'x6 (3') | 次回 1'x12? |



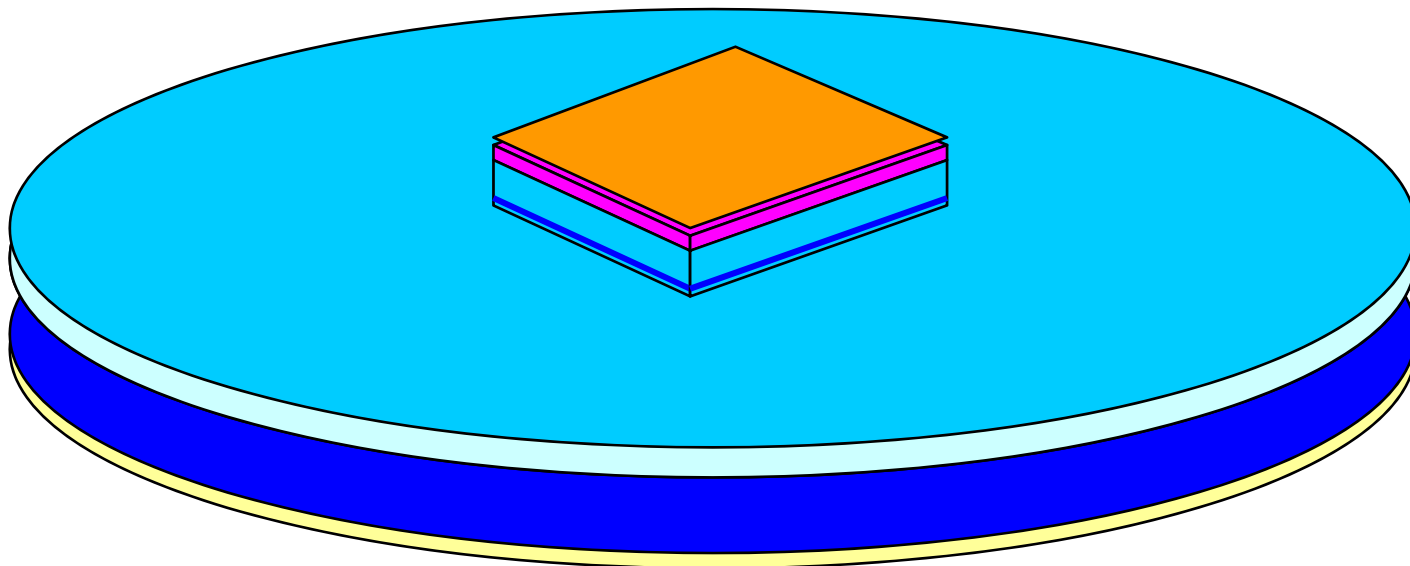
JD本番エッチング

| | Layer | | material | Condition | Rate | Thickness | time | |
|---|-------------------------|--------------------|------------------|-----------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| 5 | Junction Define (JD) | Etching (RIE 1) | SiO ₂ | CF4 50sccm: 20Pa, 30W | 477 A/min | 250 Å | 1' | |
| | | | Al | CF4 50sccm: 4Pa, 30W | 46 A/min | 550 Å | 2'x6 (3') | 次回 1'x12? |



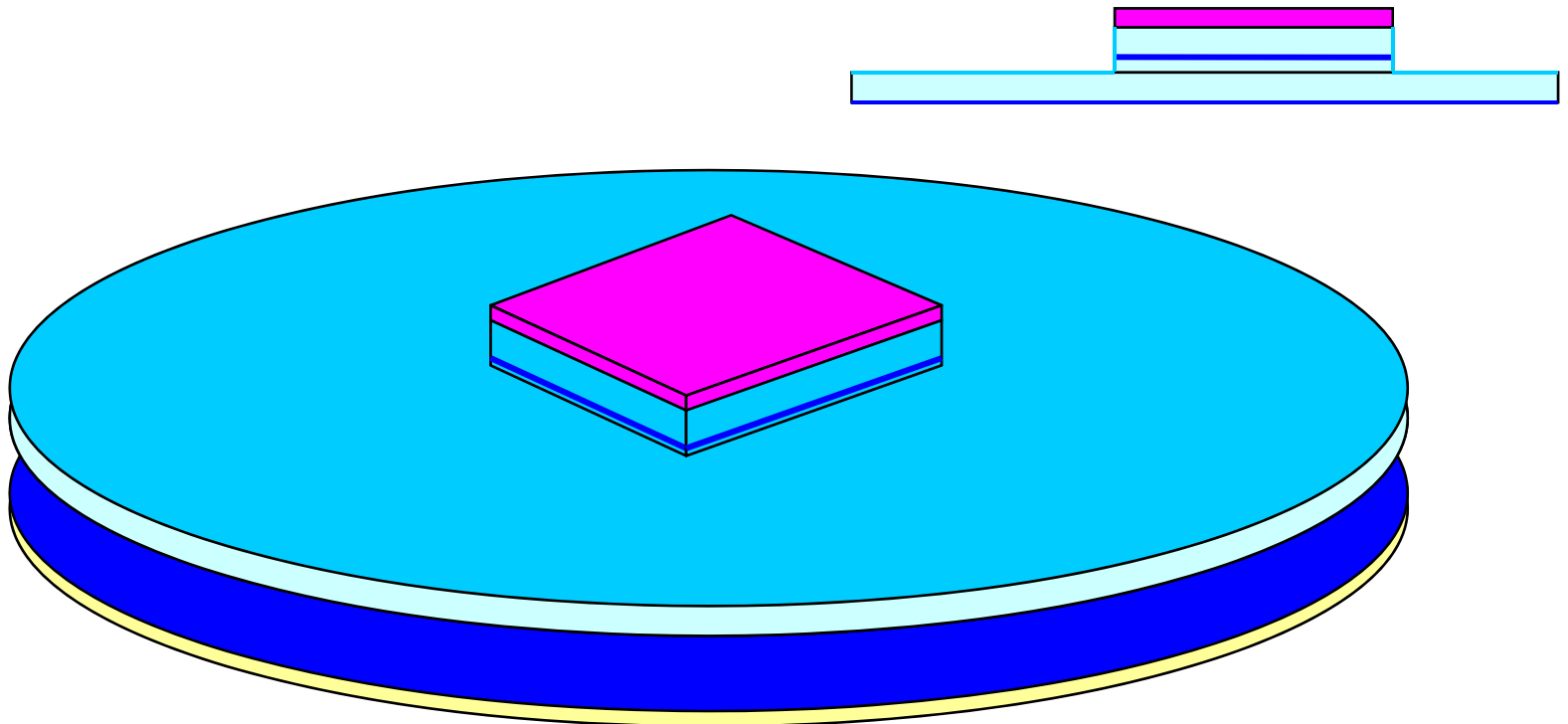
プラズマ酸化

| | Layer | | material | Condition | Rate | Thickness | time | |
|---|-------|--------|----------------|-----------------------------------|------|-----------|------|--|
| 6 | Edge | プラズマ酸化 | O ₂ | O ₂ 30 sccm: 13Pa, 30W | --- | --- | 1' | |



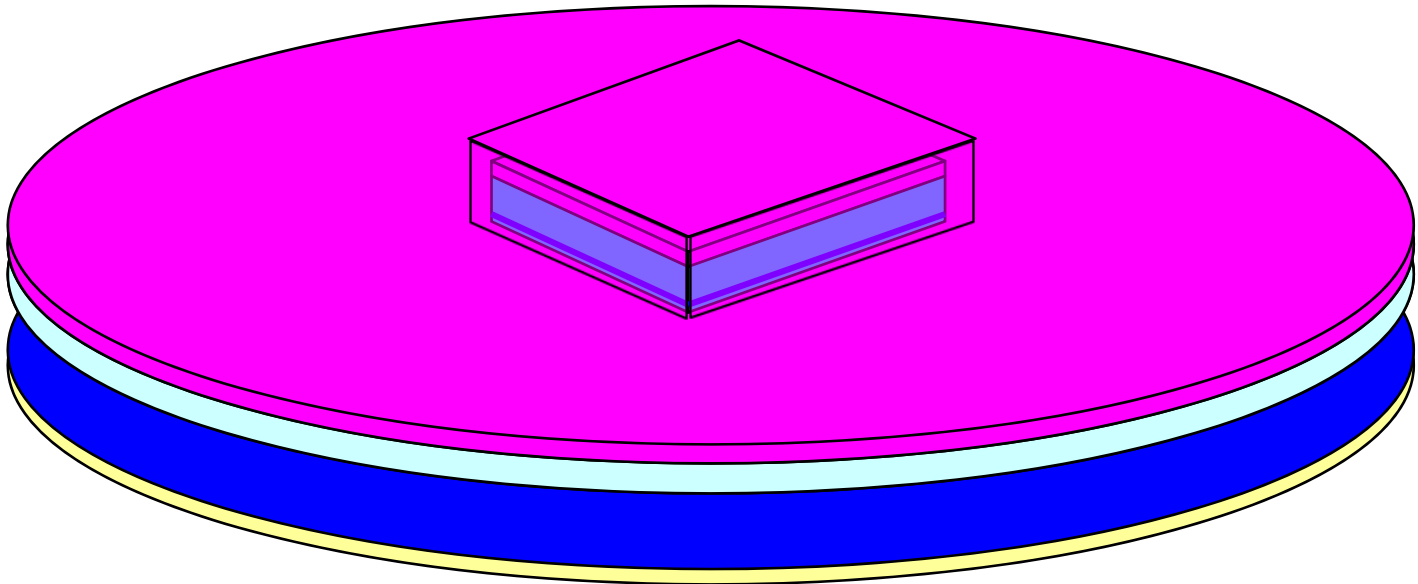
レジスト除去

| | Layer | | material | Condition | Rate | Thickness | time | |
|---|----------|--|----------|-----------|------|-----------|------|-------------|
| 7 | Resist除去 | | | | | | | ↓5/14 19:00 |



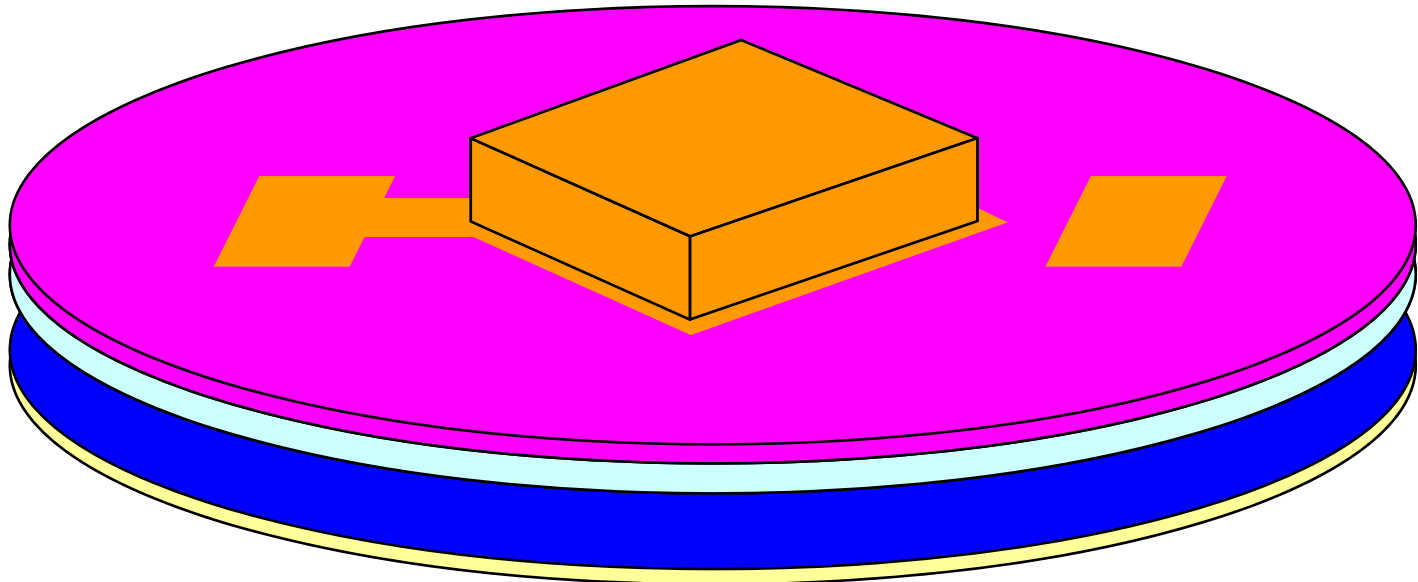
保護膜

| | Layer | | material | Condition | Rate | Thickness | time | |
|---|------------|---------|------------------|------------------------|-----------|-----------|------|--|
| 8 | Protection | Sputter | SiO ₂ | Ar 50sccm: 1.3Pa, 400W | 554 Å/min | 240 | 26" | |



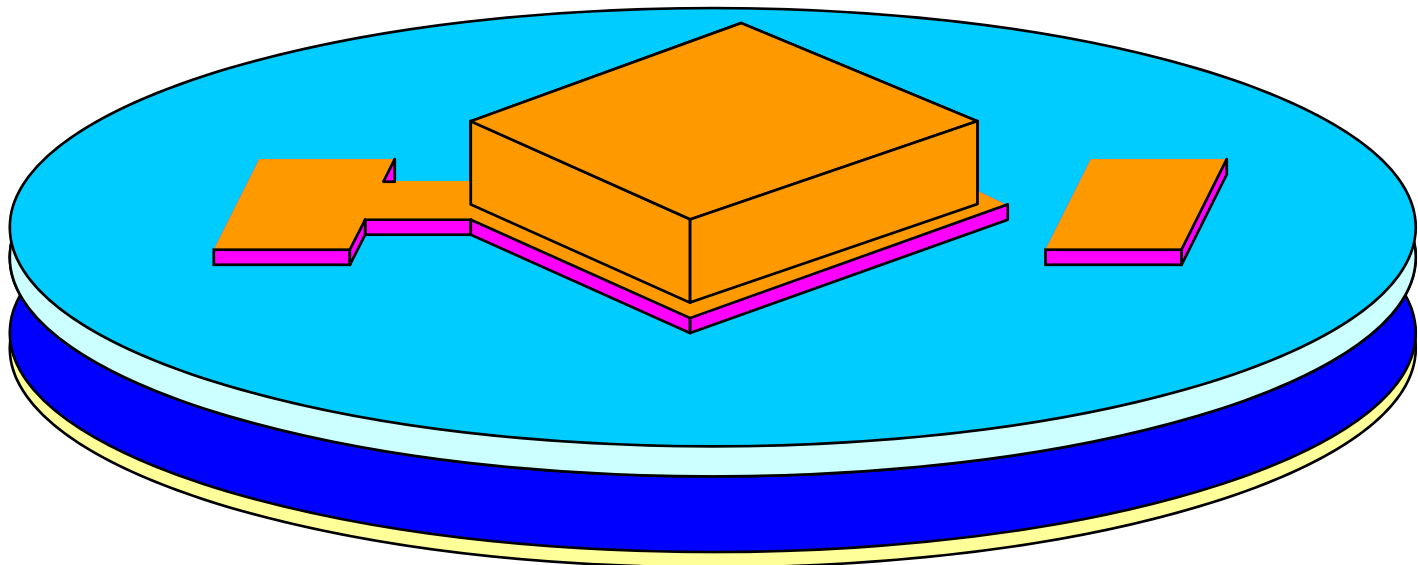
レジスト塗布、露光、現像

| | Layer | | material | Condition | Rate | Thickness | time | |
|---|--------|----|----------|-------------------|------|-----------|------|-------------|
| 9 | Resist | BE | | RE11(実際は13)MD5-BE | | | | ↓5/15 12:30 |



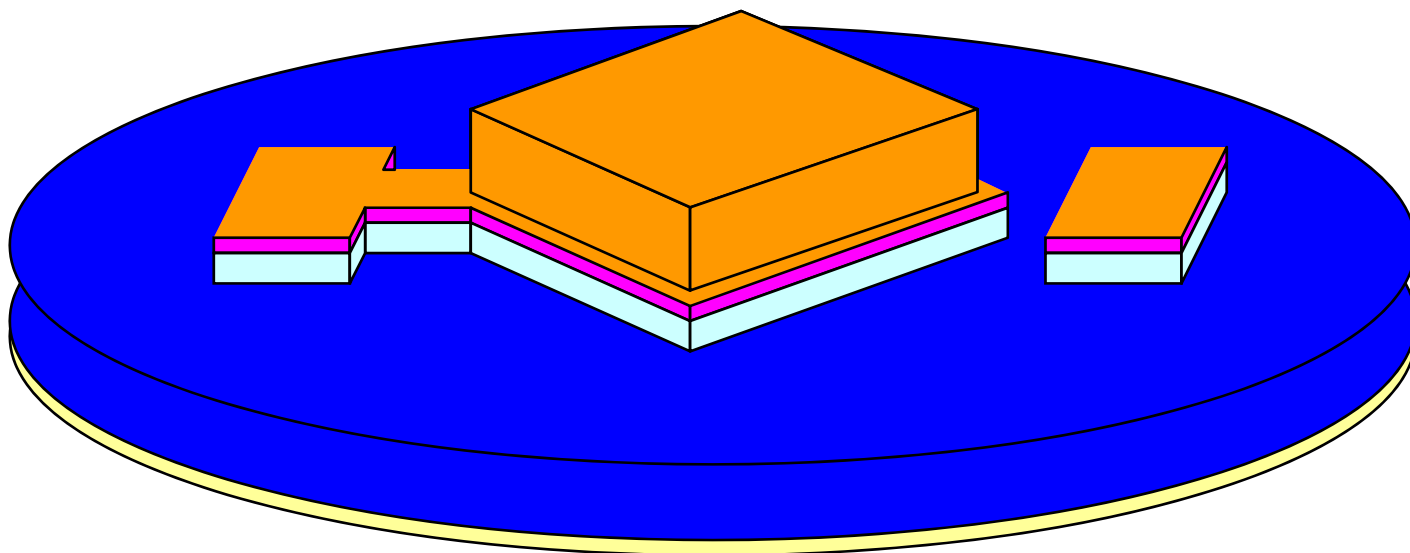
BE pre-etching

| | Layer | | material | Condition | Rate | Thickness | time | |
|----|---------------------|-----------------|------------------|-----------------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| 10 | BE (Base Electrode) | Etching (RIE 1) | SiO ₂ | CF ₄ 50sccm: 20Pa, 30W | 477 A/min | 250 Å | 1' | |
| | | | Al | CF ₄ 50sccm: 4Pa, 30W | 46 A/min | 550 Å | 2'x6 (3') | 次回 1'x12? |



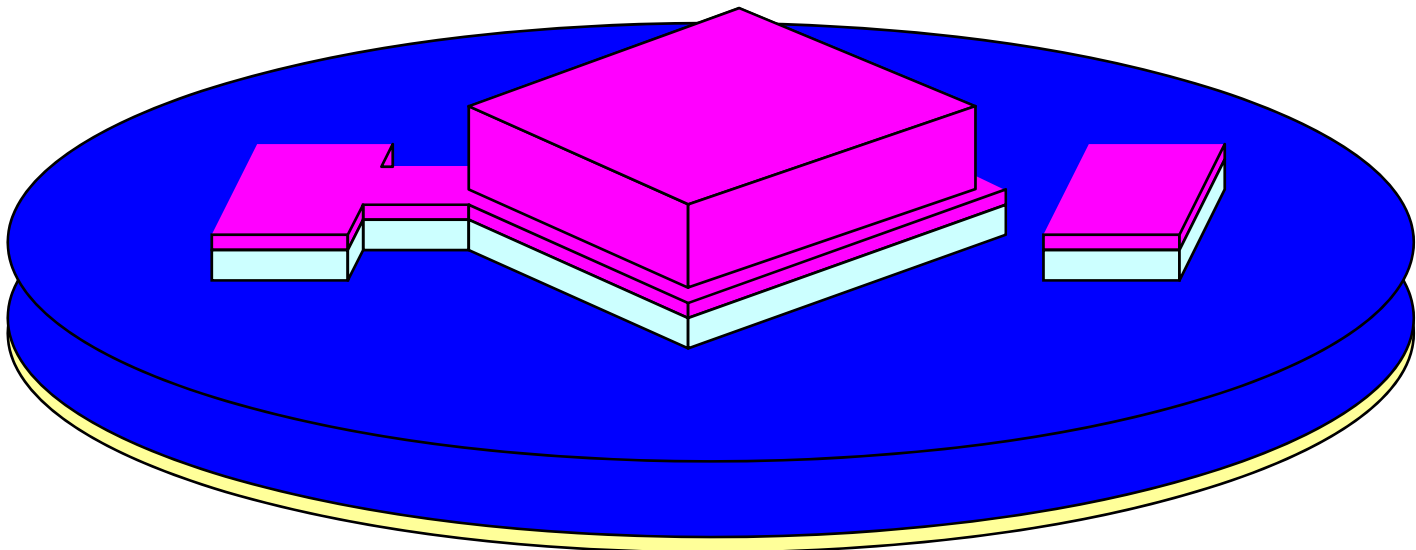
BE 本番etching

| | Layer | | material | Condition | Rate | Thickness | time | |
|----|---------------------|-----------------|------------------|-----------------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| 10 | BE (Base Electrode) | Etching (RIE 1) | SiO ₂ | CF ₄ 50sccm: 20Pa, 30W | 477 A/min | 250 Å | 1' | |
| | | | Al | CF ₄ 50sccm: 4Pa, 30W | 46 A/min | 550 Å | 2'x6 (3') | 次回 1'x12? |



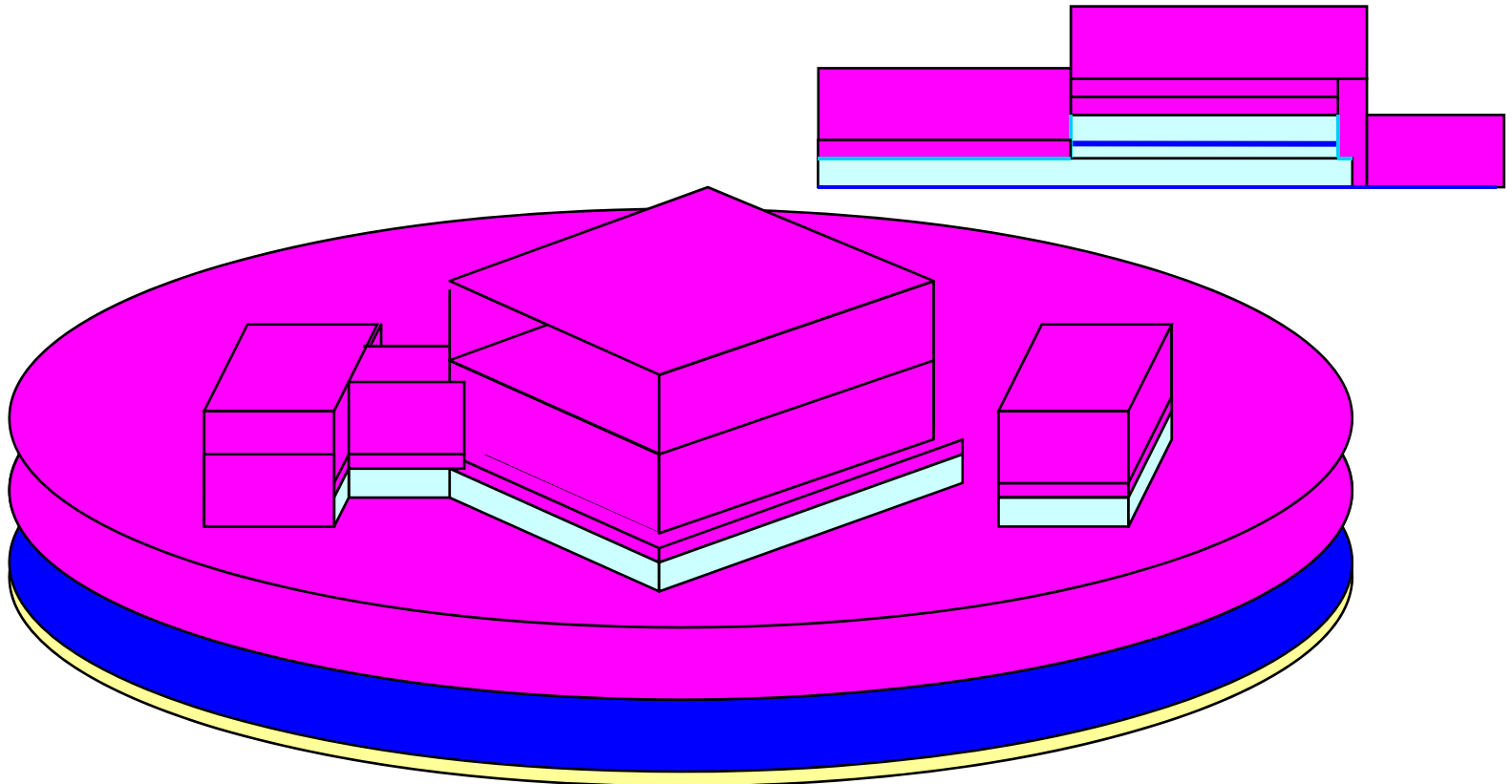
レジスト除去

| | Layer | | material | Condition | Rate | Thickness | time | |
|----|----------|--|----------|-----------|------|-----------|------|--|
| 11 | Resist除去 | | | | | | | |



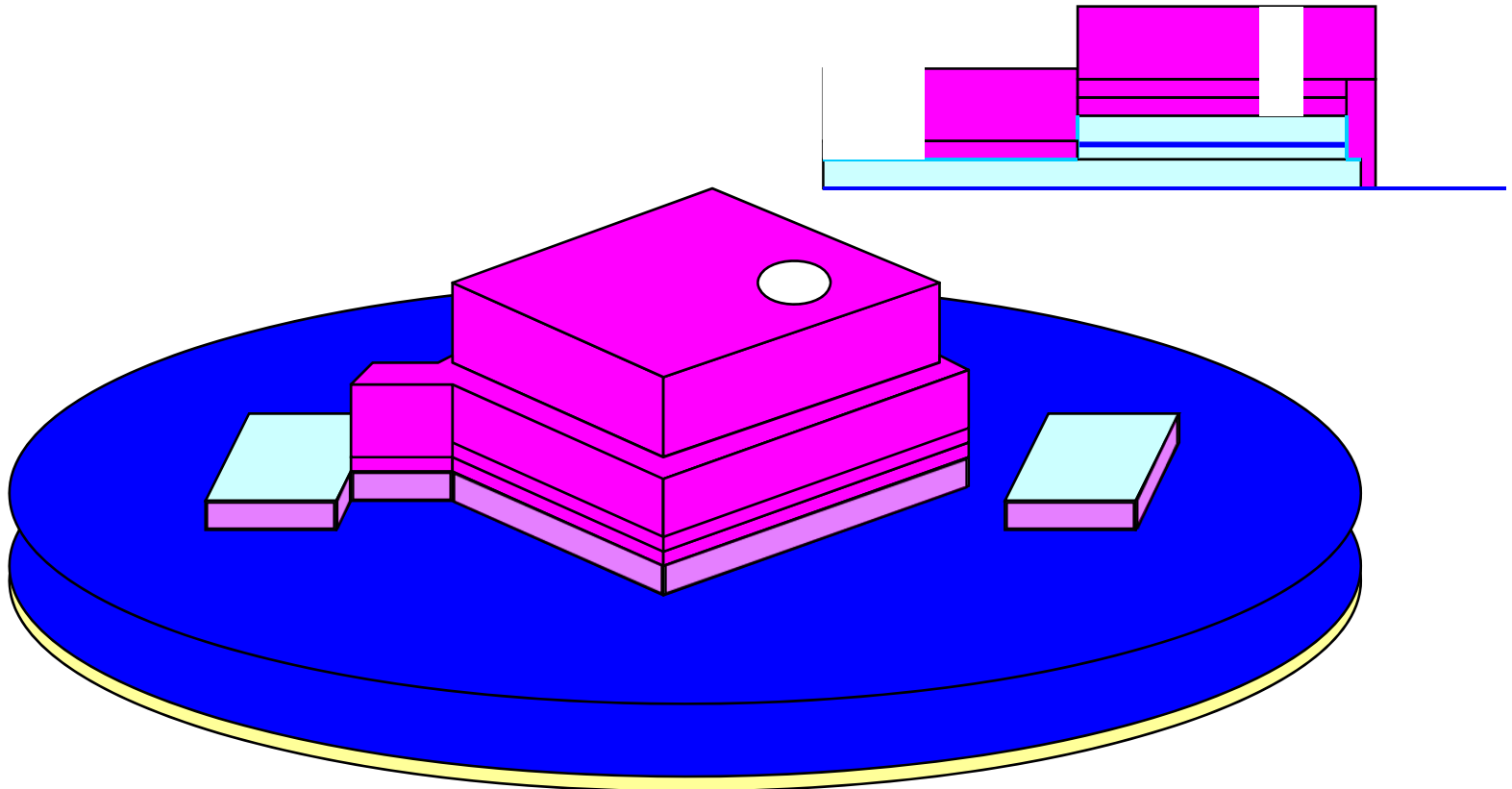
Insulation Layer

| | Layer | | material | Condition | Rate | Thickness | time | |
|----|------------|---------|------------------|------------------------|-----------|-----------|-------|--|
| 12 | Insulation | Sputter | SiO ₂ | Ar 50sccm: 1.3Pa, 400W | 554 Å/min | 1,000 Å | 1'48" | |

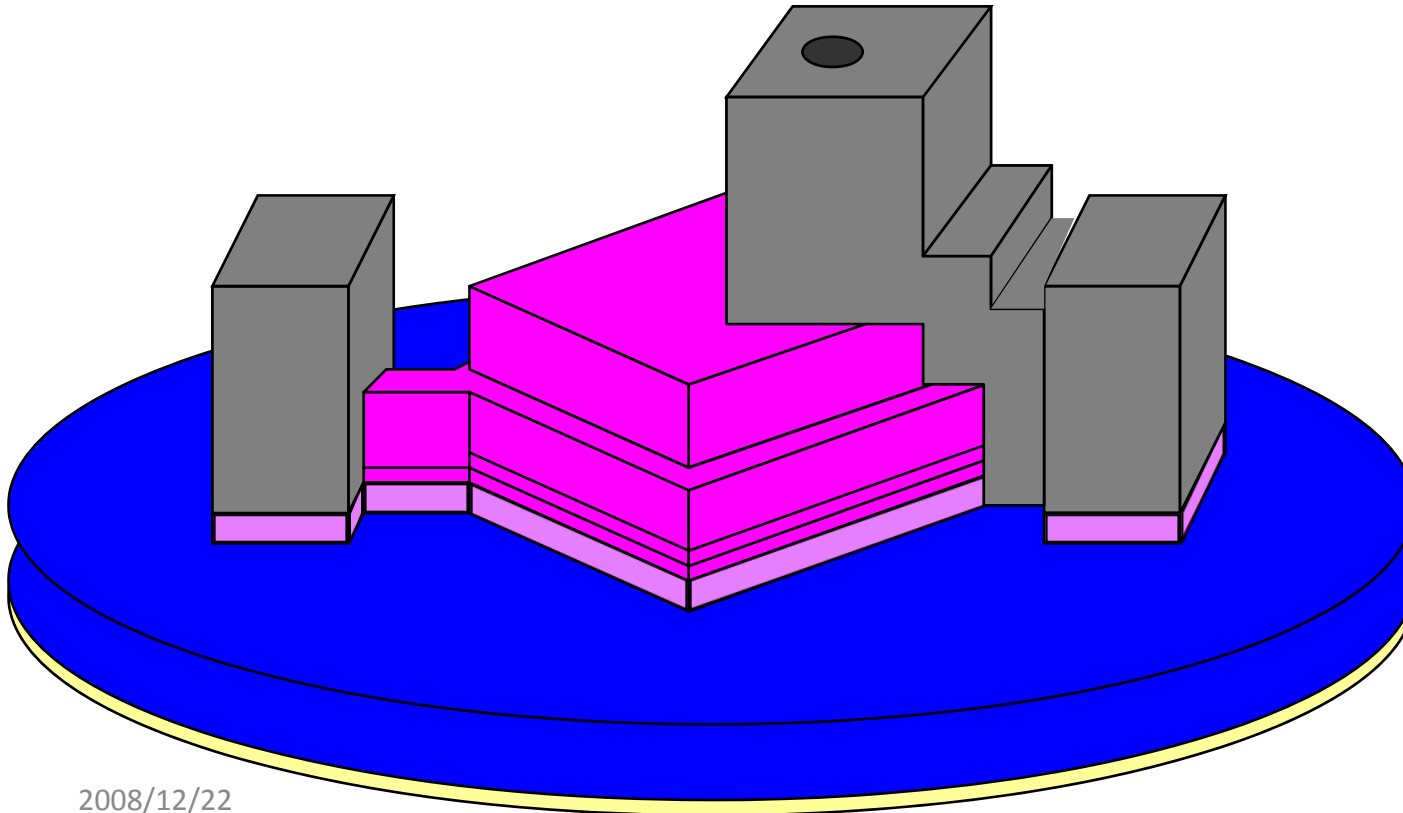
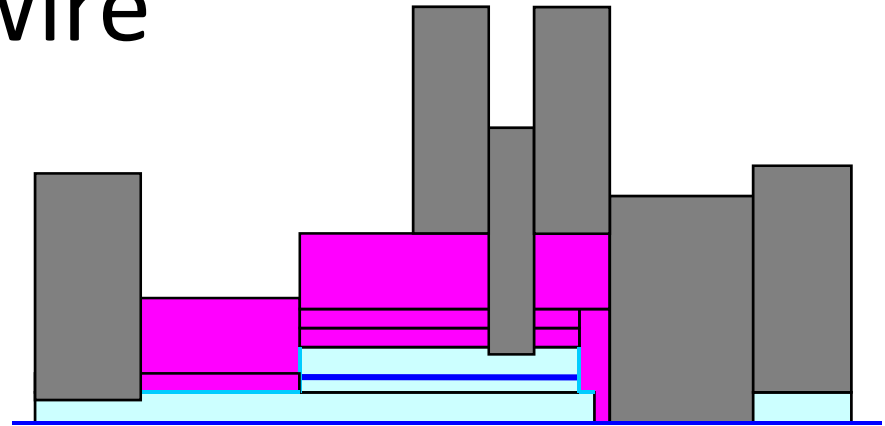


Contact Hall (padの酸化膜も削る)

| | Layer | | material | Condition | Rate | Thickness | time | |
|----|----------|---------|------------------|-----------------------|-----------|-----------|------|-------------|
| 13 | Resist | BE | | RE11 MD5-CH | | | | |
| 14 | CH | Etching | SiO ₂ | CF4 50sccm: 20Pa, 30W | 477 A/min | 1,500 Å | 4' | ↓5/15 17:50 |
| 15 | Resist除去 | | | | | | | ↓5/15 18:30 |

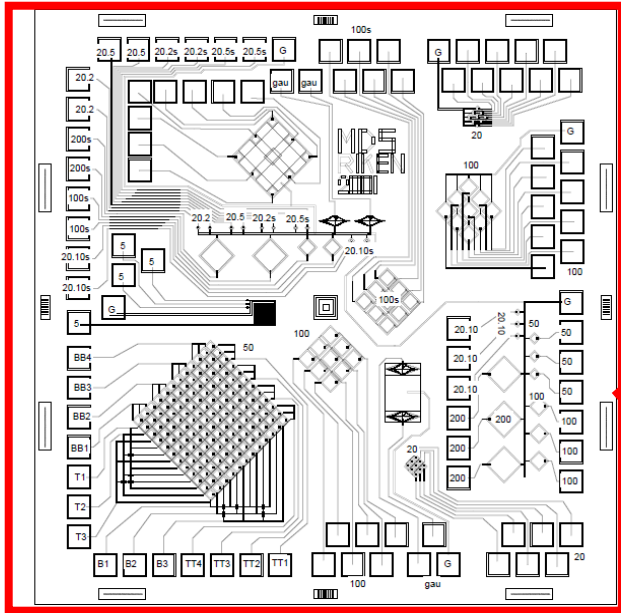


Nb wire

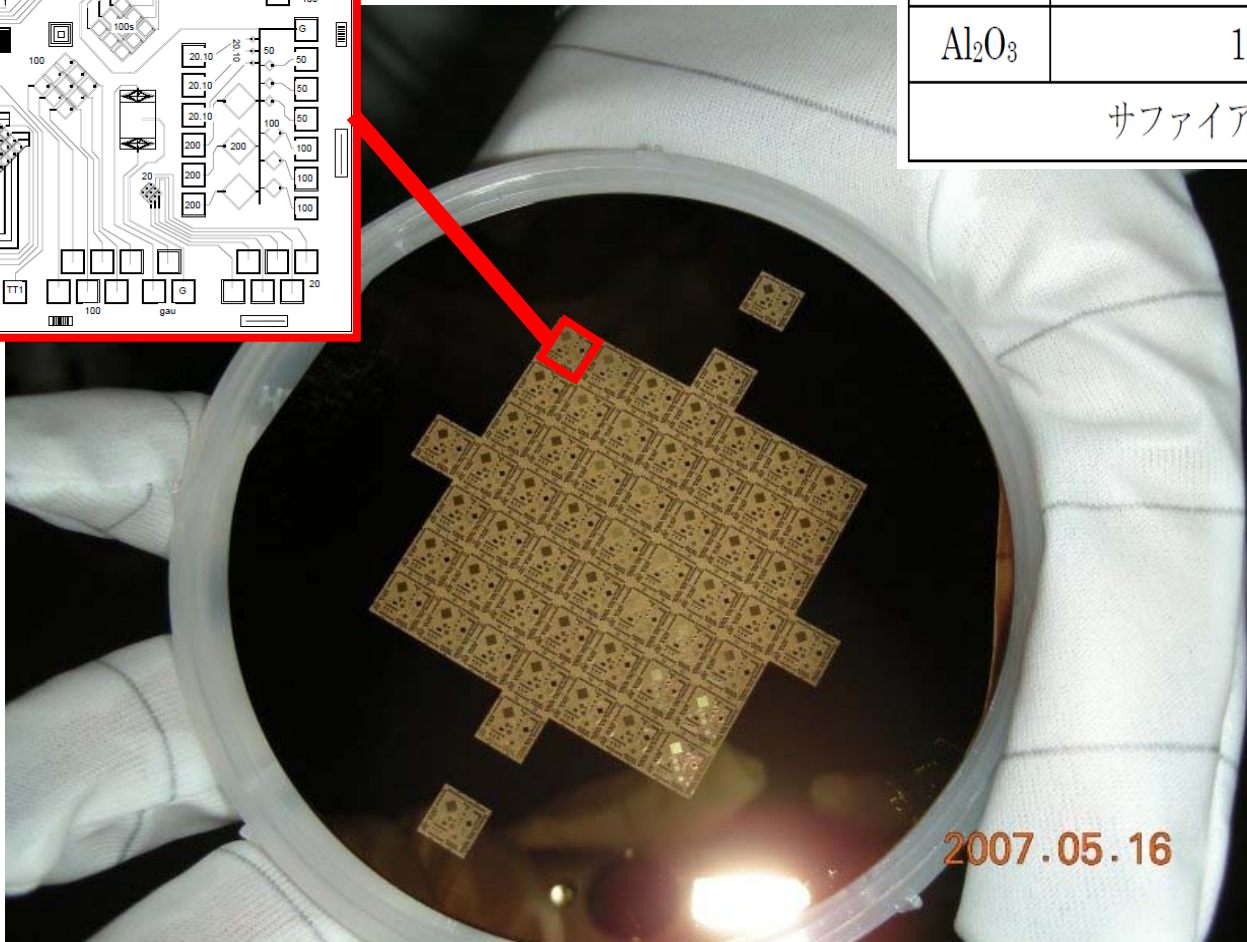


| | Layer | |
|----|----------|---------|
| 16 | Wire | Sputter |
| 17 | Resist | W |
| 18 | Wire | Etching |
| 19 | Resist除去 | |
| 20 | 保護resist | ベーク 5' |

X線用Al-STJ

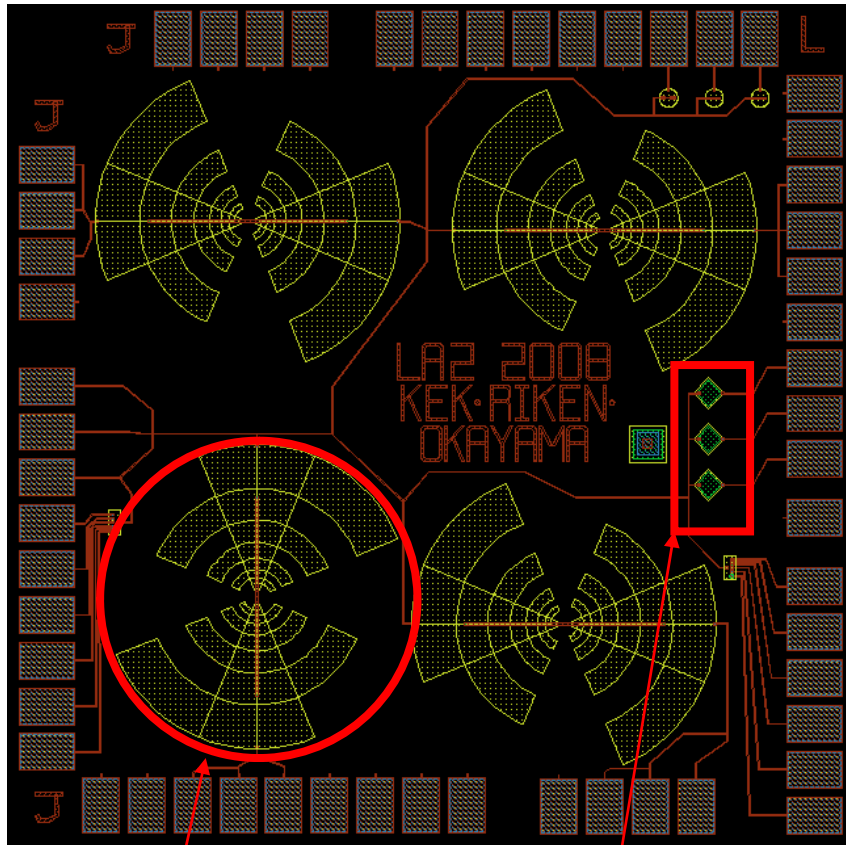


| | | |
|---------|--------------------------------|------------------------|
| S | Al | 50 nm |
| I | AlO _x | 30Torr x 1hour (2~3nm) |
| S | Al | 50 nm |
| | Al ₂ O ₃ | 100 nm |
| サファイア基板 | | |



アンテナ接続Al/Nb-STJ試作

作成条件が既知のNb/Al-STJで試作



| KEKLA2-03 | | |
|--------------------------------|------------------|-------------------------|
| S | Nb | 50 nm |
| | Al | 25 nm |
| I | AlO _x | 6~9nm(20Torr X 0.5Hour) |
| S | Al | 25 nm |
| アンテナ(Nb) | | 150 nm |
| Al ₂ O ₃ | | 100 nm |
| シリコン基板 | | |

アンテナ結合STJ

X線用STJ

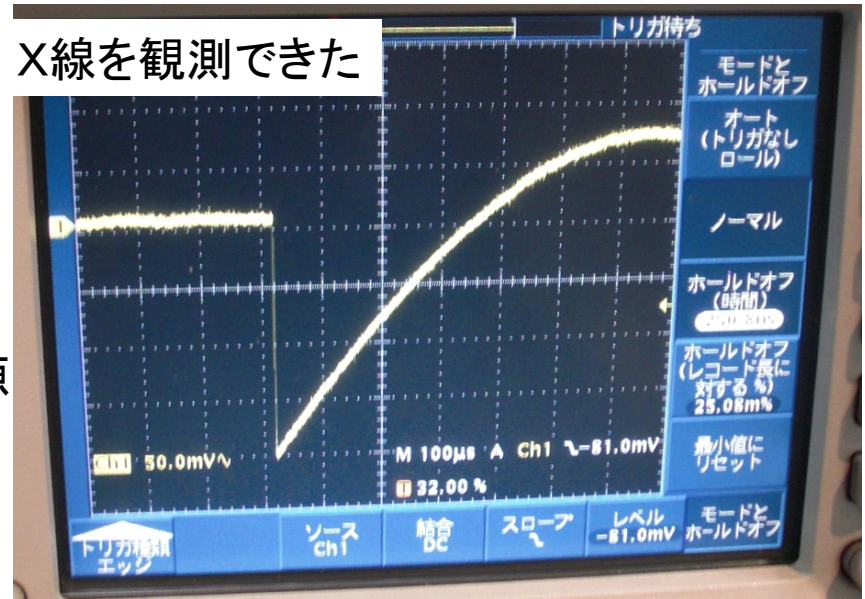
Nb/Al-STJ試験

0.3K冷凍機を使ったX線測定

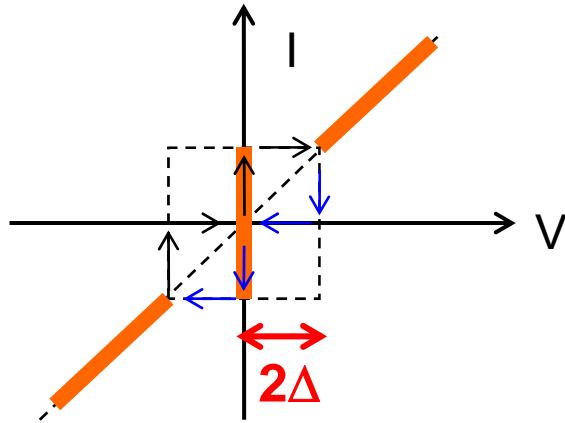
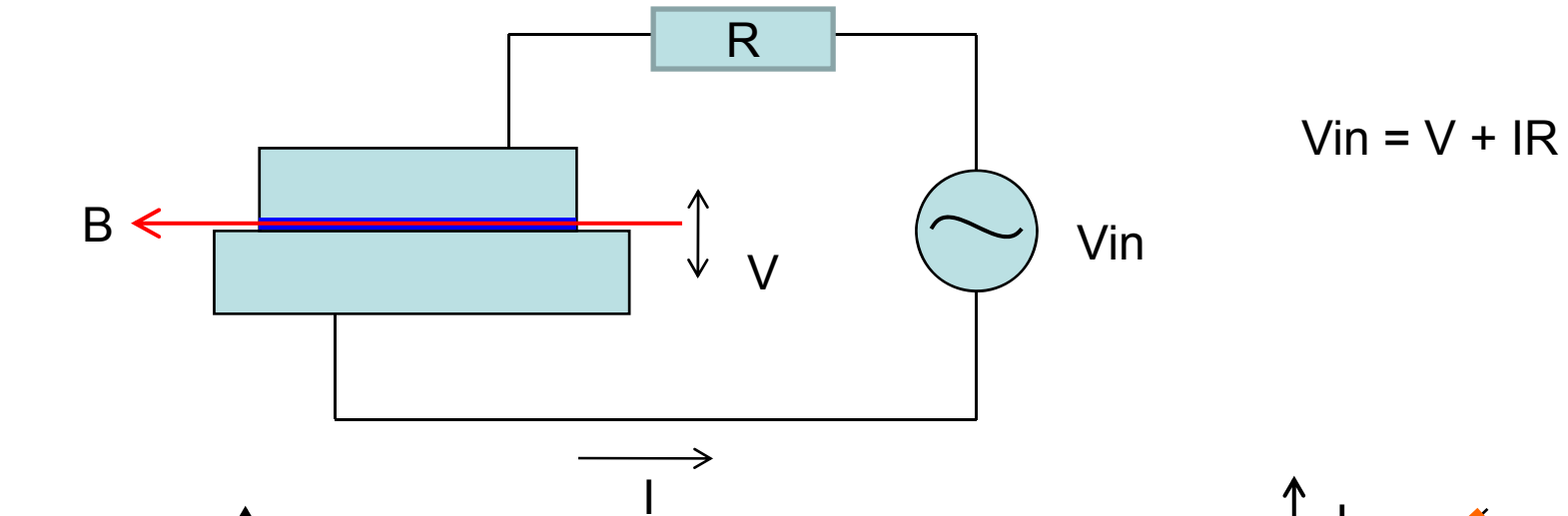
0.3K理研冷凍器



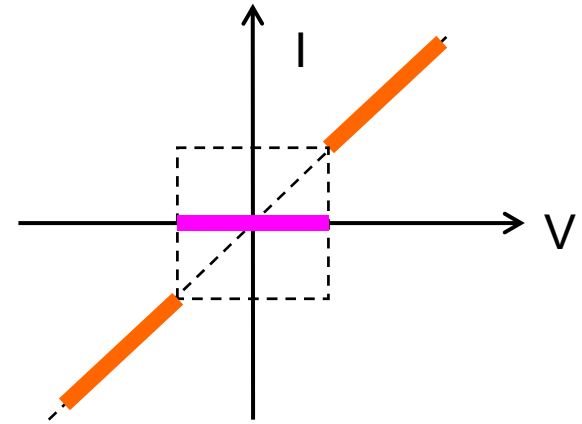
Fe55線源



I-V測定 = SIS構造がうまく出来ていることのチェック



磁場無
トンネルバリアをクーパー対
が抜けられる(直流ジョセフソン効果)



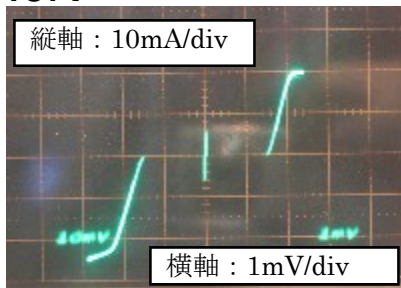
磁場有
トンネルバリアに磁力線が
入り込むためクーパー対が
通れない

Nb/Al-STJの試験

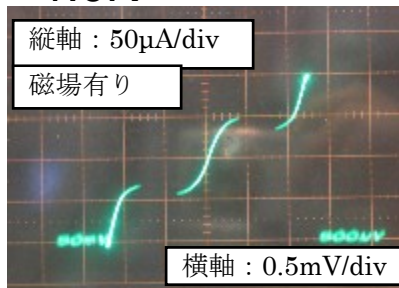
He4デュアーを使ったI-V測定

- ダイヤ型STJ (100 μ m)

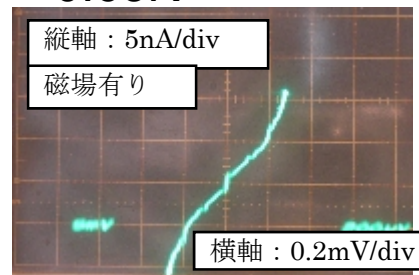
1.6K



1.6K



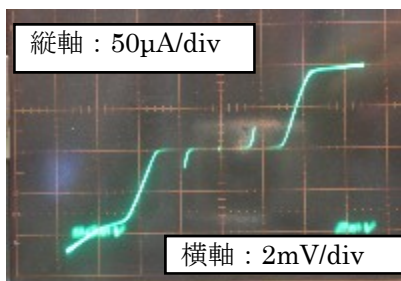
0.63K



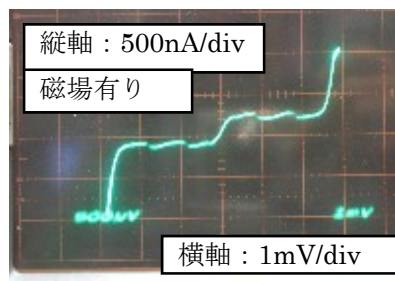
リークカレント
5nA @ 200 μ V
* 40 μ A (1.6K)

- アンテナ接続STJ (ϕ 7 μ m x 2)

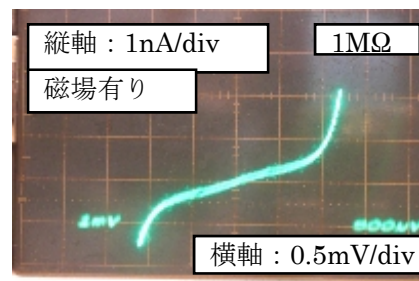
1.6K



1.6K



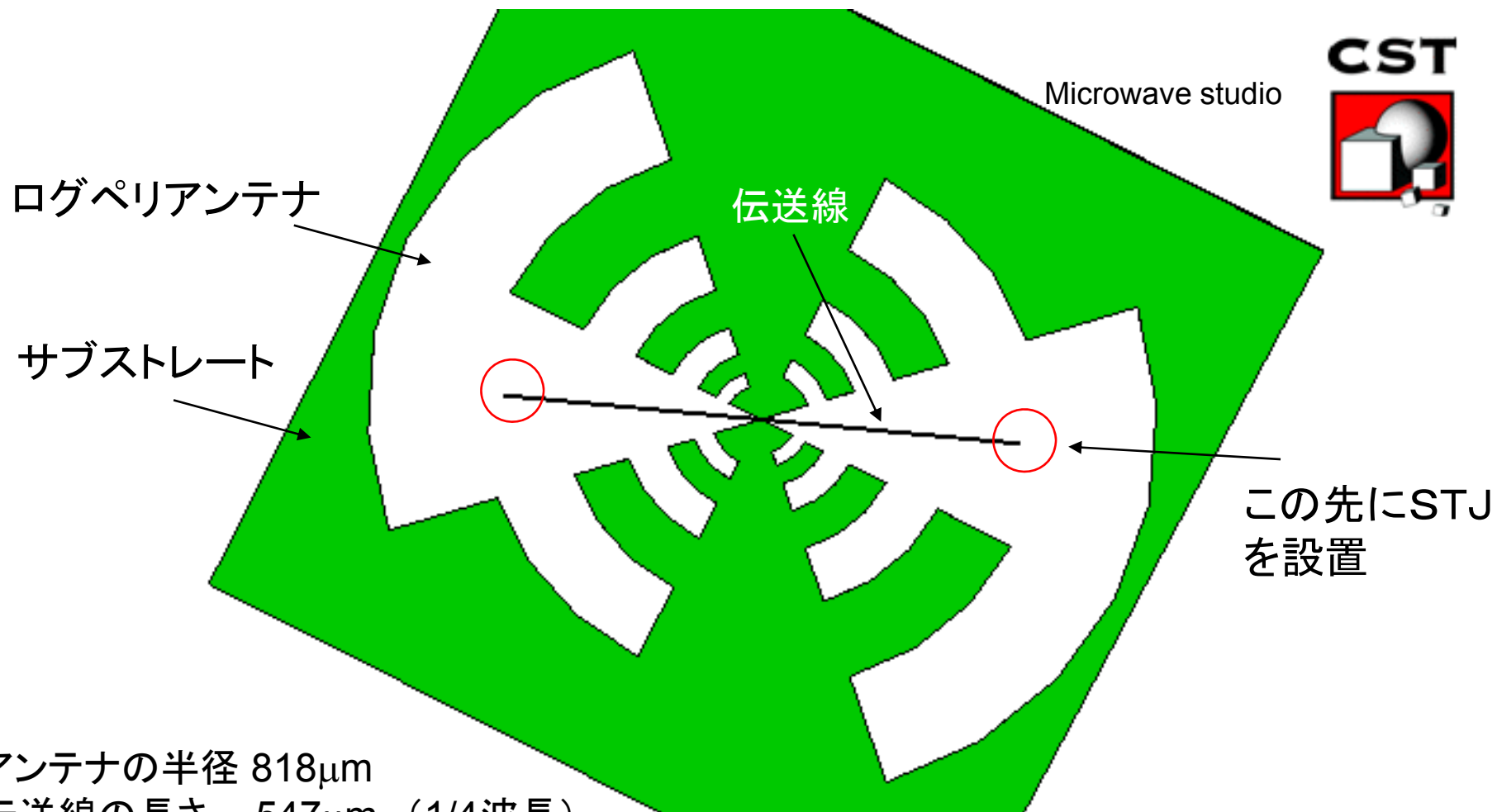
0.63K



リークカレント
0.3nA @ 400 μ V
* 180nA (1.6K)

アンテナ結合のNb/Al-STJがうまく作成出来た。
今後：東北理研でミリ波照射のテストを行う。

AI-STJ: アンテナと伝送線の設計



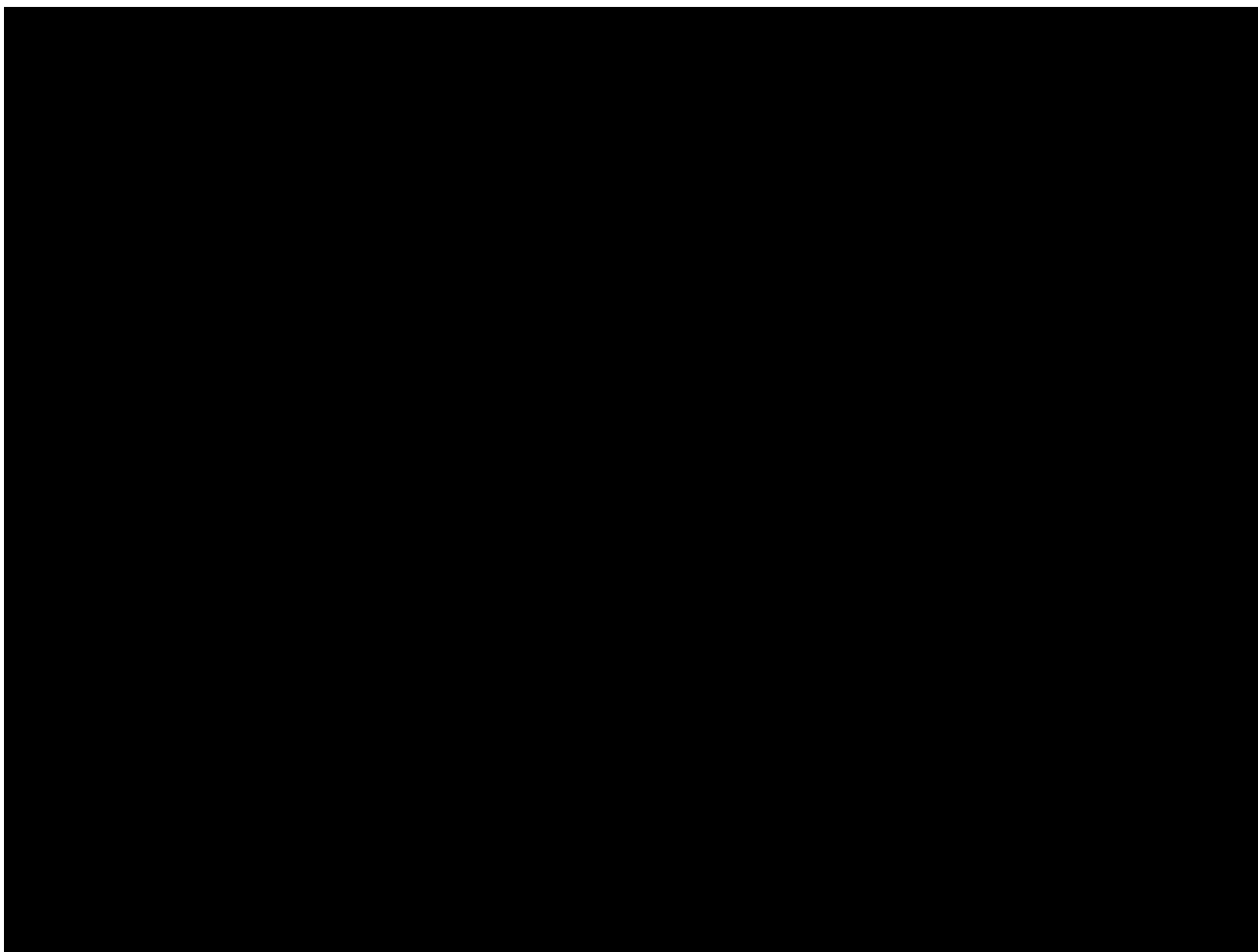
アンテナの半径 $818\mu\text{m}$
伝送線の長さ $547\mu\text{m}$ (1/4波長)
伝送線の幅 $4.46\mu\text{m}$
STJの断面積 $10\mu\text{m}^2$

インピーダンス整合

72GHzに最適化

電界シミュレーション

吉田



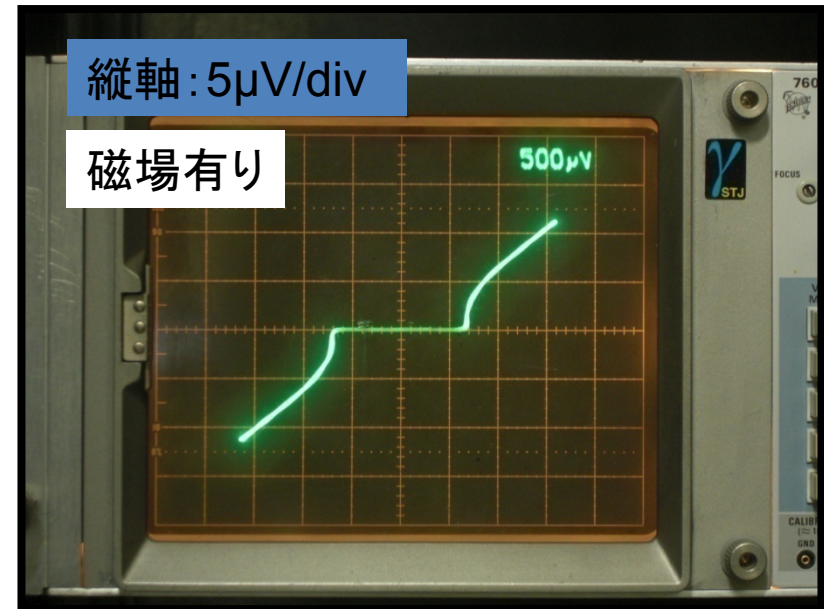
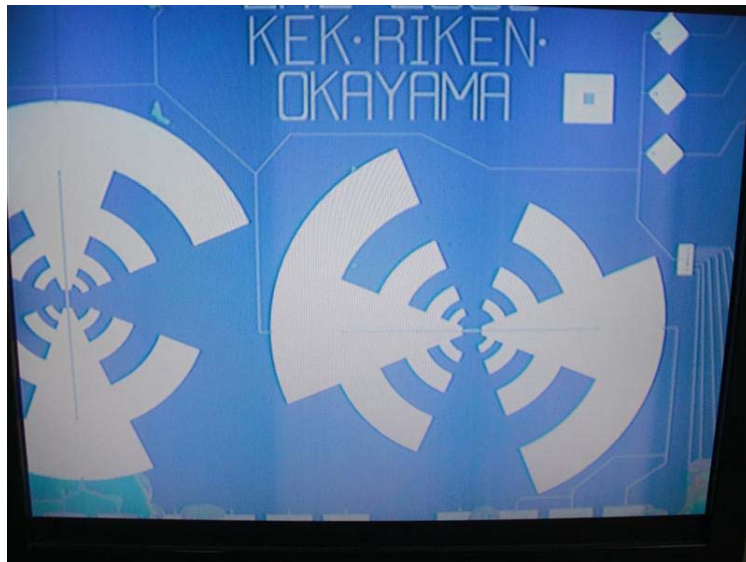
色が(アンテナ面に垂直な)電界の強さをあらわす

■ 上向きの電界
■ 下向きの電界

アンテナ接続AI-STJ試作

KEKLA2-アライナー

| | | |
|--------|----------|-------------------------|
| S | Al | 25 nm |
| I | AlOx | 6~9nm(20Torr X 0.5Hour) |
| S | Al | 25 nm |
| | アンテナ(Al) | 25 nm |
| | Al2O3 | 100 nm |
| シリコン基板 | | |



アンテナ結合STJ($\phi 7\mu\text{m} \times 2$)

- ギャップ: $650\mu\text{V}$ (Al x 2)
- $25\text{nA}@200\mu\text{V}$
 - 温度を下げるとうさらに下がりそう
→ ADRで 100mK での
I-V測定を行う

Hf-STJs: Depo. condition H.Sato

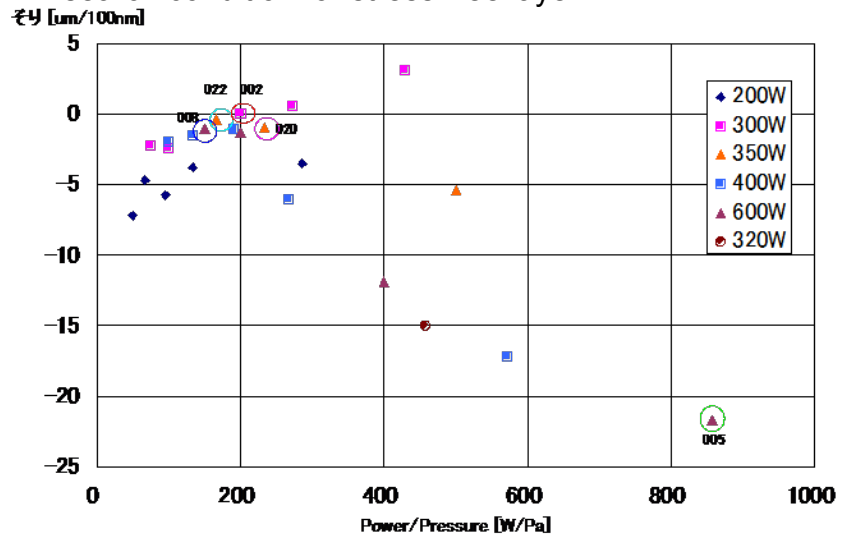
This was a first time for us to make Hf films. So, deposition condition should be fixed firstly.

(... And So far, nobody succeed in making Hf-STJs in the world.)

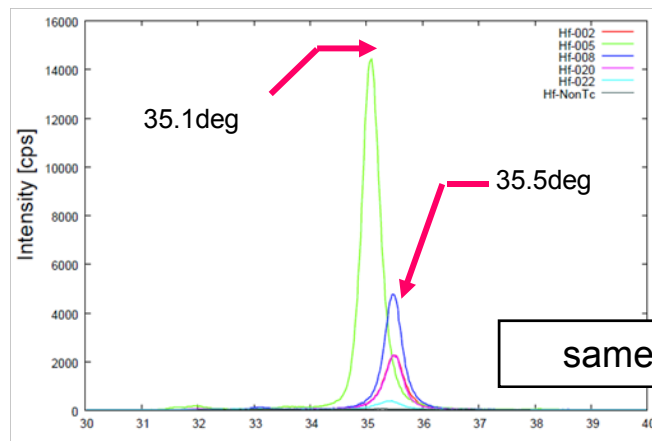
deposition conditions

| | Power [W] | Ar Pressure [Pa] | Bend [μm/100nm] | Thickness [nm/5min] |
|--------|--------------|---------------------|--------------------|------------------------|
| Hf-002 | 300 | 1.5 | 0.034854 | 76.5 |
| Hf-005 | 600 | 0.7 | -21.689552 | 134 |
| Hf-008 | 600 | 4.0 | -1.0269692 | 117 |
| Hf-020 | 350 | 1.5 | -0.9649903 | 86.2 |
| Hf-022 | 350 | 2.1 | -0.3786127 | 86.5 |
| Hf-000 | 300 | 1.0 | - | 83.5 |

search condition for stress-free layer



X-ray diffraction measurement



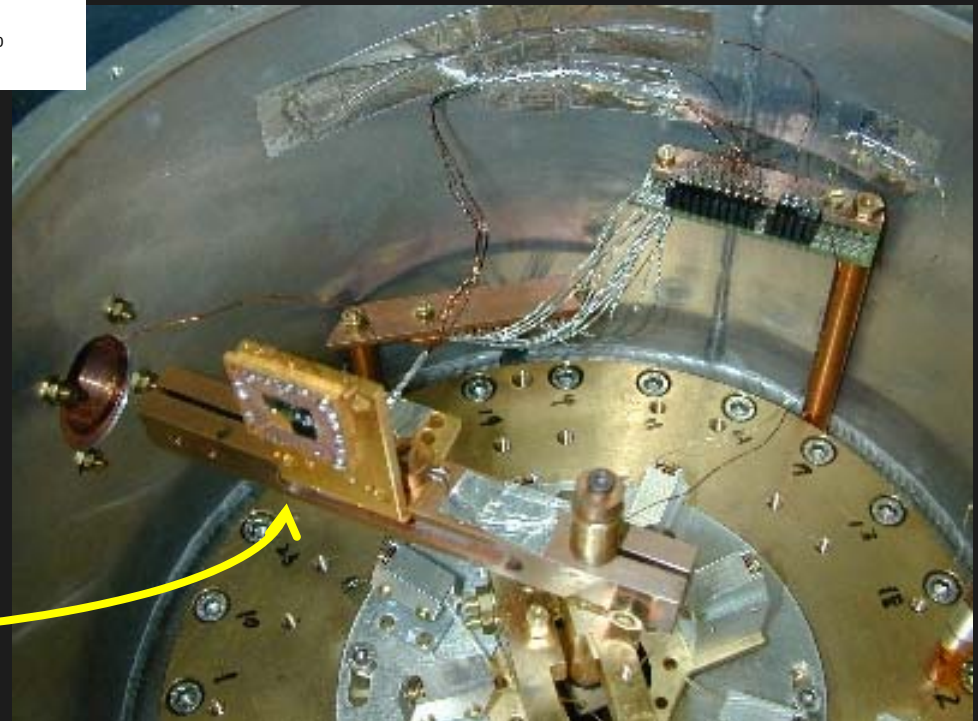
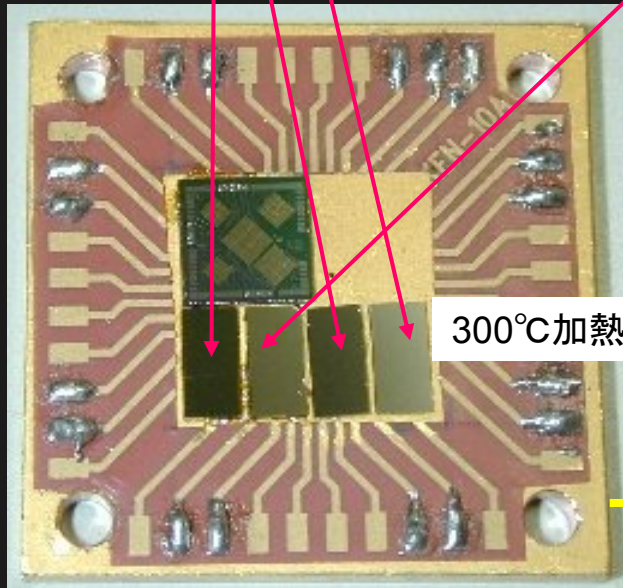
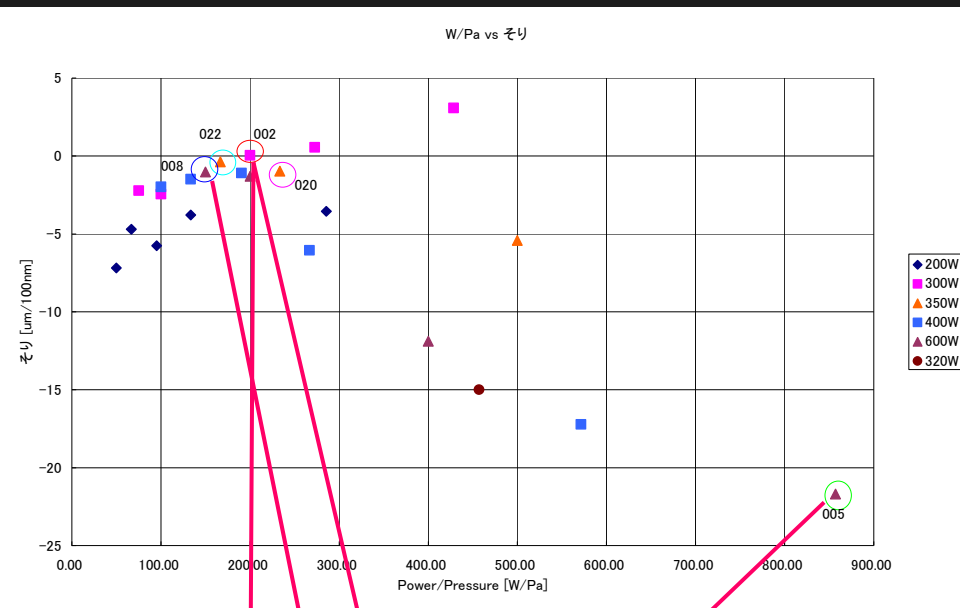
300W, 1.5Pa was good
for Hf deposition

②超伝導転移測定

H.Sato

核断熱消磁冷凍機 (ADR) で Hf 薄膜を冷却し、超伝導転移を観測する

バルク Hf の $T_c = 165\text{mK}$



Hf-STJs: T_c measurement H. Sato

We tried to realize a same T_c as bulk Hf. ➡

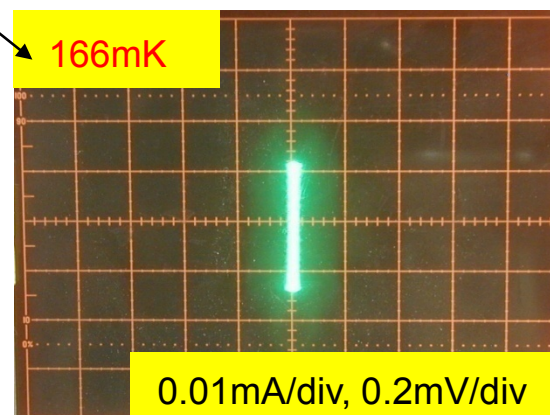
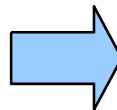
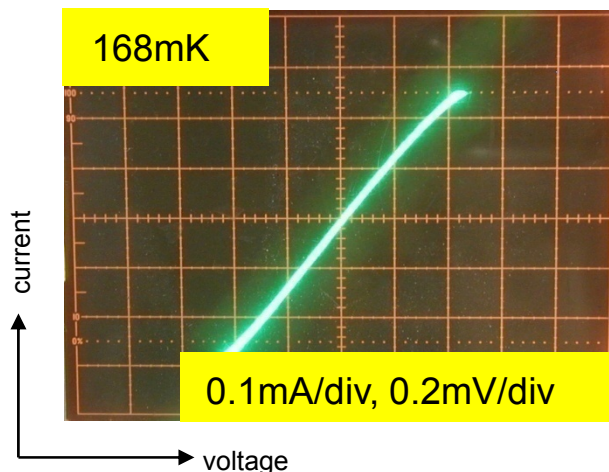
Finally, we found that deposition with substrate heating at 300 deg. was effective.

Power 300W, Ar 1.5Pa, 300 deg. heating

T_c was measured by using ADR.

$T \sim 80\text{mK}$ ➡

Same as T_c of bulk Hf.

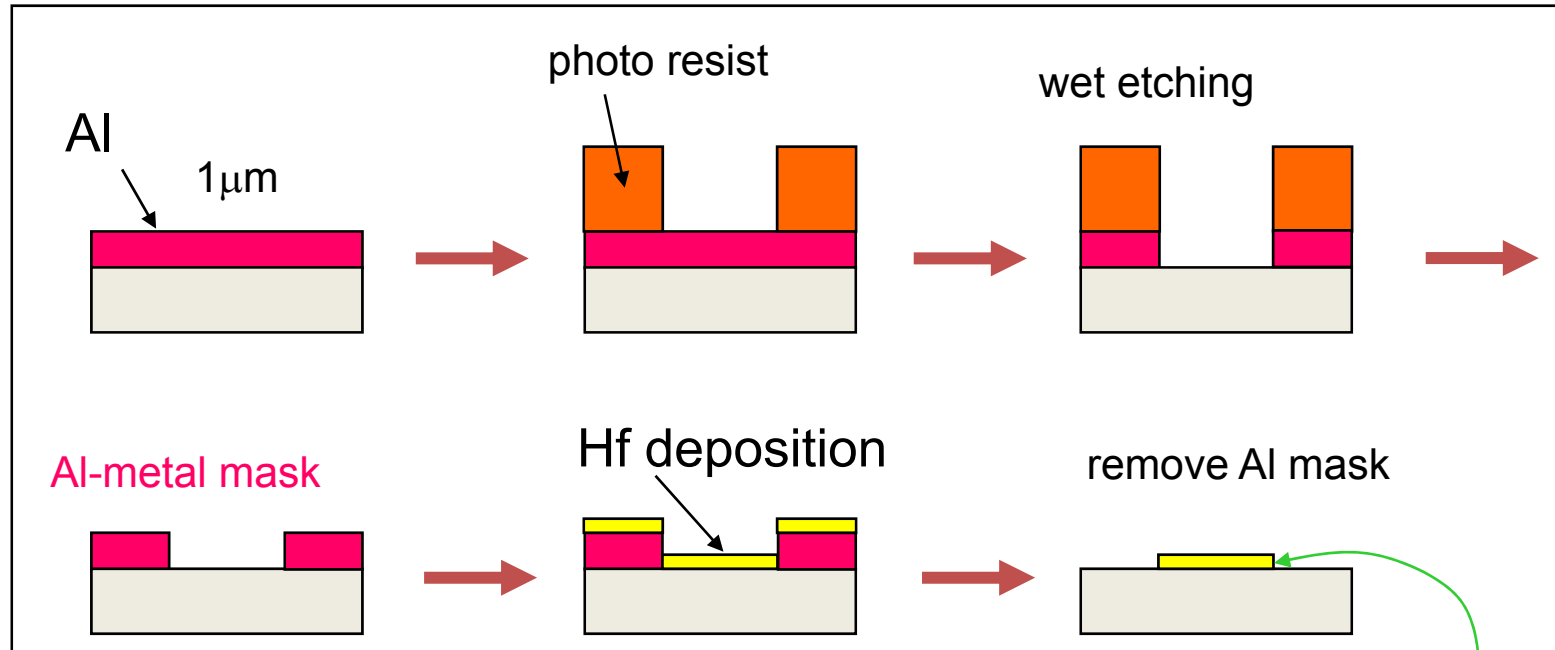


Hf-STJs: Fabrication

Hf was very “hard” to dry-etch with our RIE.



We introduced a lift-off method with Al-metal mask.



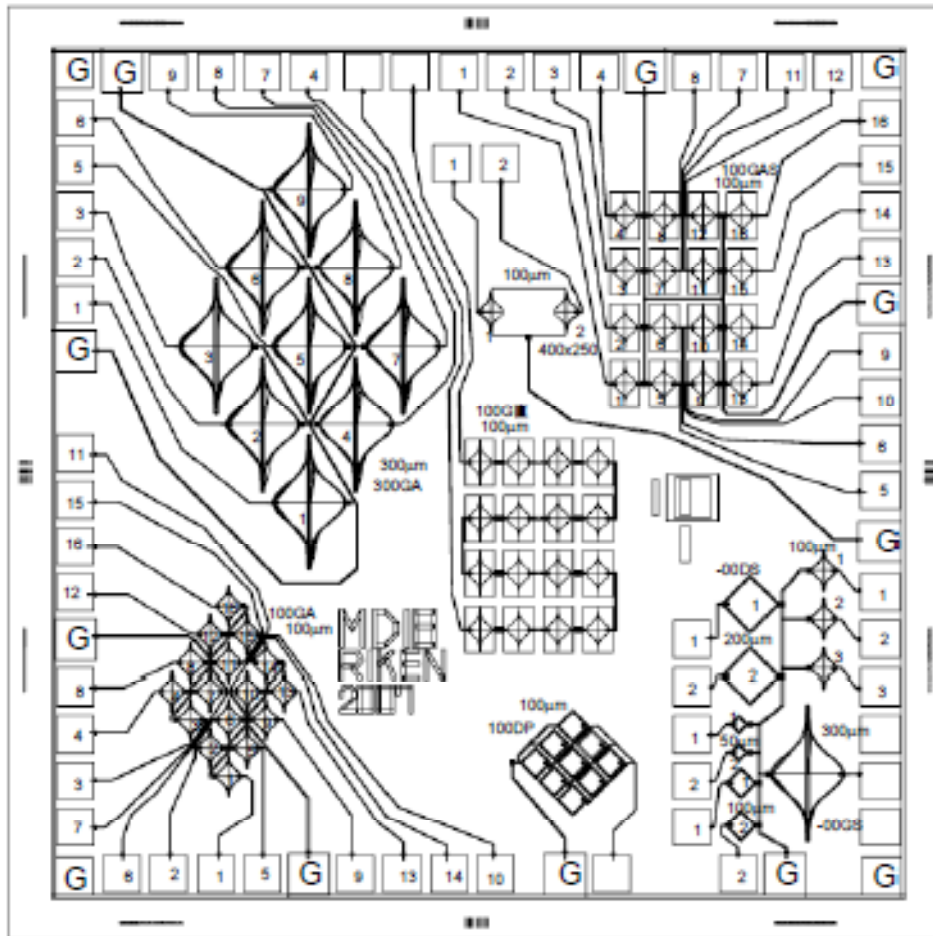
We obtained $T_c=166\text{mK}$ with this fabricated Hf.

Now we are ready to make Hf-STJs.

X線用Ta/Al-STJ試作

Ta: ADRを使わずミリ波照射が可能な転移温度

製膜条件は既知

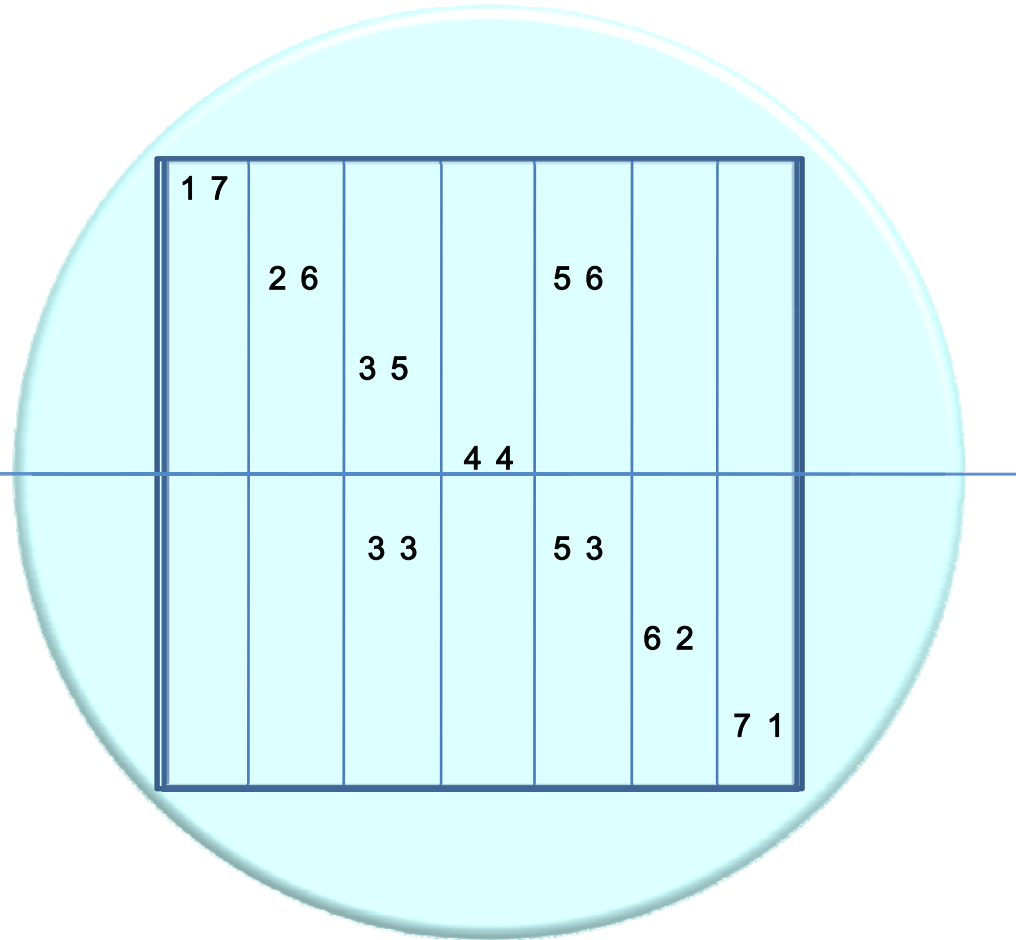


| | | |
|---------|--------------------------------|-------------------------|
| S | Ta | 200 nm |
| | Nb | 10 nm |
| | Al | 25 nm |
| I | AlO _x | 20 Torr, 38 分 → 13TorrH |
| S | Al | 25nm |
| | Ta | 200 nm |
| | Nb | 10 nm |
| | Al ₂ O ₃ | 100 nm |
| サファイア基板 | | |

Nbを敷かないとTaを
スパッターできない

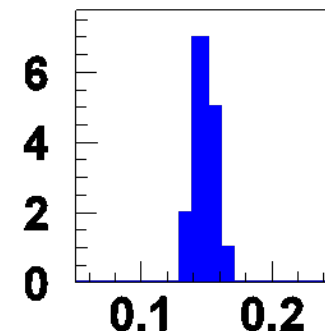
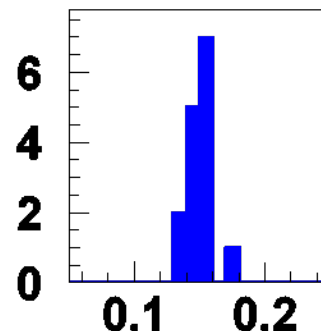
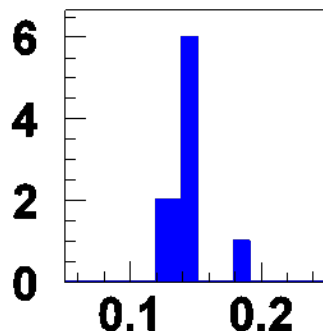
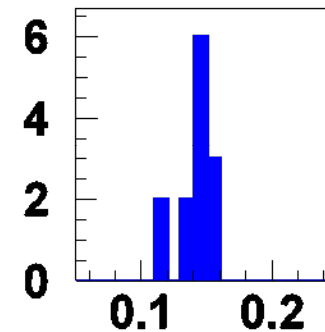
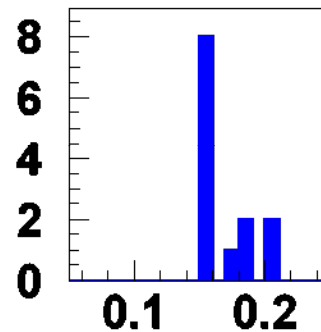
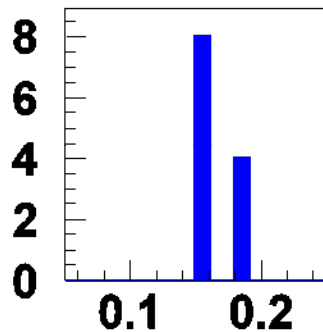
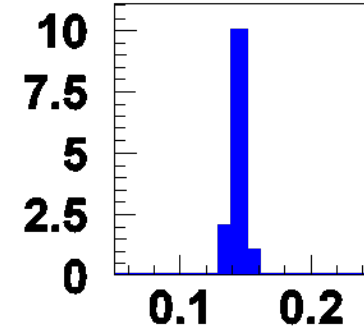
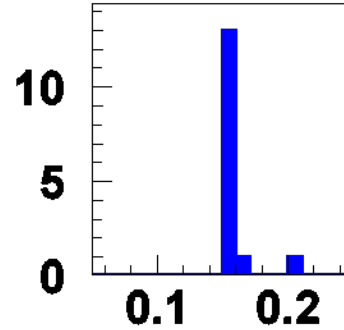
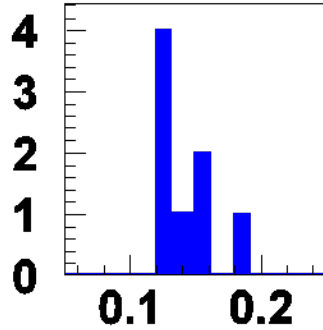
1. 7KでIVカーブ測定をしたチップ

9チップについて、
各チップでSTJ15個
のIVカーブを測定



チップごととSTJの単位面積あたりの電流

顕著な場所
依存性は見
られなかった。



100GS-3

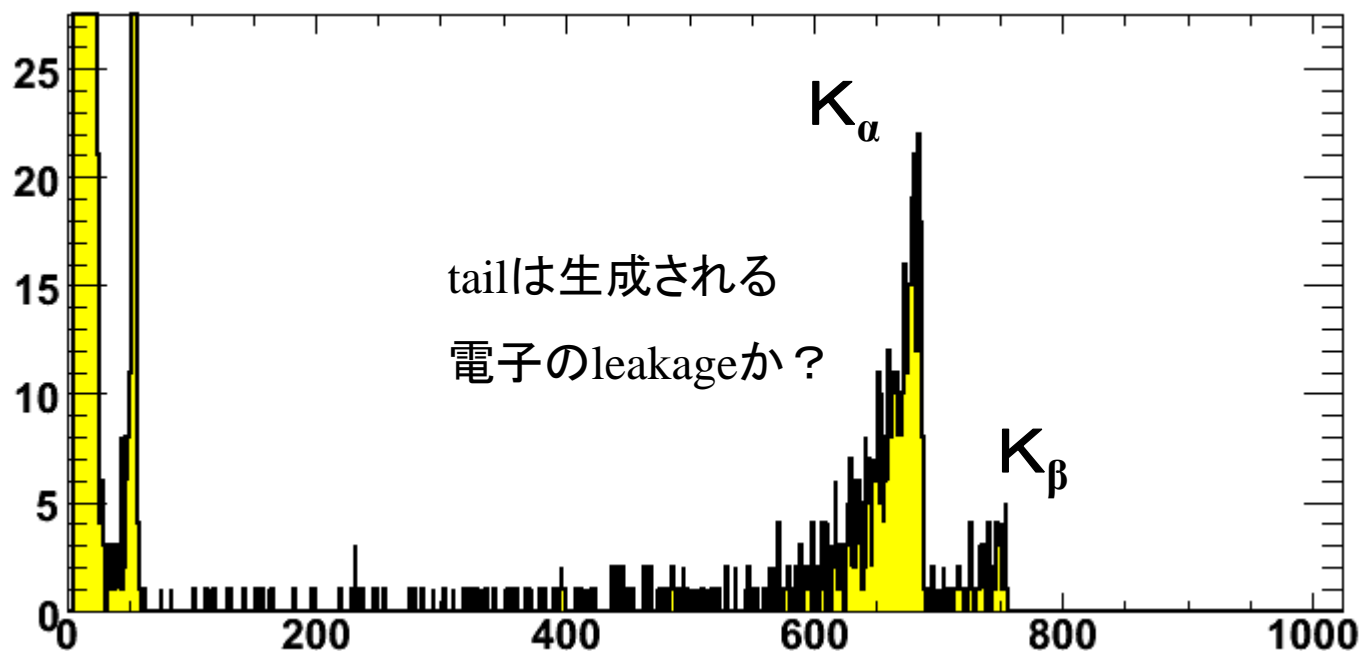
preamp out 1 V

$I_B = 0.166 \text{ A}$

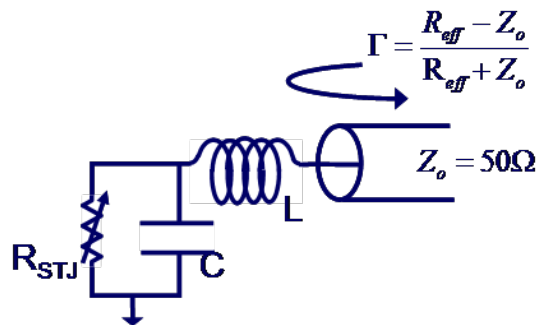
$V_B = -4.89 \text{ V}$

raw signal

shaper output



- 多チャンネル化：周波数ドメイン読み出し

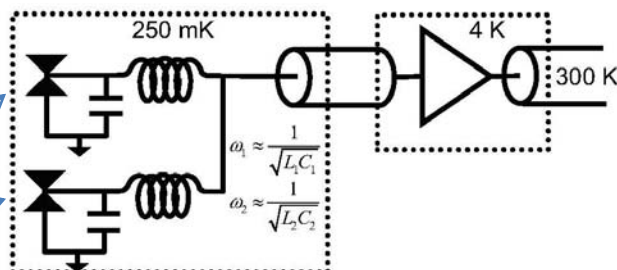


$$R_{\text{eff}} = L / R_{\text{STJ}} C \quad \omega_o = 1 / \sqrt{LC}$$

ごく最近Yale大学がRF-STJによる周波数ドメイン読み出しを提唱

IEE Trans. Appl. Superconductivity Vo.17 p.241 (2007)
STJ多チャンネル化へのブレークスルーとなる可能性あり。

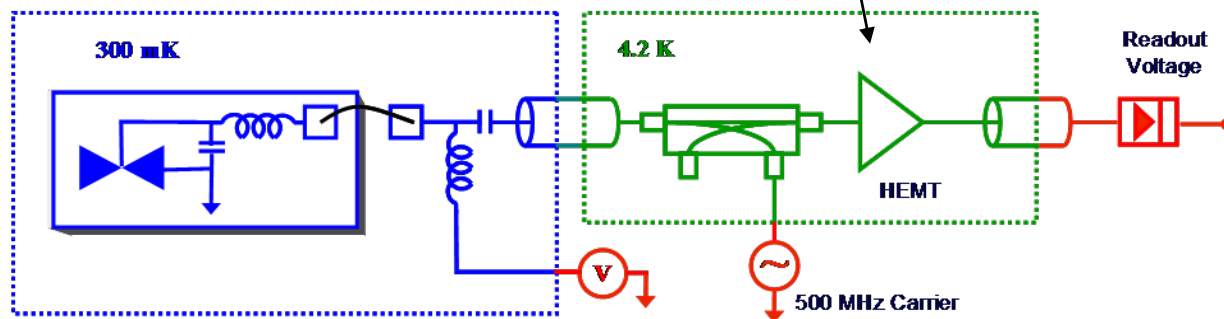
アンテナ結合
STJ



周波数ドメインの
多重化
(ラジオみたい)

この部分は市販品で出来るようになる！

KEK大学支援事業
岡山大とKEKで
開発



KEKでの装置整備

大実験室クリーンルーム



- 場所: 先端計測実験棟大実験室
 - 昨年まで冷中性子実験棟と呼ばれた建物
- 特長: 300m²の大型クリーンルーム
- 目的: 精密機器、大型機器を設置、共用することにより、従来より高いレベルの測定器開発を効率よくおこなう。
 - スパッタ装置、エッチング装置、蒸着装置、アライナー、顕微鏡、プローバー、ワイヤーボンダーなど

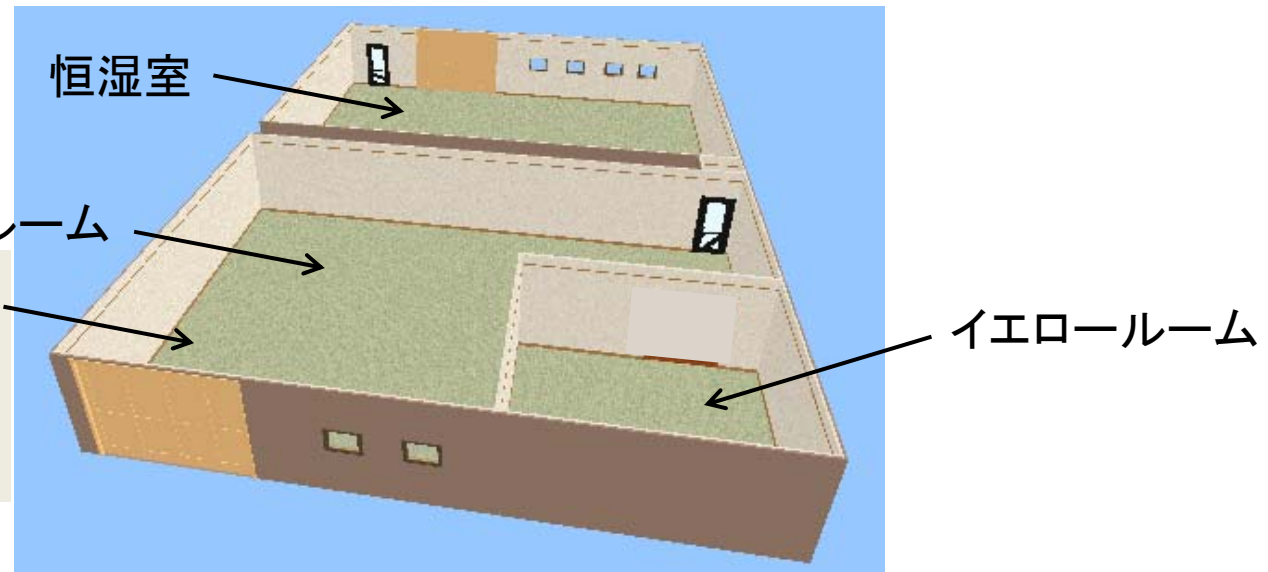


2008/12/22

クリーンルーム仕様

- JIS規格に準拠したクリーンルーム
- 落札業者: エクセルインターナショナル
- 3つの部屋
 - 10m x 15mの恒湿室(クラス10万)
 - 普段着でOK、ワイヤーボンダー、プローバーなどを装備し、多目的に使用
 - 10m x 15mのクリーンルーム(クラス10000と1000)
 - クラス1000の部分は現像用イエロールーム(6m x 4m)

10月に理研から
超伝導薄膜作製
装置群を移設



理研からの移設した装置の現状



恒湿室

- 窒素、圧縮空気の配管終了(クリーンルームともに)
- ダイシングソー導入のための配管終了



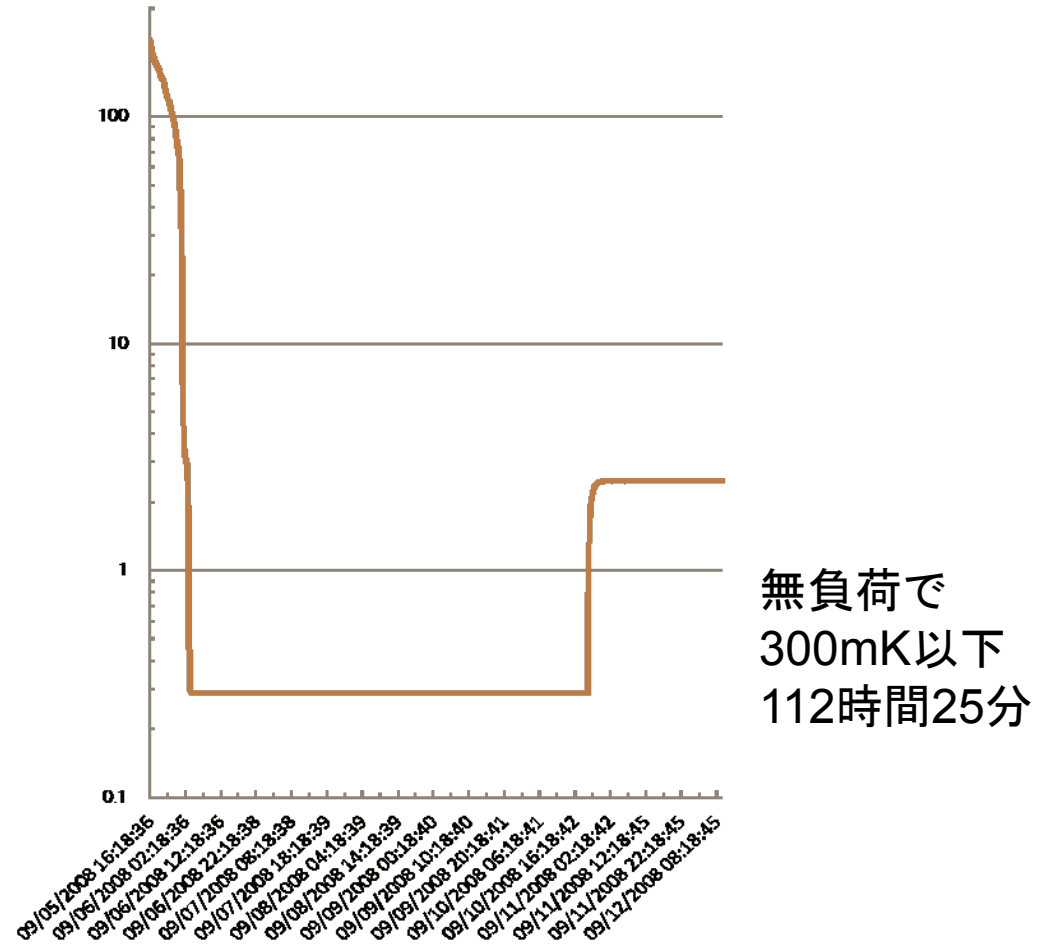
常設ワイヤーボンダーなど



東北大グループ

0.3K全自動無冷媒冷凍機@KEK

- 昨年度末納入後、様々な不具合を克服して、仕様の性能を達成



0.3KでのI-Vテストは今年度中にKEKで出来るようになる予定

希釈冷凍機@超伝導低温工学センター

- 1990年頃購入されたOxfordの希釈冷凍機(実験終了後倉庫で眠っていた)を発掘
- 低温センターに極低温応用の装置を持つことは意義深い

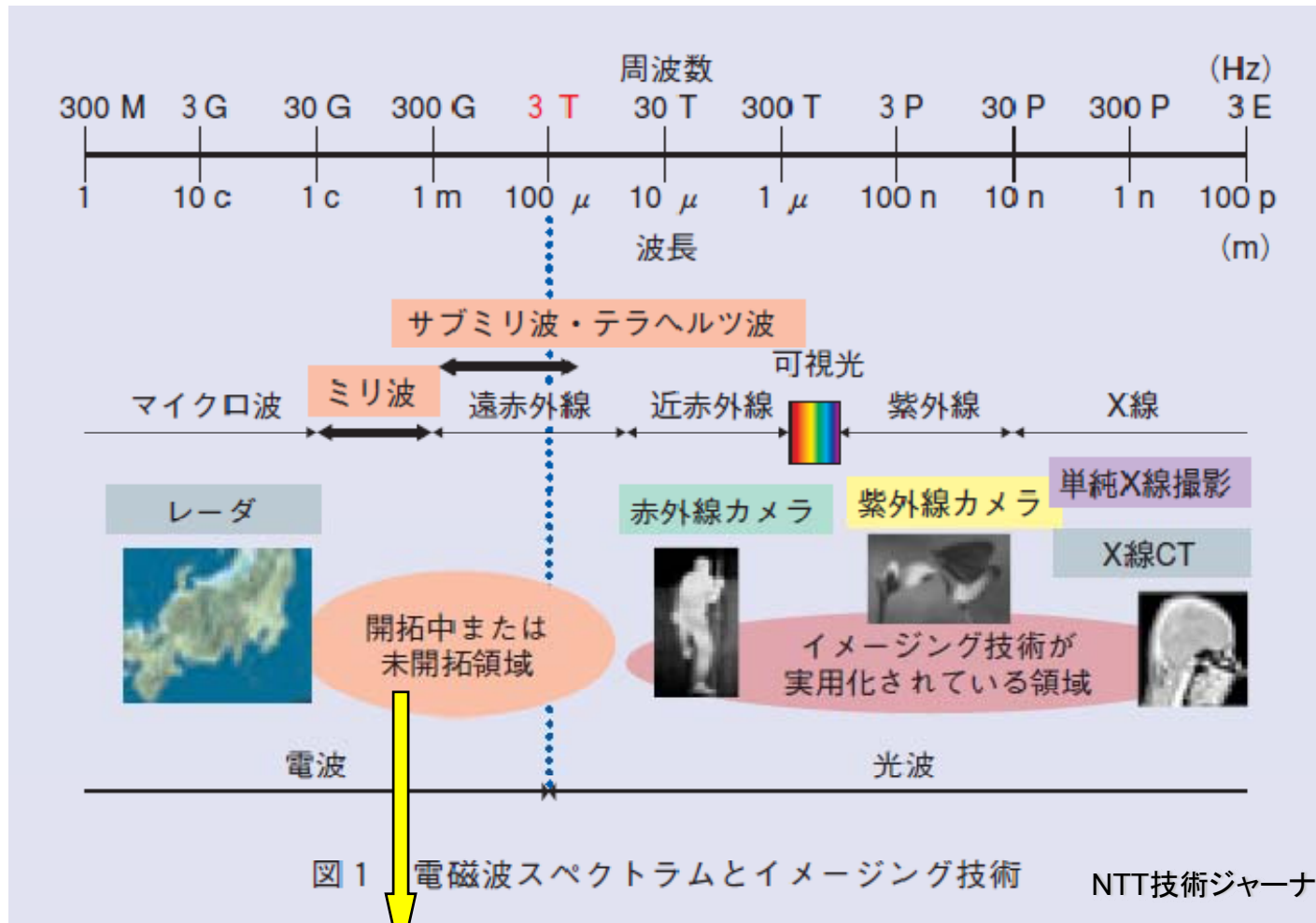
Dilution Refrigeratorを復活 • Pump取付、配管復元続行中。TMP周囲はほぼ終わり。
200 μ W at 100mK



今後

- 真空リークテスト
- インターロックのチェック
- TMP, RP到達度
- 冷却対象
 - 目的、要求温度、安定性
 - サイズ、信号入出力

STJの応用



高い透過力(プラスチック、壁、紙、衣服、煙、霧などを透過)と
マイクロ波より高い分解能 → 幅広い応用が可能、かつ未開拓！

研究会

- **日時** : 2009年2月20日、21日
- **場所** : KEK
- **テーマ** : 超伝導検出器と関連技術について
 - STJ、TES、その他のミリ波、テラヘルツ検出など
 - 現在のR&Dの進行状況、レクチャー、新しい応用について(アクション探索、質量分析etc.)
- **世話人** : 羽澄(KEK)、石野(岡山)、大島、関本(国立天文台)、松原(JAXA)