

COBAND実験のための Hf-STJの研究開発Ⅲ

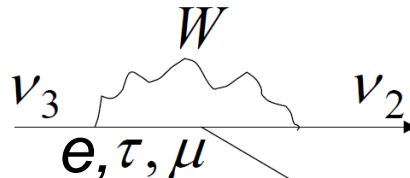
武政健一, 金信弘, 武内勇司, 飯田崇史, 永田和樹, 浅野千紗, 若狭玲那, 笠島誠嘉, 菅野洋信,
大塚洋一, 美馬寛^A, 新井康夫^B, 倉知郁生^B, 羽澄昌史^B, 石野宏和^C, 樹林敦子^C, 吉田拓生^D,
坂井誠^D, 中村昴弘^D, 西村航^D, 加藤幸弘^E, 池田博一^F, 和田武彦^F, 長勢晃一^F, 松浦周二^G,
川人祥二^H, 志岐成友^I, 浮辺雅宏^I, 藤井剛^I, 大久保雅隆^I,
Erik Ramberg^J, Paul Rubinov^J, Dmitri Sergatskov^J, Soo-Bong Kim^K, 木内健司^L

筑波大, 理研^A, KEK^B, 岡山大^C, 福井大^D, 近畿大^E, JAXA^F, 関西学院大^G,
静岡大^H, AIST^I, Fermilab^J, Seoul Nat'l. Univ.^K, 東大^L

COBAND(COsmic BACkground Neutrino Decay search)実験

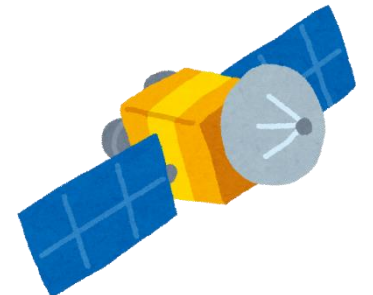
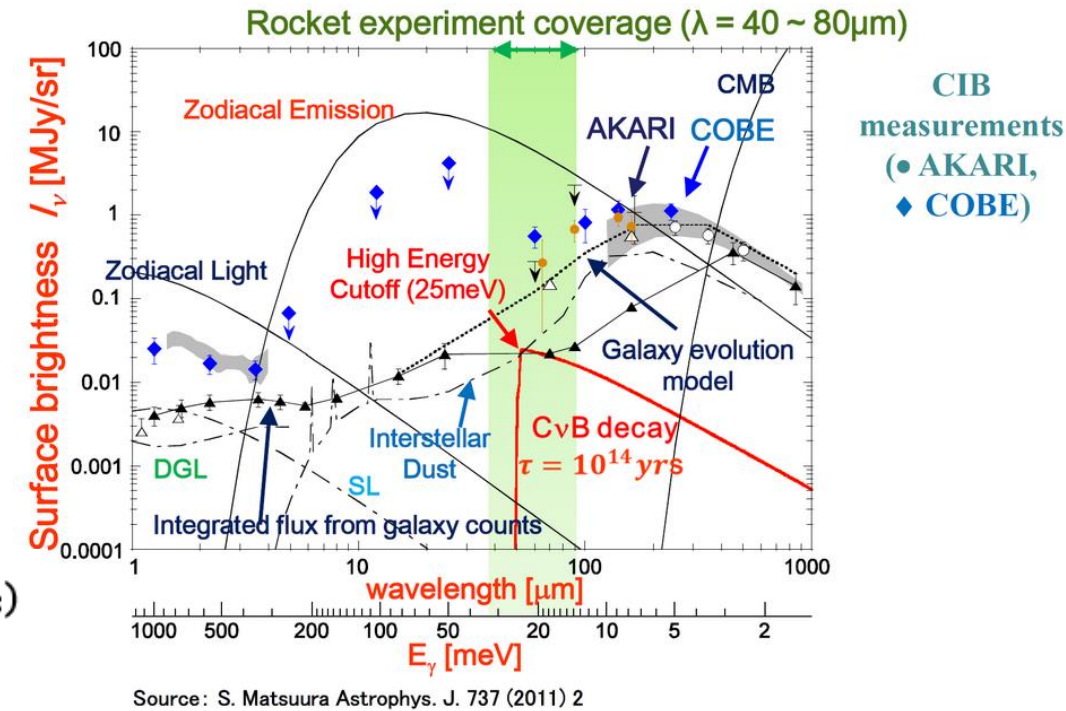
COBAND実験

- 超伝導検出器を乗せたロケット/衛星を打ち上げ、宇宙赤外線の遠赤外領域($E_\gamma \sim$ 数10meV)のエネルギー分布を測定する。
- そこに含まれる宇宙背景ニュートリノの崩壊事象を見つけ出す。
 - 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


$$E_\gamma = \frac{\Delta m_{32}^2}{m_3} \sim 25 \text{ meV} \text{ (}\nu_3 \text{ 静止系)}$$

COBAND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 (標準模型で $\tau(\nu_3) \sim 10^{43}$ 年, LR対称模型で $\tau(\nu_3) \sim 10^{17}$ 年)
- 望遠鏡: 直径20cm, 視野: 0.1°
- 検出器: Hf-STJ ($E_\gamma \sim 25 \text{ meV}$ を分解能2%以下で連続的に測定できる必要がある)



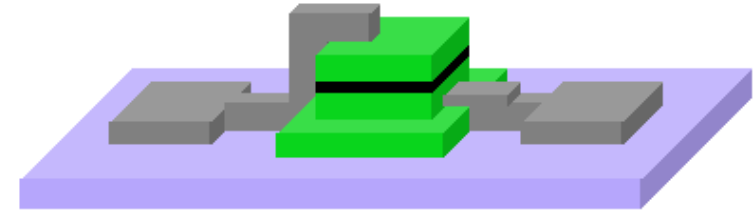
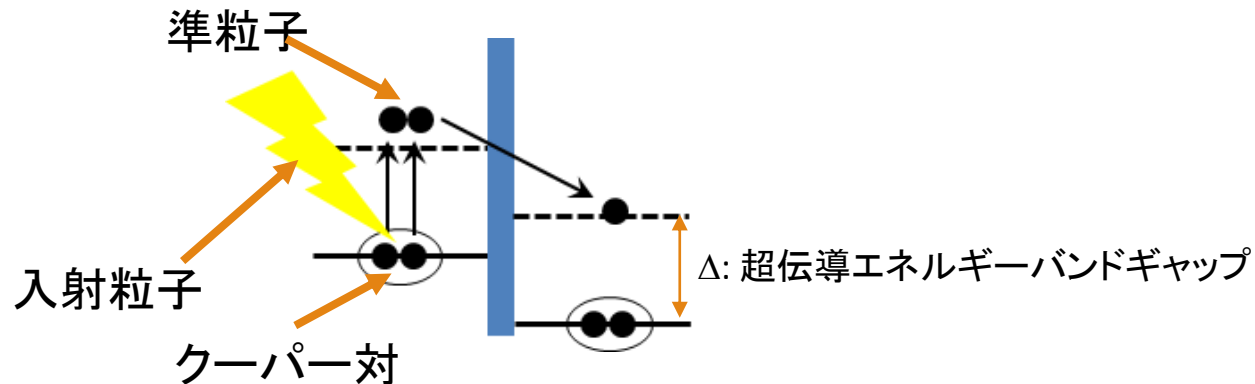
STJ (Superconducting Tunnel Junction) Detector

概要

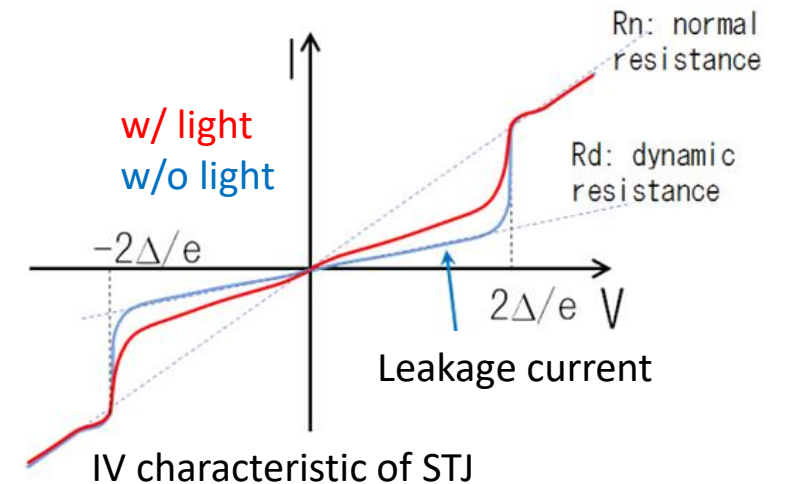
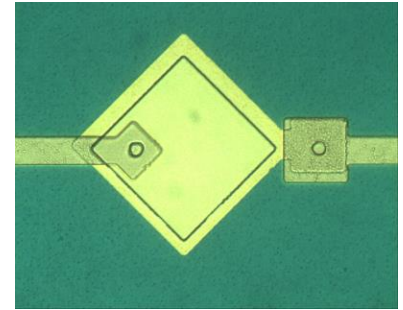
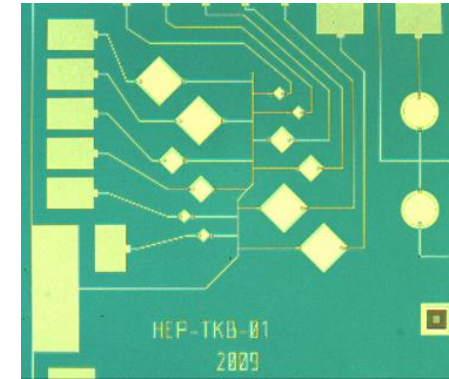
- 超伝導体を用いた光検出器
- キャリア生成に必要なエネルギーが小さく、エネルギー分解能に優れる
- ジョセフソン素子の一種、超伝導体/絶縁膜(~1nm)/超伝導体
- サイズ: 数10~数100 μm 角, 厚み ~500 nm

動作原理

- 入射粒子からエネルギー付与される
- クーパー対破壊で準粒子生成、準粒子 \leftrightarrow フォノン相互転換
- 最終的に入射粒子のエネルギーに対応した数の準粒子が励起される
- 準粒子がトンネル効果で絶縁膜を通り抜け、信号となる



Overhead view of STJ detector



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

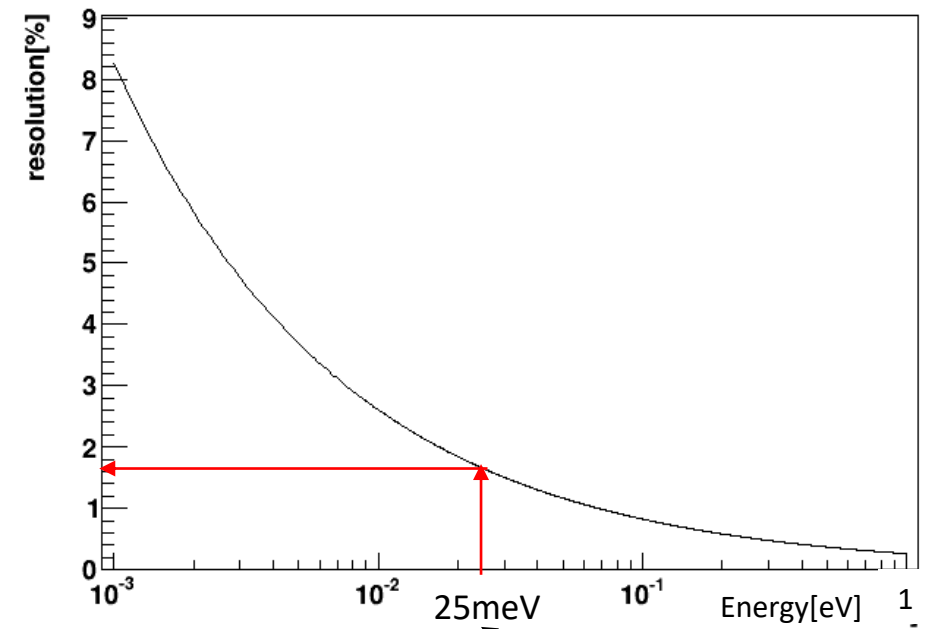
- Δ が小さいほど準粒子の生成数が大きくなり、エネルギー分解能が良い。

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
- 漏れ電流の要求値: 10pA (信号幅1 μ sの場合)

Expected energy resolution of Hf-STJ



Expected photon energy of neutrino decay

開発環境

作成:

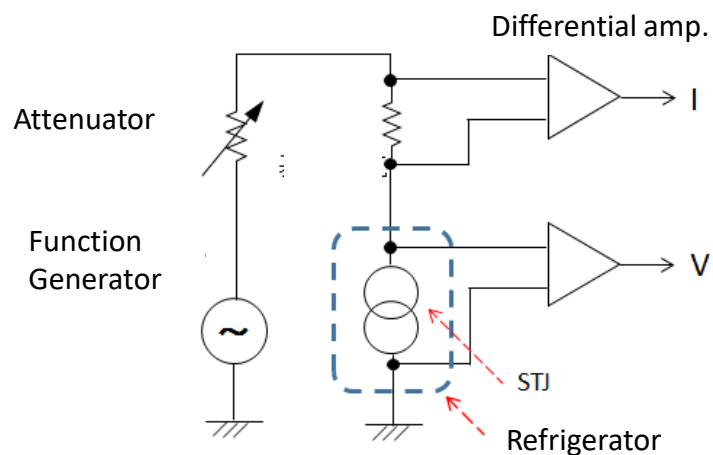
KEK所有のクリーンルームにて作成

- マグネトロンスパッタ装置を用いた薄膜形成
- フトリソグラフィによるパターニング
- ICP-RIEを用いたドライエッチング
- 熱酸化による絶縁膜形成

評価:

希釈冷凍機を用いて $\sim 140\text{mK}$ に冷却

4端子法を用いてIV特性、光応答を測定



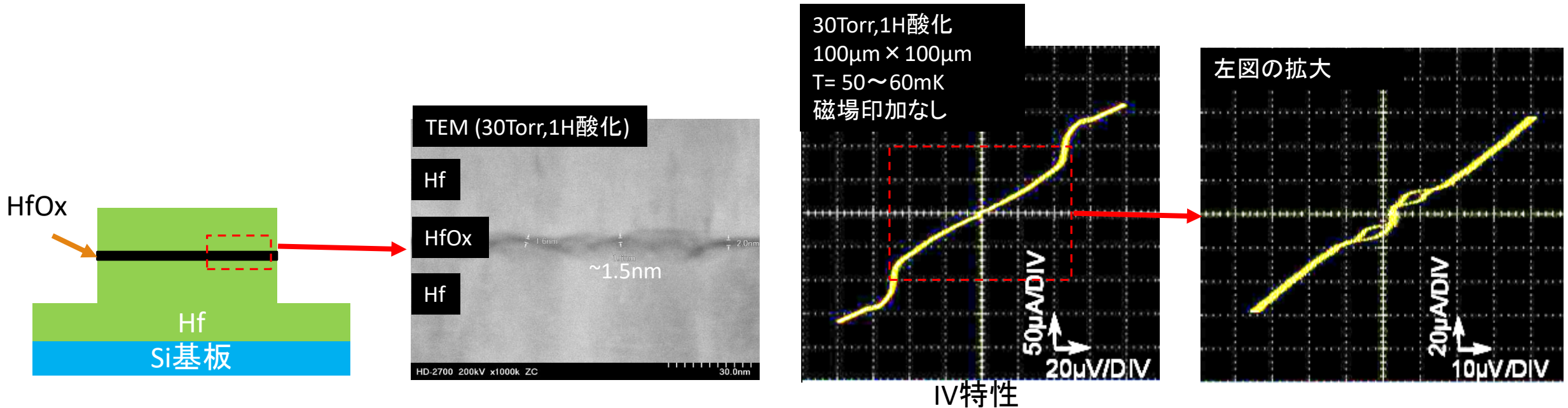
これまでの素子(1)

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

トンネルバリア(HfOx)が1.5nm程度できてことが確認できているが、漏れ電流が大きい($\sim 30\mu$ A)

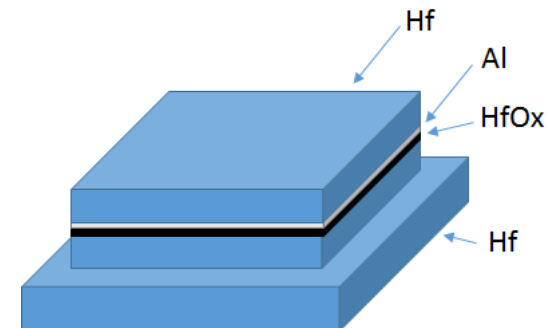
トンネルバリアに欠損があると考えられるため、HfOxの品質改善が必要



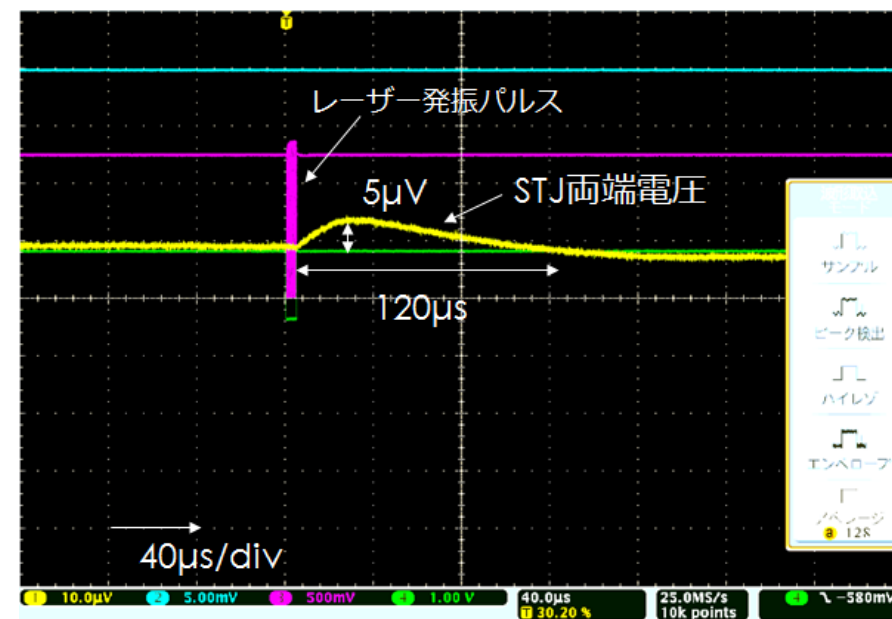
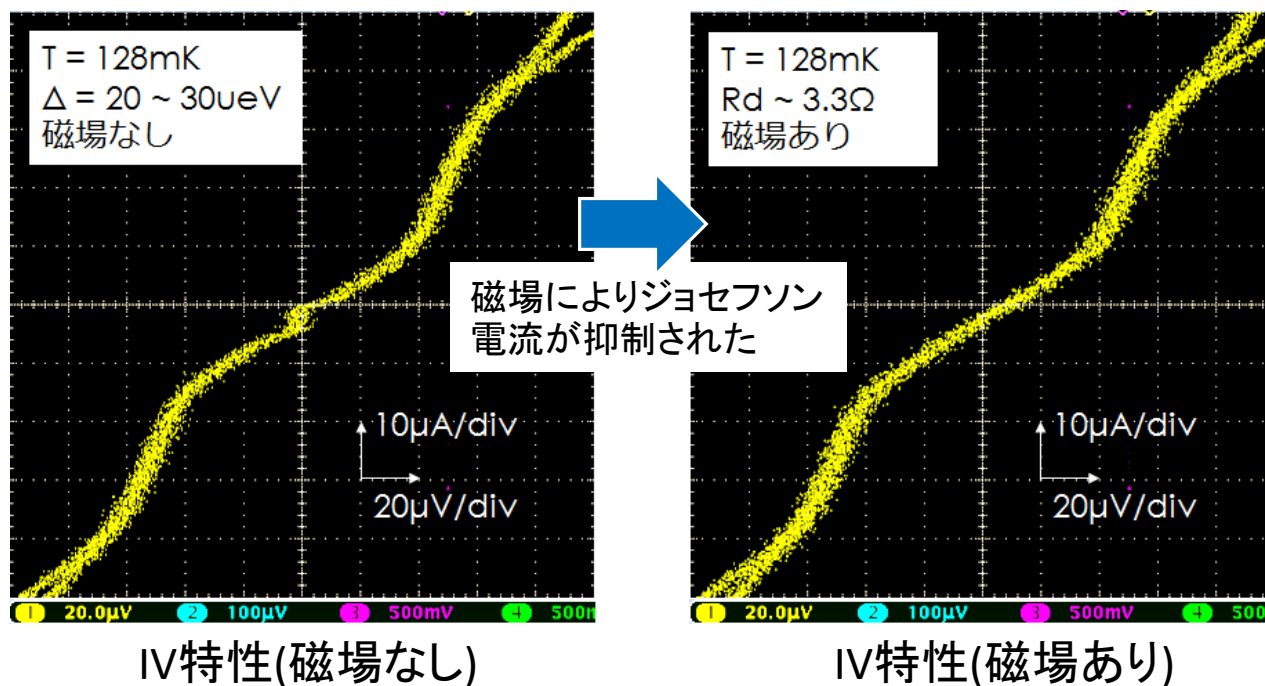
これまでの素子(2)

Al層を追加したHf-STJ

- 構造: Hf/Al/HfOx/Hf = 250nm/10nm/1.5nm/300nm
- 漏れ電流が従来の素子と比較して1/4 ($7\mu\text{A}@20\mu\text{V}$)に改善
- パルス光に対する応答を観測



STJ光検出器として動作するHf-STJを作成することに成功した。



可視光($\lambda=465\text{nm}$)応答

漏れ電流の改善

光検出器として動作するHf-STJを作成できたが、漏れ電流が非常に大きく改善が必要。
以下の方法で改善を試みた。

1. Hf薄膜の表面粗さの改善

- Hf薄膜の表面が粗いと絶縁層の欠陥が発生しやすい。
- Hf薄膜の成膜条件を変更し、滑らかなHf薄膜を形成する。

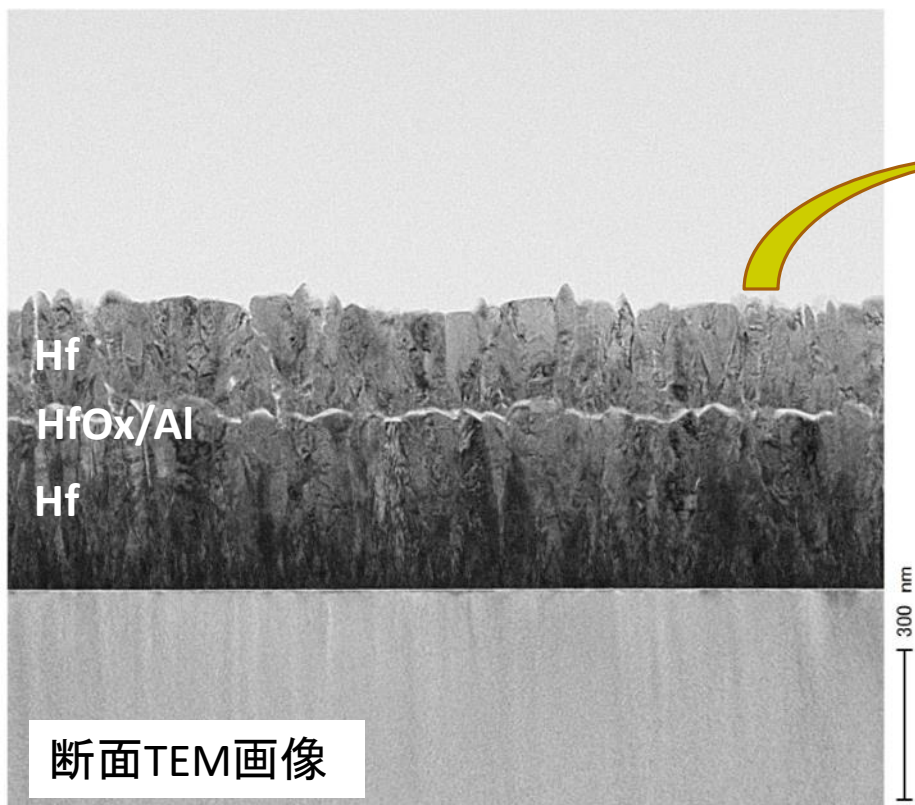
2. 小型化

- 素子サイズの小さくすると漏れ電流は減る傾向にある。
- 受光効率はアンテナをつけて補う。

Hf薄膜の表面粗さの改善

従来の成膜条件

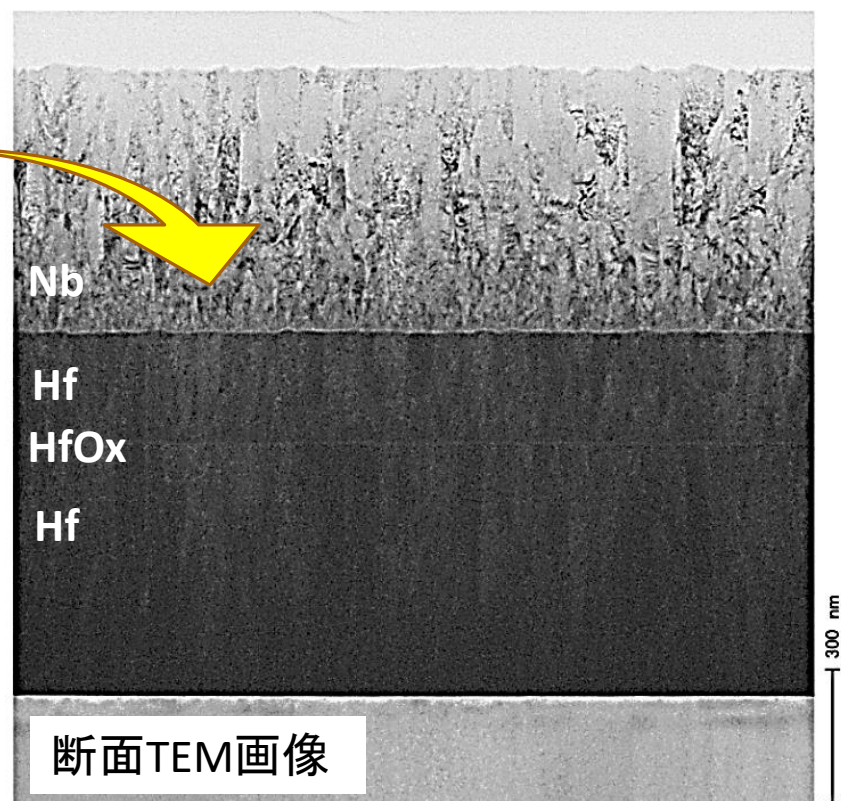
Ar 2.0Pa, 80W



改善

新しい成膜条件

Ar 0.5Pa, 50W



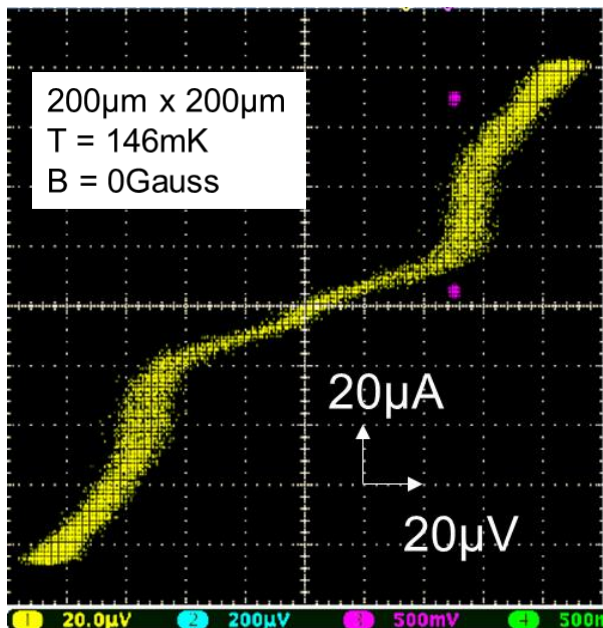
滑らかなHf薄膜を用いたHf-STJ (200 μm 角)

ジョセフソン電流を観測($\sim 2\mu\text{A}$).

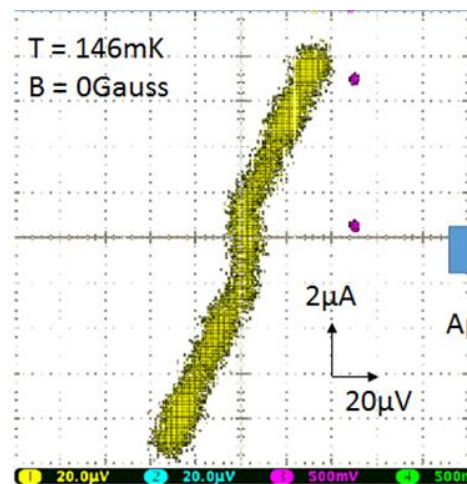
$\Delta \sim 25\mu\text{eV}$.

漏れ電流: $7\mu\text{A}@20\mu\text{V}$ (Hf表面の粗いものと比較して1/3に改善)

光応答を観測。可視光照射により $7\mu\text{A}$ トンネル電流が増加。

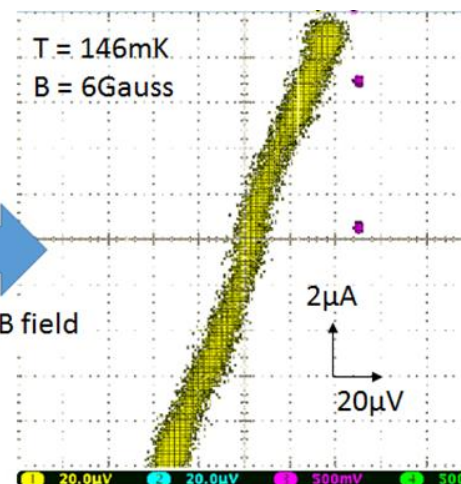


IV特性

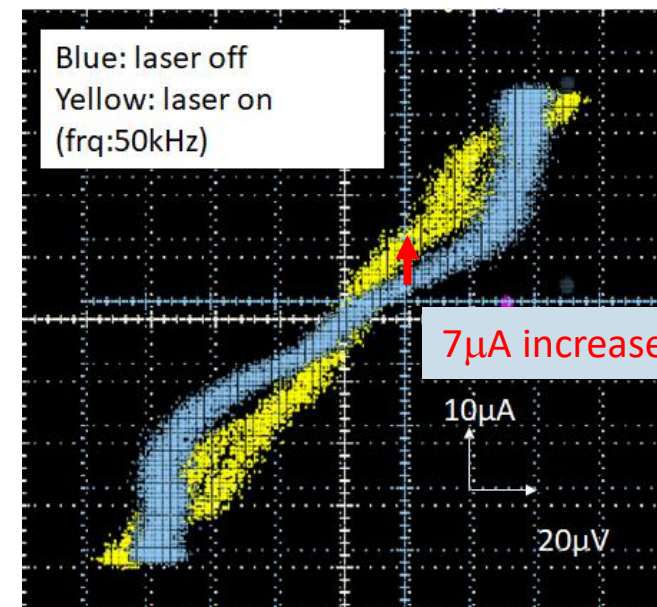


IV特性 (0V付近拡大,
B=0Gauss)

Apply B field



IV特性 (0V付近拡大,
B=6Gauss)



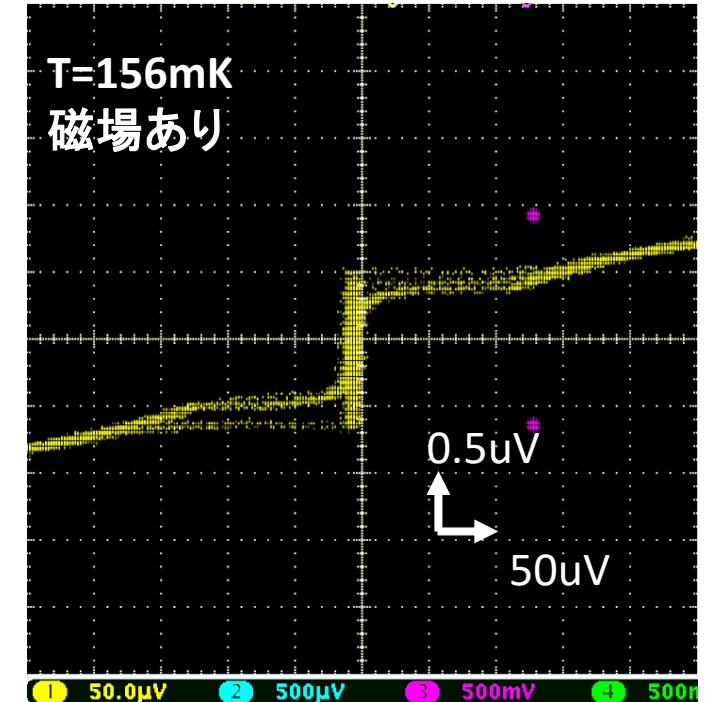
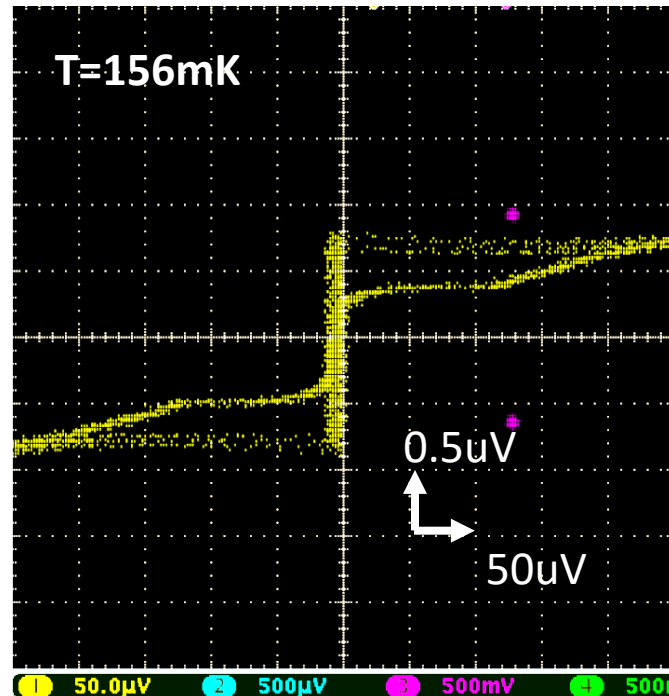
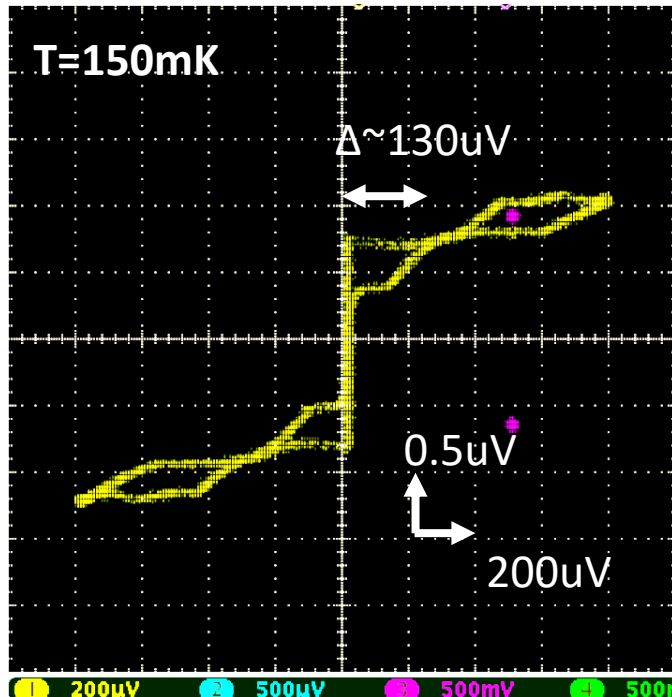
可視光($\lambda=465\text{nm}$)応答
T = 140mK, B = 9Gauss

滑らかなHf薄膜を用いたHf-STJ (10 μ m角)

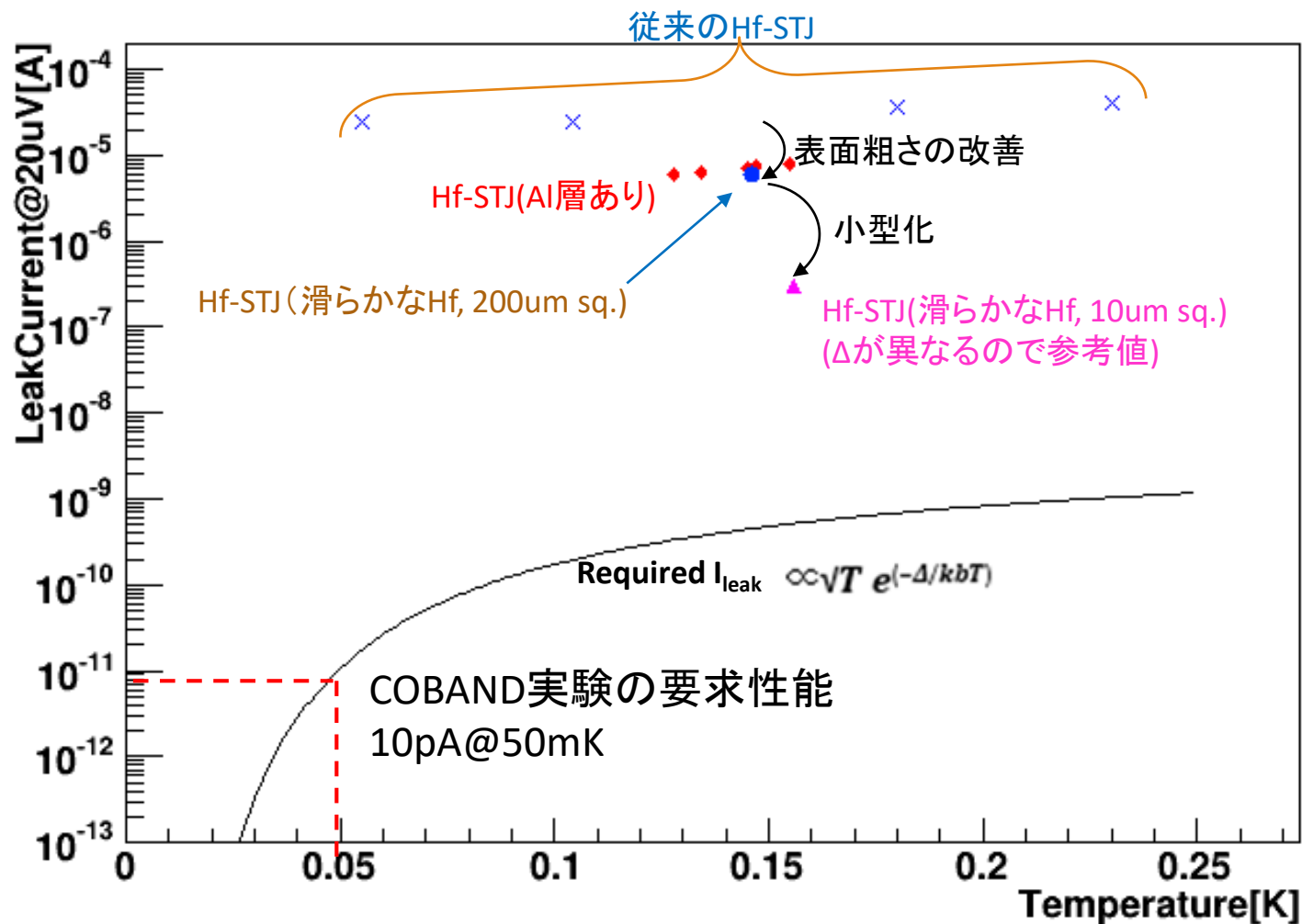
ジョセフソン電流を確認($\sim 0.7\mu\text{A}$)

$\Delta \sim 130\mu\text{eV}$.

漏れ電流: $0.3\mu\text{A}@20\mu\text{V}$ (200 μm 角と比較して1/23)



- Hf膜の表面粗さの改善や小型化により漏れ電流は改善してきている。
- しかしながら要求性能達成には1000倍程度の改善が必要。
- 絶縁膜の作成条件や手法の変更にて更なる改善を目指す。
- また、100mK以下での測定を行い温度依存性の評価を行う。



まとめ

- 宇宙背景ニュートリノ崩壊探索(COBAND)実験にむけて、Hf-STJの開発研究を行っている。
- Hf薄膜の表面粗さの改善と素子の小型化により、漏れ電流の減少が見られた。
 - 表面粗さの改善: 従来の素子と比較して漏れ電流が1/3に減少
 - 素子の小型化: 200um角→10um角に小型化することで漏れ電流が1/23に減少
- しかし、未だにCOBAND実験の要求値達成に至っていないため改善が必要である。
 - 絶縁膜の作成条件や手法の変更にて更なる改善を目指す。