

COBAND実験におけるHf-STJ開発

CiRfSE 素粒子構造部門

武政 健一

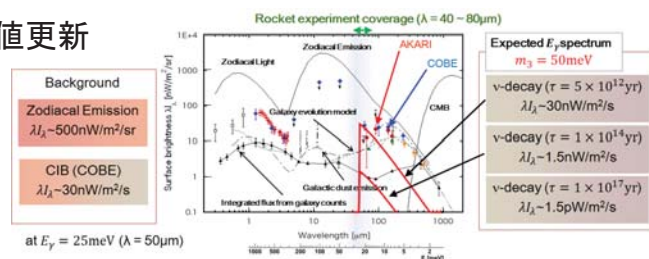
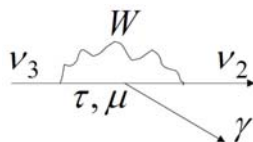
CiRfSEワークショップ20170124

1

COBAND実験

• COBAND実験概要

- 宇宙赤外線背景輻射のエネルギー分布を測定し、その中から宇宙背景ニュートリノ崩壊事象を探す。
 - 宇宙背景ニュートリノの発見
 - ニュートリノ質量の決定 or 寿命の下限値更新



• 衛星実験

- 人工衛星にて100日間のデータ収集(2020年以降)
- $\tau(\nu_3) \sim 10^{17}$ 年の感度
- 望遠鏡: 直径20cm, 視野: 0.1°
- 検出器: Hf-STJ ($E_\gamma \sim 25$ meVを分解能2%以下で測定できる必要がある)

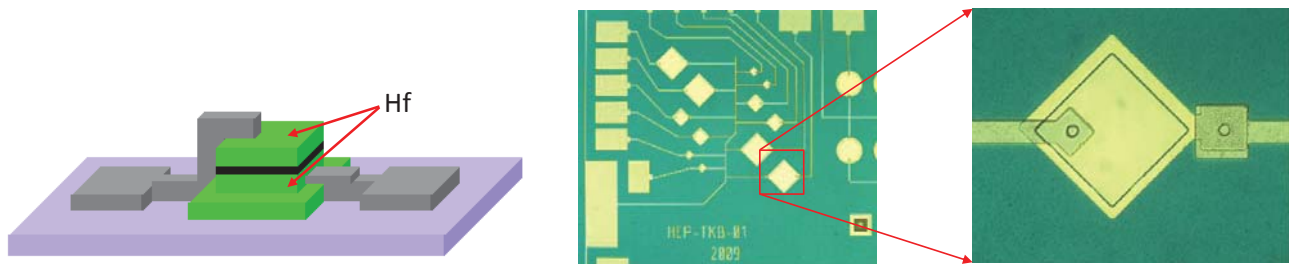


CiRfSEワークショップ20170124

2

Superconducting Tunnel Junction (STJ)

- ・ 超伝導体を用いた光検出器
- ・ キャリア生成に必要なエネルギーが小さいため、エネルギー分解能に優れる
- ・ 構造
 - ・ 超伝導体/絶縁膜(トンネルバリア)/超伝導体という構造のジョセフソン素子
 - ・ 大きさ: 縦横 数10~数100 μm 角 × 高さ 数100nm
 - ・ 絶縁膜は厚さ数nm程度

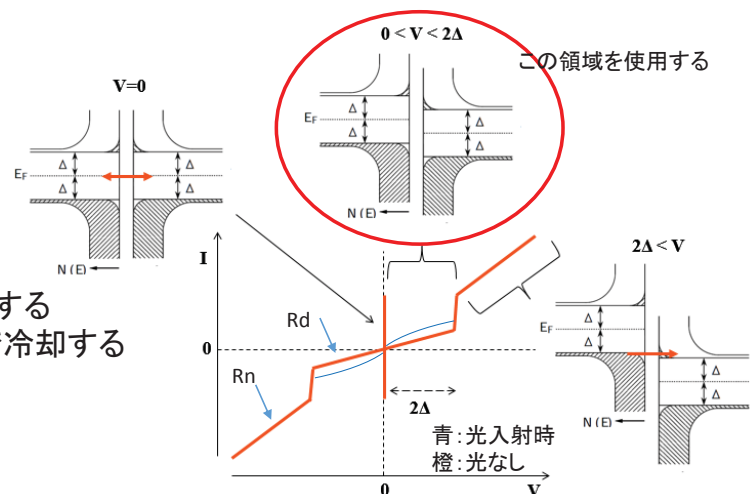


3

STJのIV特性・動作原理

動作時には、

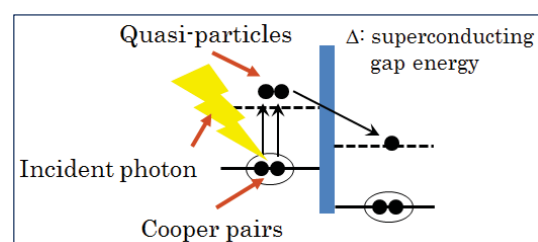
- ・ 絶縁膜に平行に磁場をかけ、ジョセフソン電流を抑制する
- ・ 熱励起による漏れ電流を抑制するため、 $T_c/10$ 程度まで冷却する
- ・ 上下電極に $0 < V < 2\Delta$ の電圧をかける



光検出器としての動作原理

- ・ 光が入射し、超伝導体中で光電効果で吸収される
 - ・ クーパー対の乖離やフォノン生成が起こり、入射光のエネルギーに対応した数の準粒子が励起される。
 - ・ 励起された準粒子がトンネルしてもう一方の超伝導体へ移動し電流として観測される。
- 電流を測ることで入射光のエネルギーを測定できる

Δ : 超伝導体のエネルギーバンドギャップ



4

Hf-STJのエネルギー分解能

・ STJのエネルギー分解能

$$\sigma_E = \sqrt{(1.7\Delta)FE}$$

Δ: エネルギーバンドギャップ
F: ファノ因子
E: 入射光子のエネルギー
Tc: 超伝導転移温度

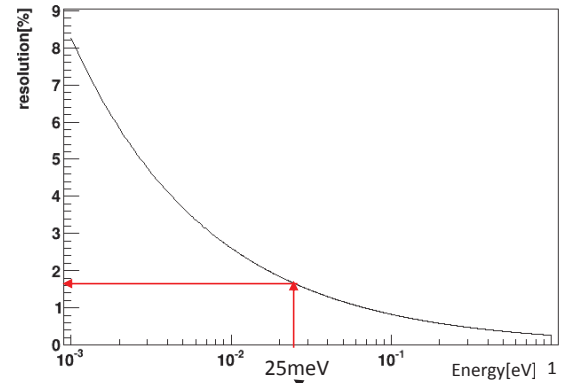
- Δが小さいほど準粒子の生成数が大きくなり、エネルギー分解能が良い。

Material	Tc(K)	Δ(meV)
Si	—	1200
Niobium	9.20	1.550
Aluminum	1.14	0.172
Hafnium	0.16	0.021



- $N_{q.p.} = 25\text{meV}/1.7\Delta = 700$ (Nbの場合は9個)
- ファノ因子にNbと同じ0.2を仮定すると2%のエネルギー分解能を達成できる。
- 漏れ電流への要求値: $R_d > 2\text{M}\Omega$ (信号幅1 μs の場合)

Expected energy resolution of Hf-STJ



Expected photon energy of neutrino decay

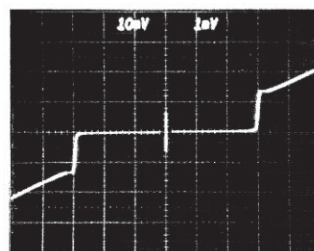
なぜHfなのか

- ・ $\Delta < 0.29\text{meV}$ の超伝導体であれば、エネルギー分解能の要求は満たす
 - ・ $\sigma_E = \sqrt{(1.7\Delta)F\varepsilon}$
- ・ STJは熱ノイズを抑制するため、超伝導転移温度の1/10以下に冷却する
 - **Tcの大きいものが取り扱いやすい。**
 - ただし、 $2\Delta = 3.5k_B T_c$ (BSC theory)。

Material	Tc[K]	Δ[meV]
Nb	9.29	1.55
Pb	7.2	1.365
Ta	4.48	0.7
Sn	3.7	0.575
Al	1.18	0.172
Ti	0.39	0.058
Hf	0.165	0.021
Ir	0.099	0.014
Be	0.023	0.0034
W	0.016	0.0025
Rh	0.002	0.0003

エネルギー分解能を満たす

HfはΔの要求を満たしつつ、高いTcを持っている。
また、**HfOxがSTJの絶縁膜として用いられた実績**がある。

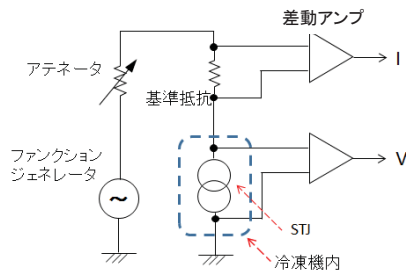


←Nb/HfOx-Hf/Nb STJのIV特性(200 μm 角)
Nb/HfOx/Hf/Nb = 200nm/?/3nm/200nm

High-quality Nb/HfOx-Hf/Nb Josephson junction,
Appl.Phys. Lett, Vol.60, No.24, 15 June 1992, S.Morohashi et.al.

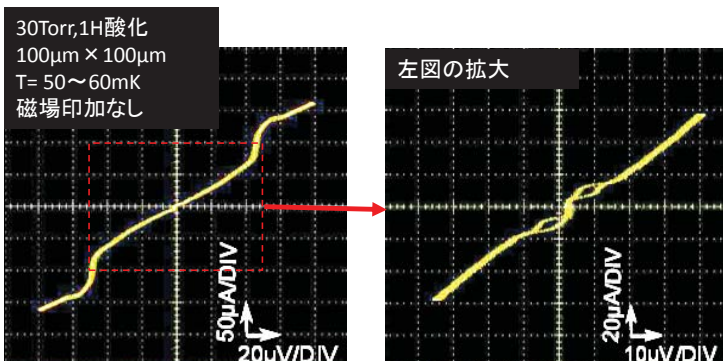
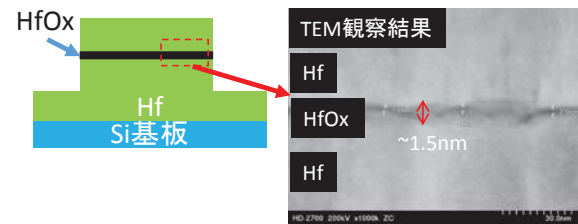
Hf-STJの作成・評価環境

- 高エネルギー加速器研究機構(KEK)のクリーンルームにて作成
 - マグネトロンスパッタによるHf薄膜形成
 - フトリソグラフィとドライエッチングによる微細加工
 - 酸素雰囲気中での酸化による絶縁膜形成
- 希釈冷凍機@筑波大学にて冷却試験を実施
 - 120mK程度に冷却し、四端子法で素子のIV特性・光応答評価を行っている。

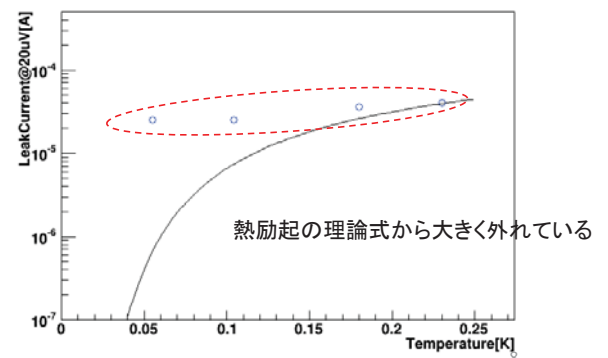


従来のHf-STJ素子

- **Pure Hf素子**: Hfのみで製作したサンプル(100 μ m角)
 - Hf/HfOx/Hf = 250nm/ 1.5nm(熱酸化30Torr,1H)/300nm
- 絶縁膜(HfOx)が1.5nm程度できているが、漏れ電流が大きい
- 絶縁膜に欠陥があると考えられるため、HfOxの品質改善が必要



従来のHf-STJ素子の漏れ電流温度依存性



薄いAl層を追加したサンプル

- 漏れ電流の抑制のため、構造を見直し絶縁膜と上部Hf層の間にAl層を追加

この点を図3によって説明する。図3は、ジョセフソン接合での接合部の厚みの違いによる“接合部を介した電流-電圧依存性 (I-V特性)”を示したものである。さて、前記接合部の厚みが厚すぎる場合は、図3(a)に示すように超電導電流が流れることはできない。そして、接合部の厚みが適当な場合は、図3(b)に示すように、臨界電流値 I_c の範囲内で電圧が発生せずに超電導電流は接合をトンネルすることができる。なお、臨界電流値 I_c を超えた電流を流すと急速電圧が発生する。ここで、電圧が発生した状態でのI-V特性は原点を通る直線に漸近する。このジョセフソン接合に特徴的なI-V特性は“RSJ (Resistively Shunted Junction) 特性”と呼ばれる。

これに対して、接合部の厚みが薄すぎて短絡している場合は、臨界電流値 I_c 以上の電流にて徐々に電圧が発生する“図3(c)のようなI-V特性”となる。この状態にあると磁束が動き出すことによって電圧が誘起されることから、“FF (Flux Flow) 的I-V特性”と呼ばれる。図2で示した例のように上下の電極材料が同じ超電導体である場合は、両者の馴染みが非常に良いため、上部電極の作製条件が下部電極のそれに近いと往々にしてところどころ上下の電極材料が接合部を貫いて短絡し、I-V特性はFF的な特性になりやすい。

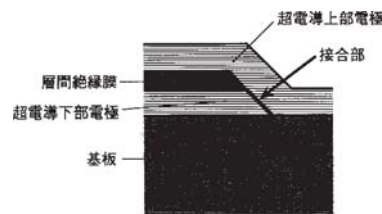
この点を踏まれば、上下の電極材料に異なる組成の超電導体を用いて両者の馴染みを悪くすることにより、接合部のI-V特性をFF的になり難くすることができると考えられる。即ち、上下の超電導電極に組成の異なる超電導体を用いると、高温超電導体の主たる伝導パスであるCuO2面のc軸方向の間隔も異なるので、図4に示すように接合部において上下双方の超電導体のCuO2面がつながり難くなって接合部のI-V特性はFF的な特性になり難くなる筈である。

- ランプエッジ型ジョセフソン接合素子及びその製造方法

- 特開2003-069094 (P2003-69094A)
- 上下で異なる超伝導体を用いることで漏れ電流が減る

- これを参考に...

- ただし、作成装置の都合上AlかNbしか使えない
- Al/Nbを厚く積むとHfの Δ に影響がでる。
- 絶縁膜直上に薄くAl/Nbを成膜する。

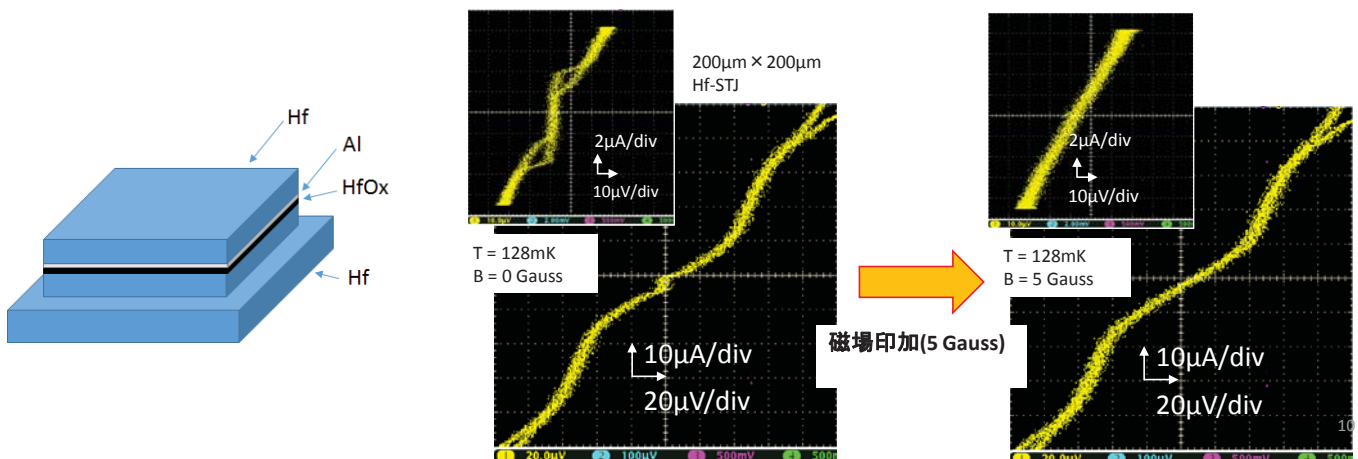


Structure of ramp-edge Josephson junction

薄いAl層を追加したサンプル

- 漏れ電流の抑制のため、構造を見直し絶縁膜と上部Hf層の間にAl層を追加(10nm)

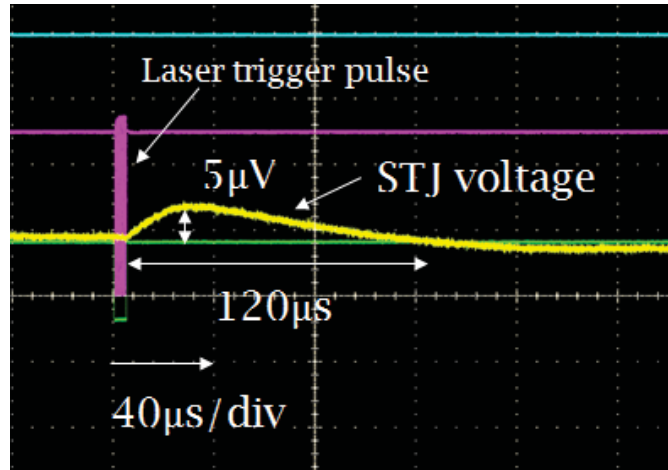
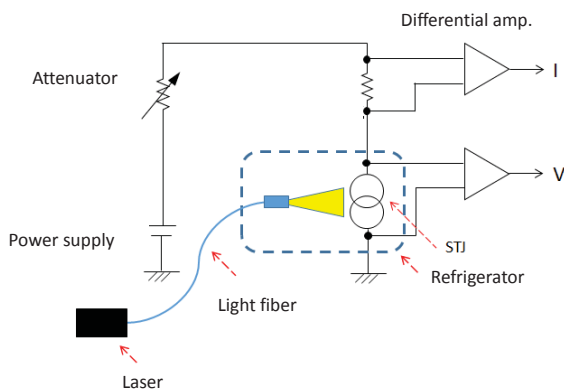
- ジョセフソン電流を観測。磁場で抑制されることを確認。
- $\Delta = 20 \sim 25 \mu\text{eV}$ ($\sim \Delta_{\text{Hf}}$)
- $I_{\text{leak}} @ 20 \mu\text{eV} = 5 \mu\text{A} @ 128 \text{mK}$ (200 μm 角)
 - 漏れ電流がHfのみで作成したサンプルと比較して1/4に減少。(サイズ差を考慮に入れば1/16)
 - 改善はしたが、いまだに要求値は達成していない。(要求 $I_{\text{leak}} @ 20 \mu\text{eV} = 30 \text{pA} @ 120 \text{mK}$)



Al層を追加したHf-STJ 光応答試験

パルス光に対する応答

- 波長465nm laser
- 100ms毎に5μs間5MHz(25回)の発振



実験に用いるには漏れ電流が大きすぎるが、光検出器としての動作している。

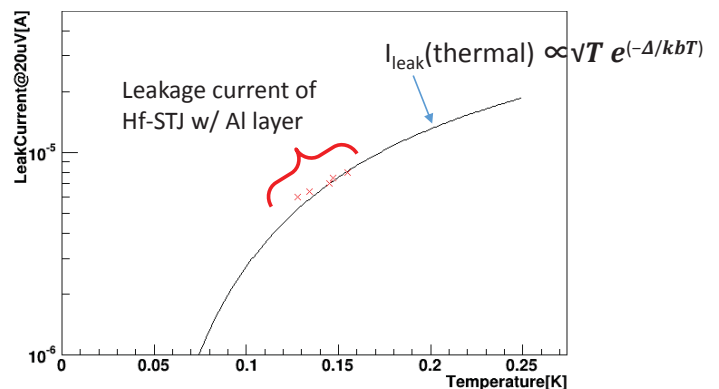
11

光検出器として動作するサンプルを作成できたが、漏れ電流が大きく改善が必要。

漏れ電流の原因として考えられること

- 熱励起
 - $I_{\text{leak}}(\text{thermal}) \propto \sqrt{T} e^{(-\Delta/kbT)}$
- 絶縁膜の欠陥
 - 酸化が不十分
 - 酸化膜が不均一
 - 作成・評価の工程で負荷が掛かり破損

Al層を追加したHf-STJの漏れ電流温度依存性



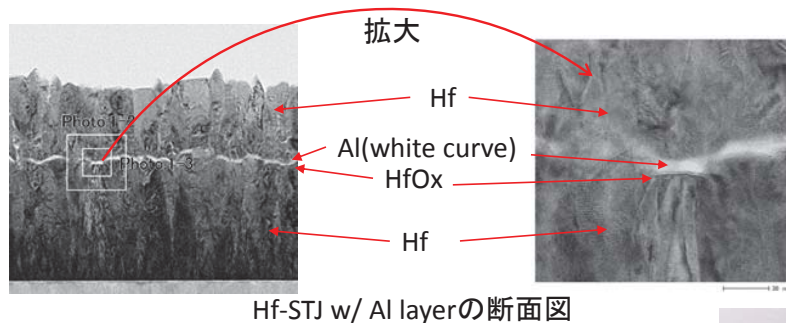
- Al層を追加したHf-STJの漏れ電流の温度依存性は、熱励起による漏れ電流の理論式からずれている。
- → 構造的な問題が疑わしい。

酸化不足

- 現在の酸化条件(熱酸化条件30Torr, 1H)は、Hf酸化膜の作成事例と比較して十分強い
 - Ex. 30Pa (=0.23Torr), 30min, Nb/HfOx-Hf/Nb-STJ
- これまでと異なる酸化膜の作成方法を試してみる。
- プラズマ酸化
 - 酸素をプラズマ化してHf表面にぶつける。
 - 熱酸化からプラズマ酸化にすることでジョセフソン素子の漏れ電流が抑制された報告あり。
 - これまで装置の故障で試せなかったが、修理されたので近日中にテストする予定。

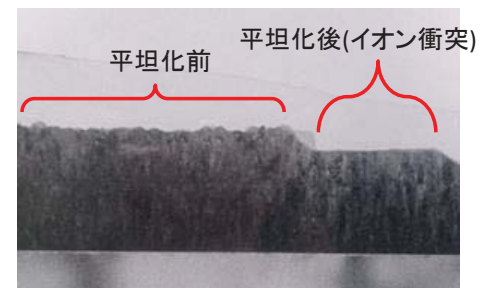
Hf表面粗さ

- Hf-STJの断面観察を行ったところ、下部Hfの凹凸が非常に大きくなっていた。
 - 酸化膜が不均一になる可能性
 - 作成過程で局所的に負荷がかかる可能性



• Hf薄膜の平坦化

- 成膜条件を変更することで平坦な膜の作成は可能。
- ただし、内部応力が強くなる傾向があり応力開放による絶縁膜の破損が起こりやすくなる。
- 応力が弱く表面が粗い薄膜を形成して、表面をイオン衝突で平坦化することで、応力と滑らかさを両立する方法をテスト中。

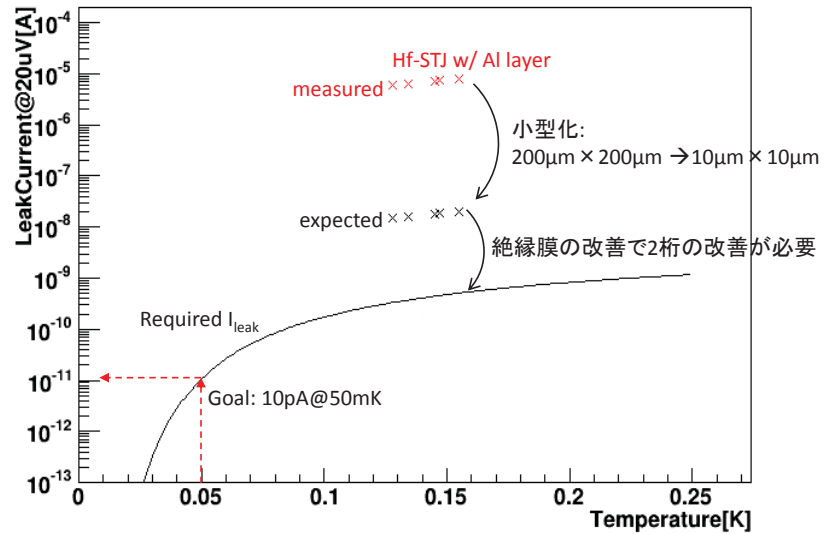


小型化

- 素子の小型化による漏れ電流の抑制も実施予定。
- 現在評価している素子は200 μm 角。
- 10 μm 角にすることで1/400になることが期待される。

Pure Hf素子の漏れ電流サイズ依存性

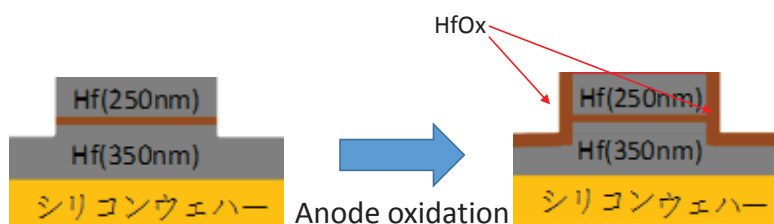
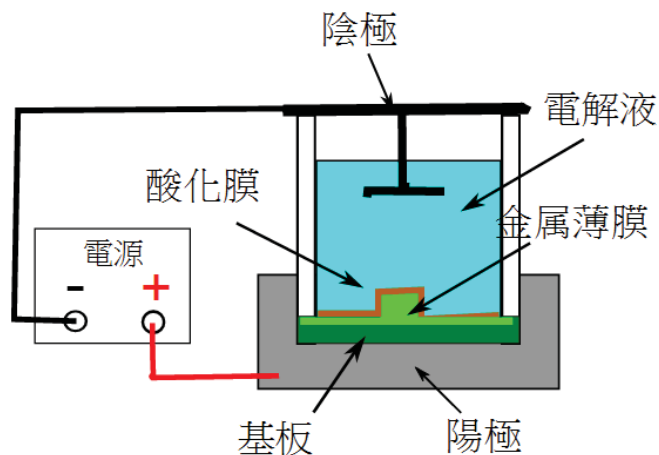
酸化条件	200 μm × 200 μm	100 μm × 100 μm	50 μm × 50 μm
20Torr, 1H	87 μA	42 μA	—
30Torr, 1H	100 μA	24 μA	5 μA



まとめ

- COBAND衛星実験に使用する検出器としてHf-STJの開発を行っている。
- Hf-STJにAl層を追加することで漏れ電流を従来の素子の1/4に抑制することに成功。
- Al層を追加したHf-STJ素子で可視光応答を確認。
- 光検出器として動作するHf-STJを作成できたが、漏れ電流は要求値より非常に大きい。
- プラズマ酸化による絶縁膜の作成、薄膜表面の平坦化などによる漏れ電流の改善を試行中。

陽極酸化



薄いAl層を追加したサンプル1

- ・ 漏れ電流の抑制のため、構造を見直し絶縁膜と上部Hf層の間にAl層を追加(10nm)
 - $I_{leak}@20\mu eV = 60nA@140mK$ (200 μm 角)
 - ジョセフソン電流が観測できない
 - $\Delta = 30\sim 100\mu eV$. ← Alの近接効果
- 漏れ電流は改善されたが...
 - 信号も通しにくい
 - Δ が大きくなっている → エネルギー分解能の悪化

