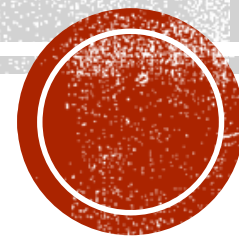




COBAND実験に用いるHf-STJの 開発研究

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
(筑波大学 素粒子実験研究室)



他COBAND実験メンバー

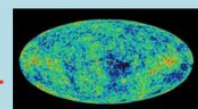
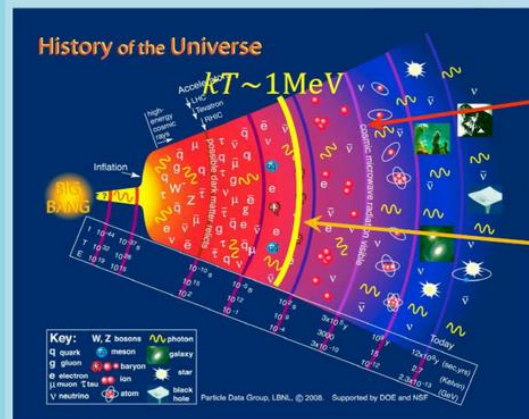
COBAND実験 (Cosmic Background Neutrino Decay Search)

- 超伝導検出器を乗せたロケット/衛星を打ち上げ、宇宙赤外線宇宙赤外線の遠赤外領域 ($E_\gamma \sim \text{数}10\text{meV}$) 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存在の検証
 - ニュートリノ質量の決定

宇宙背景ニュートリノ崩壊探索

COBAND

Cosmic Background Neutrino Decay Search



CMB

$$n_\gamma = 411/\text{cm}^3$$

$$T_\gamma = 2.73 \text{ K}$$

CvB

$$n_\nu = n_{\bar{\nu}} = \frac{3}{4} \left(\frac{T_\nu}{T_\gamma} \right)^3 \frac{n_\gamma}{2}$$

$$= 56/\text{cm}^3$$

$$T_\nu = \left(\frac{4}{11} \right)^{\frac{1}{3}} T_\gamma = 1.95 \text{ K}$$

$$E_\gamma = \frac{m_3^2 - m_2^2}{2m_3}$$



COBAND実験webページ:

<http://hep.px.tsukuba.ac.jp/coband/index.html>

COBAND実験モチベーション

ニュートリノ質量の決定

- ニュートリノ振動が観測されたことで質量自乗差は測定されたが、質量そのものは測定されていない。

- $\Delta m_{32}^2 = (2.44 \pm 0.06) \times 10^{-3} \text{ eV}^2$, $\Delta m_{21}^2 = (7.53 \pm 0.18) \times 10^{-5} \text{ eV}^2$

- ニュートリノ崩壊を観測することでニュートリノ振動と独立な物理量が得られる。
 - 崩壊で放出される光子のエネルギー: $E_\gamma = \frac{\Delta m_{32}^2}{m_3} = 10 \sim 25 \text{ meV}$ (ν_3 静止系)
- これにより、ニュートリノ質量を決定できる。

- ニュートリノが重い質量固有状態から軽い質量固有状態と光子に崩壊する現象

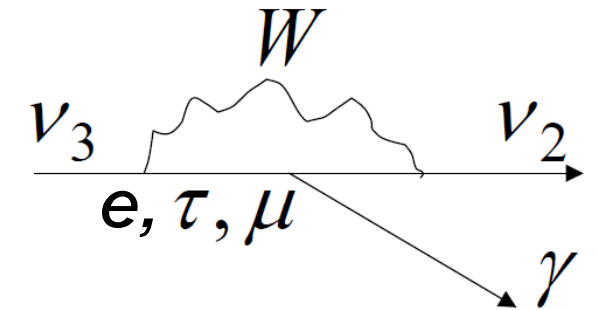
- $\nu_3 \rightarrow \nu_2 + \gamma$

- $\tau > 10^{43} \text{ years}$ (標準模型, ν_3 質量を $50 \text{ meV}/c^2$ と仮定した場合)

- $\tau > 1.5 \times 10^{17} \text{ years}$ (LR対称模型)

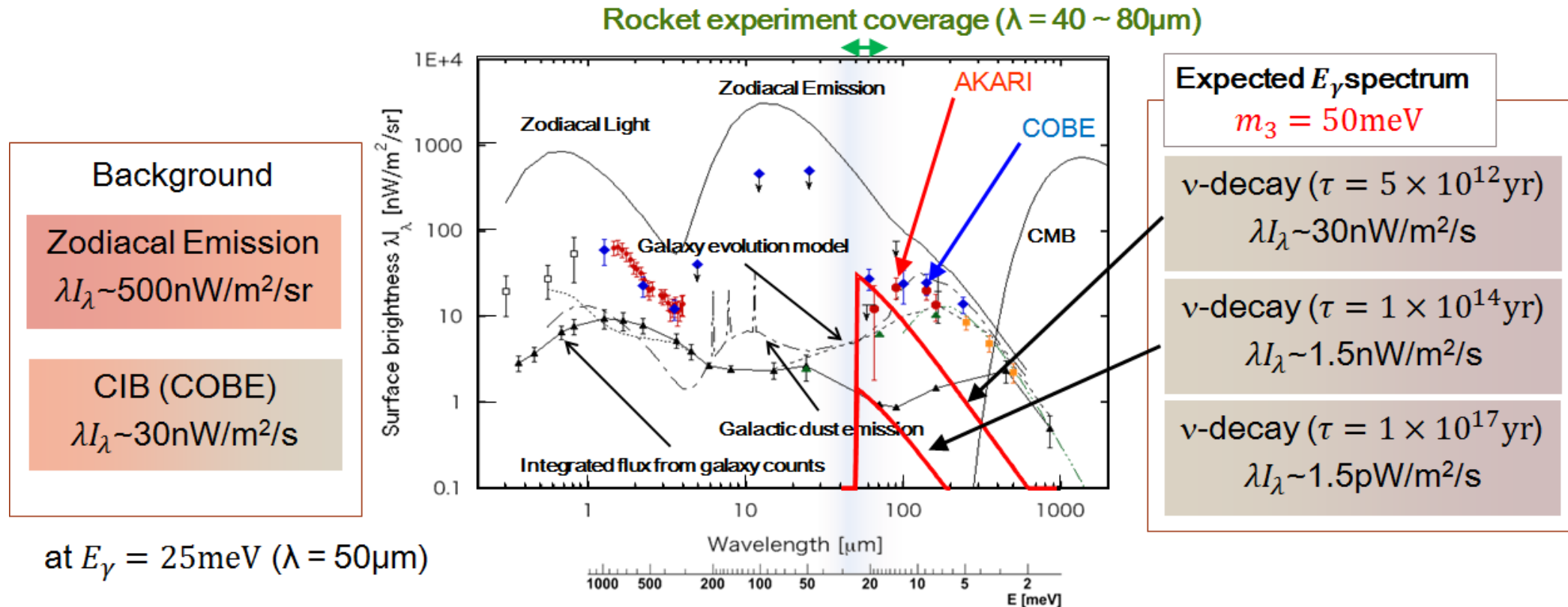
- 寿命が非常に長く観測には大量のニュートリノが必要となるため、宇宙背景ニュートリノを観測対象とする。

($\rho \sim 110 \text{ cm}^{-3}$ で宇宙中に存在すると予想されている。)



ニュートリノ崩壊ファインマン図

宇宙背景ニュートリノ崩壊のエネルギースペクトルと背景事象



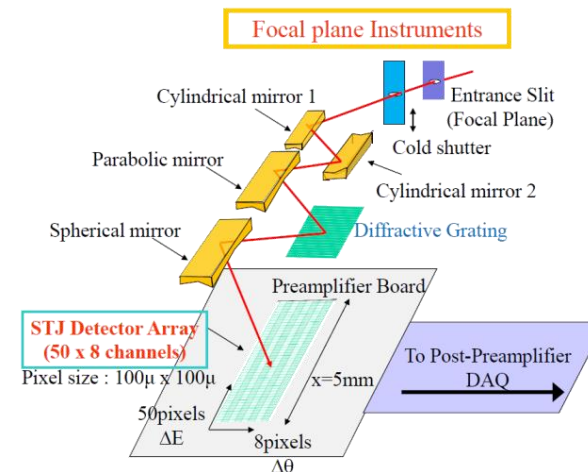
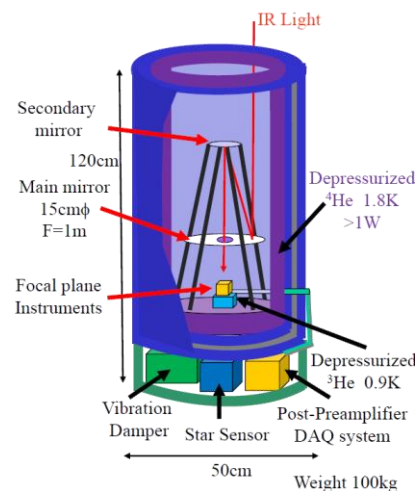
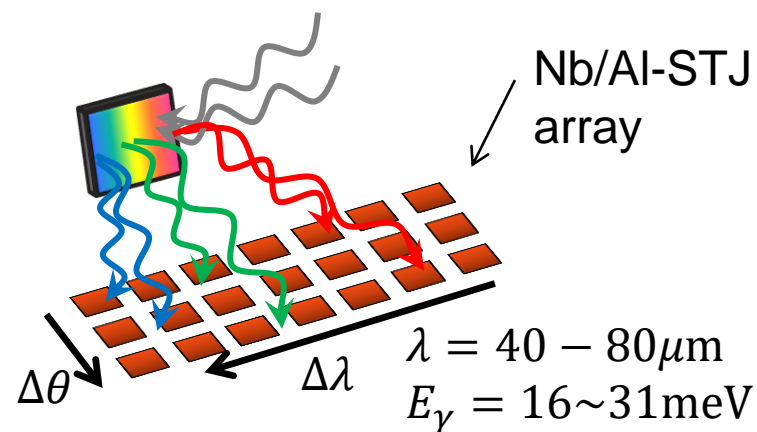
- » ニュートリノ崩壊の信号は、 E_γ で鋭く立ち上がり長波長側にテールを持った形を持つ。
- » 黄極方向の暗点の遠赤外領域($\lambda = 40\mu\text{m} \sim 80\mu\text{m}$)のエネルギースペクトルを連続的に測定することで、ニュートリノ崩壊スペクトルの立ち上がりが観測できる。
- » この立ち上がりを観測するには $E_\gamma \sim 25 \text{ meV}$ ($\lambda \sim 50\mu\text{m}$)の光子のエネルギーを2%以上の分解能で測定できる検出器が必要。

ロケット/衛星実験

COBAND実験では2つの実験を計画している。

■ ロケット実験 (2019年)

- 上空200kmで200secのデータ収集を行う。
- 望遠鏡: 直径:15cm, 視野: $0.006^\circ \times 0.05^\circ$
- ニュートリノ (ν_3) 寿命の下限値を現在の値より2桁ほど改善できる ($\sim 10^{14}$ years).
- 使用する検出器: 回折格子 ($\lambda = 40 - 80 \mu\text{m}$) で分光し、Nb/Al-STJアレイでカウントする。



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

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)

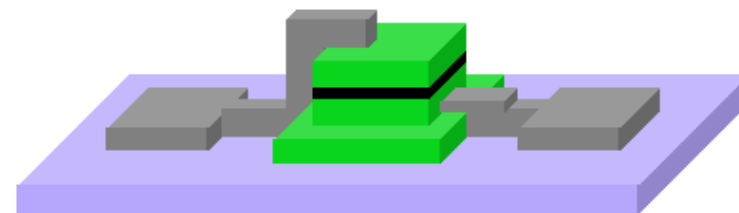
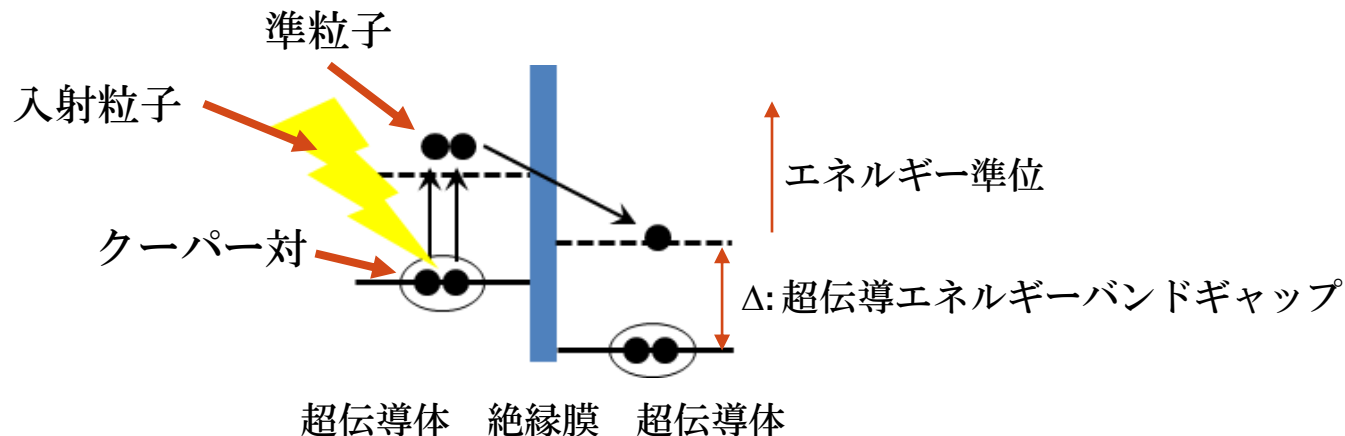
STJ (Superconducting Tunnel Junction) Detector

■ 構造

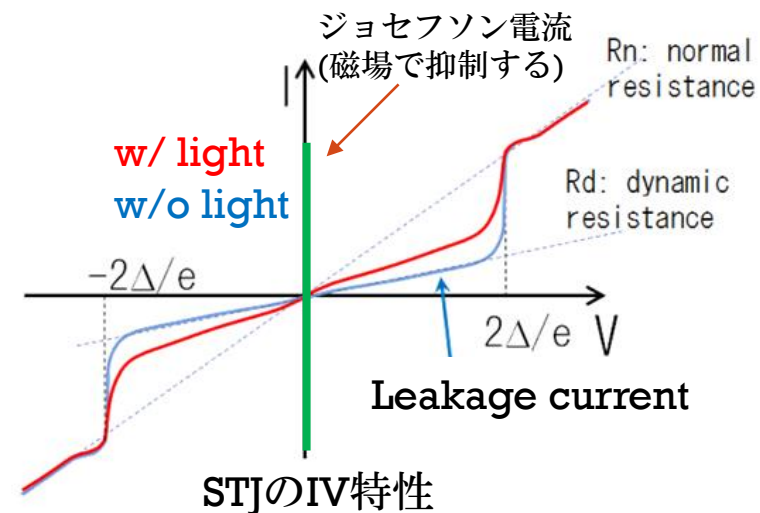
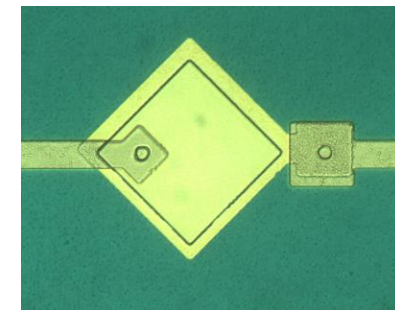
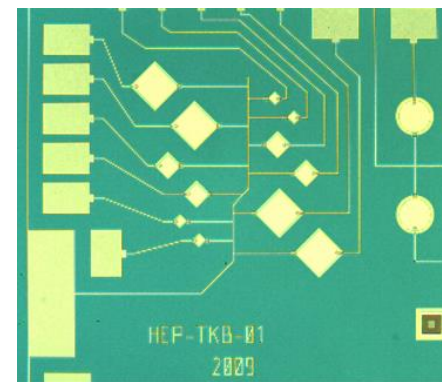
- ジョセフソン素子の一種、超伝導体/絶縁膜/超伝導体
- サイズ: 数10～数100 μm 角, 厚み $\sim 500\text{ nm}$
- 絶縁膜は厚み1nm程度

■ 動作原理

- 入射粒子からエネルギー付与される
- クーパー対破壊により準粒子が生成、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

- 超伝導エネルギーバンドギャップの非常に小さいハフニウムを超伝導電極に用いることでエネルギー分解能に優れる光検出器を実現する。

- STJのエネルギー分解能: $\sigma_E = \sqrt{(1.7\Delta)F\varepsilon}$
- 25meVの光子に対して2%程度のエネルギー分解能

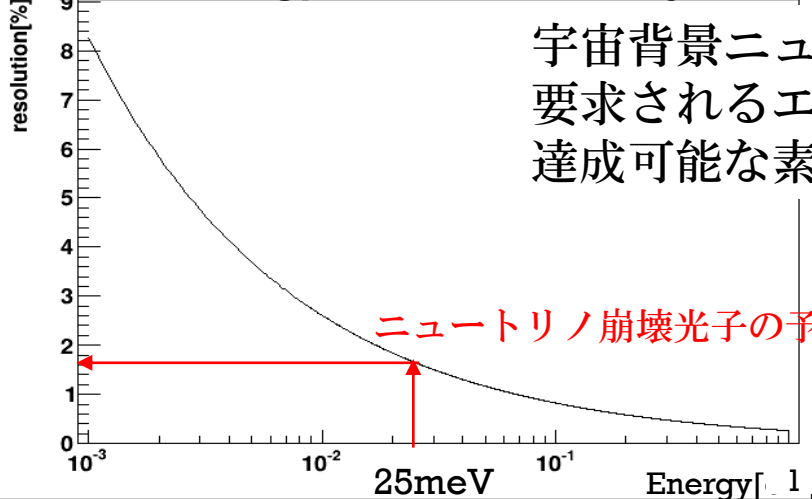
- STJは熱ノイズ抑制のため、 T_c の1/10以下に冷却して使用する。

→ Δ が小さいとエネルギー分解能は良くなるが、

T_c は低くなり取り扱いにくくなる。 $2\Delta = 3.5k_B T_c$ (BCS theory)

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
 T_c : 超伝導転移温度

Expected energy resolution of Hf-STJ



宇宙背景ニュートリノ探索(COBAND)実験で
要求されるエネルギー分解能2%@25meVを
達成可能な素材の内、 T_c の大きいHfを選択した。

ニュートリノ崩壊光子の予測エネルギー25meV

Material	T_c [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

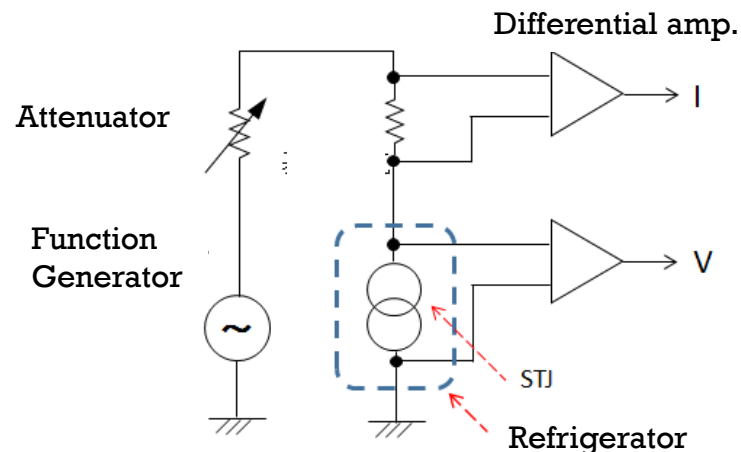
開発環境

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

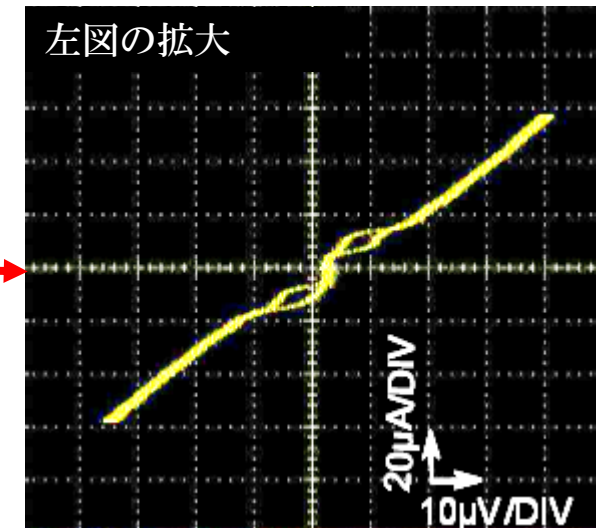
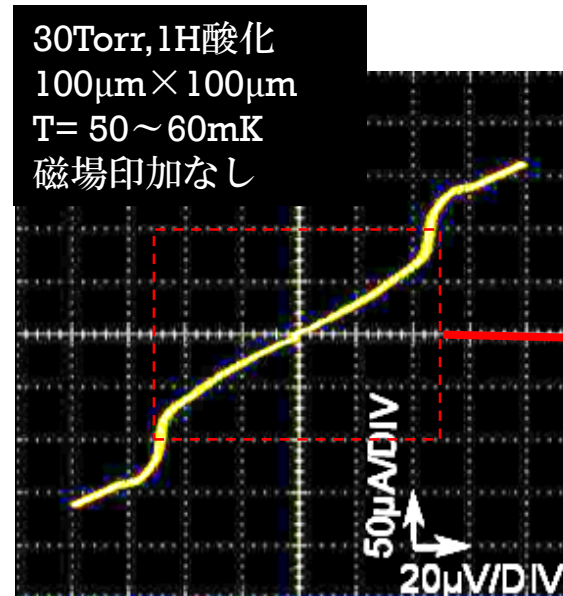
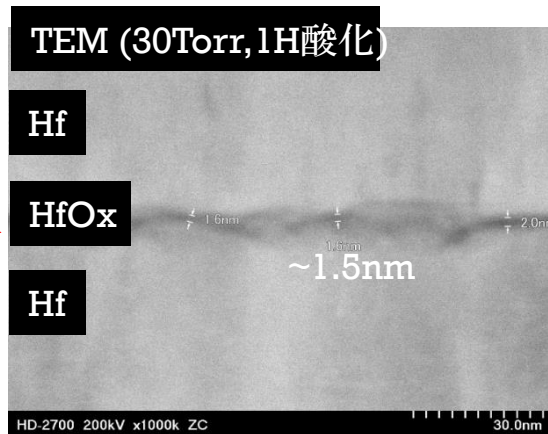
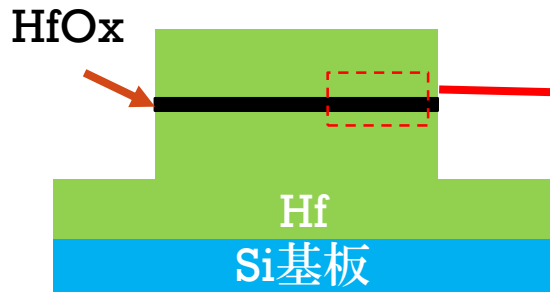
評価:

- 希釈冷凍機を用いて $\sim 120\text{mK}$ に冷却
- 4端子法を用いてIV特性、光応答を測定



従来の素子

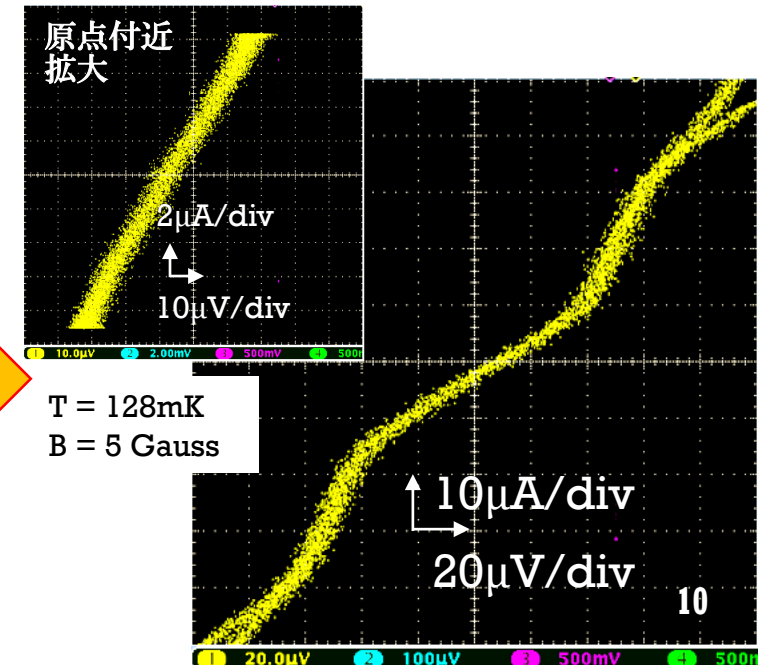
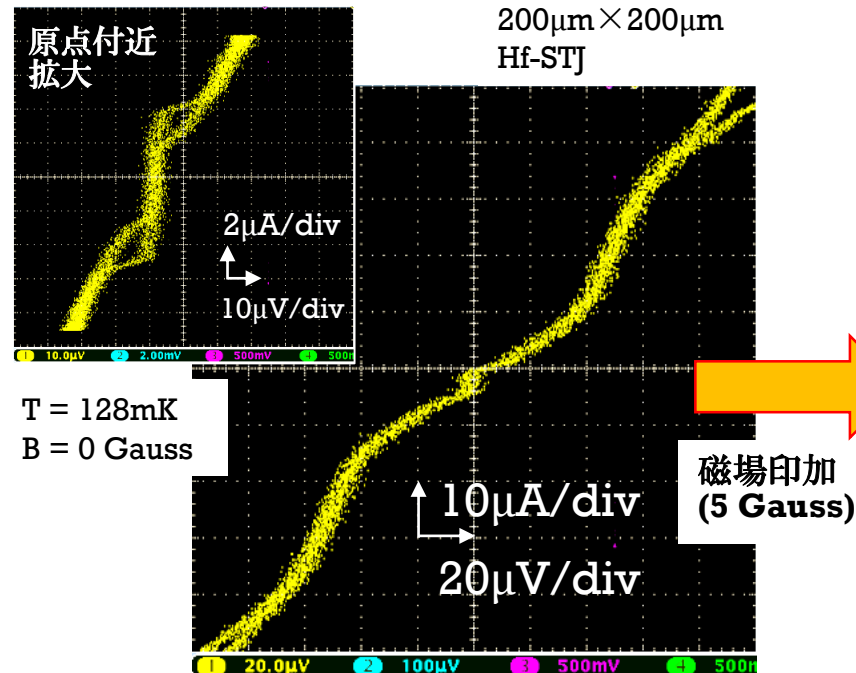
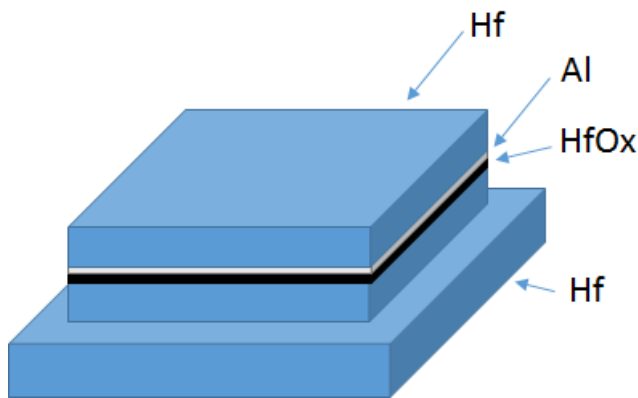
- **Pure Hf素子**：Hfのみで製作したサンプル(100 μ m角)
 - Hf/HfO_x/Hf = 250nm/ 1.5nm(熱酸化30Torr, 1H)/300nm
- トンネルバリア(HfO_x)が1.5nm程度できているが、漏れ電流が大きい(~30 μ A@20 μ V)
- トンネルバリアに欠損があると考えられるため、HfO_xの品質改善が必要



IV特性

薄いAl層を追加したHf-STJ

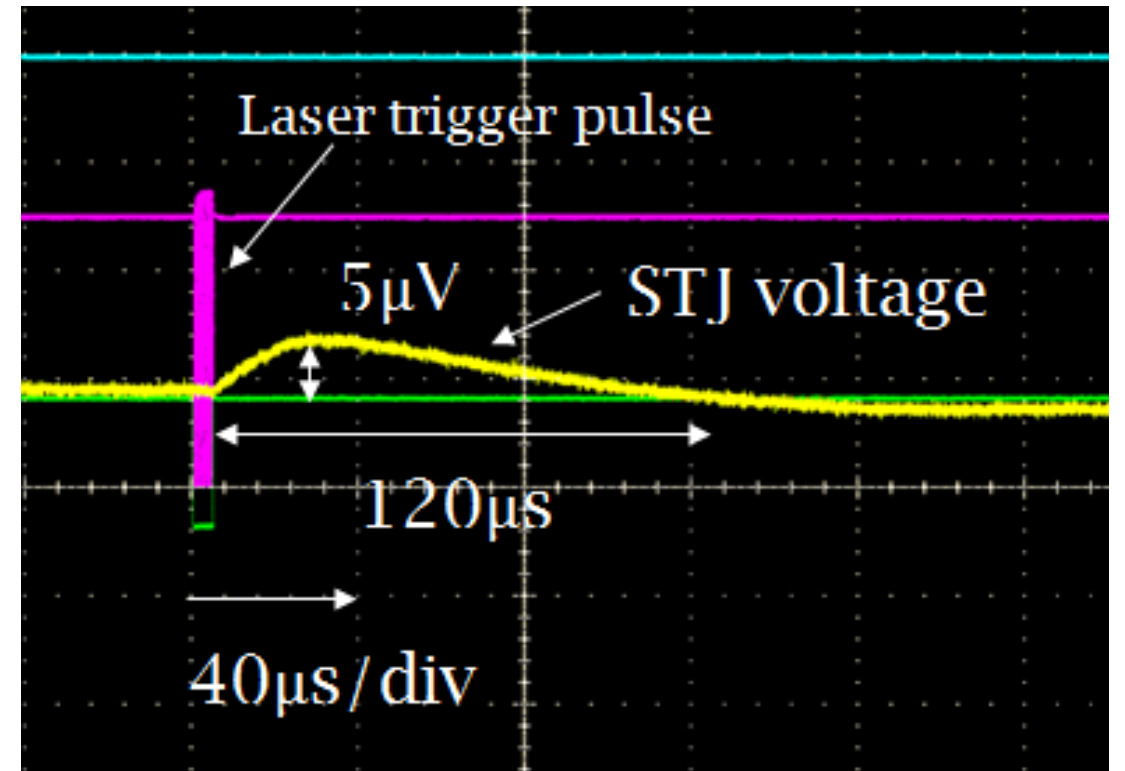
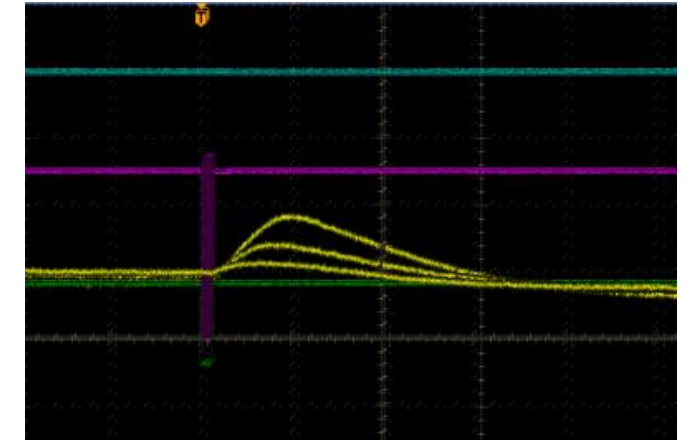
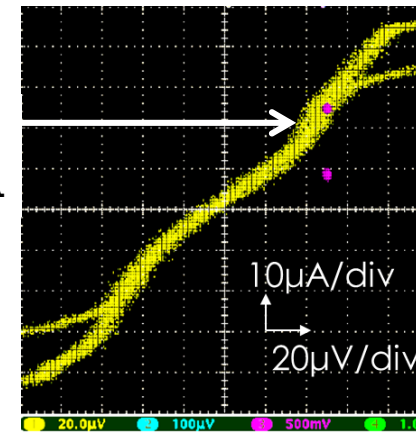
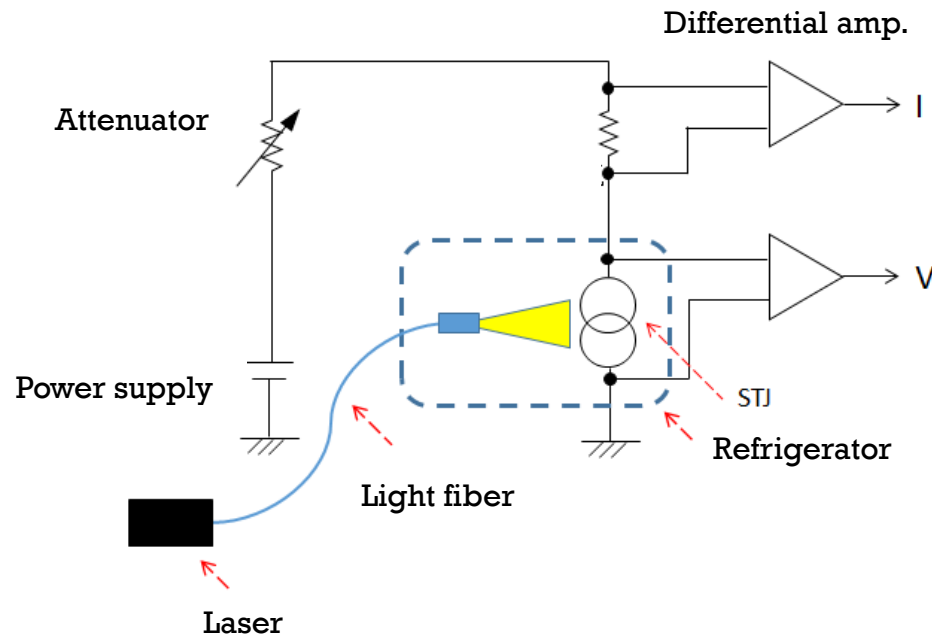
- 薄いAl層(~10nm)を絶縁膜上に追加。
- 構造: Hf/Al/HfO_x/Hf = 250nm/10nm/1.5nm/300nm
- ジョセフソン電流が存在し、磁場で抑制されることを確認
- 漏れ電流: 5μA@20μV (200μm×200μm素子, 128mK)
 - 従来の素子(100μm角)と比較して、1/4に減少。サイズ差を考慮に入れば1/16に改善。
 - 改善はしたが、いまだに目標値は達成していない。(120mKでの目標漏れ電流: 30pA)



薄いAl層を追加したHf-STJ

定電流で動作させた
測定時の電流値 $20\mu\text{A}$

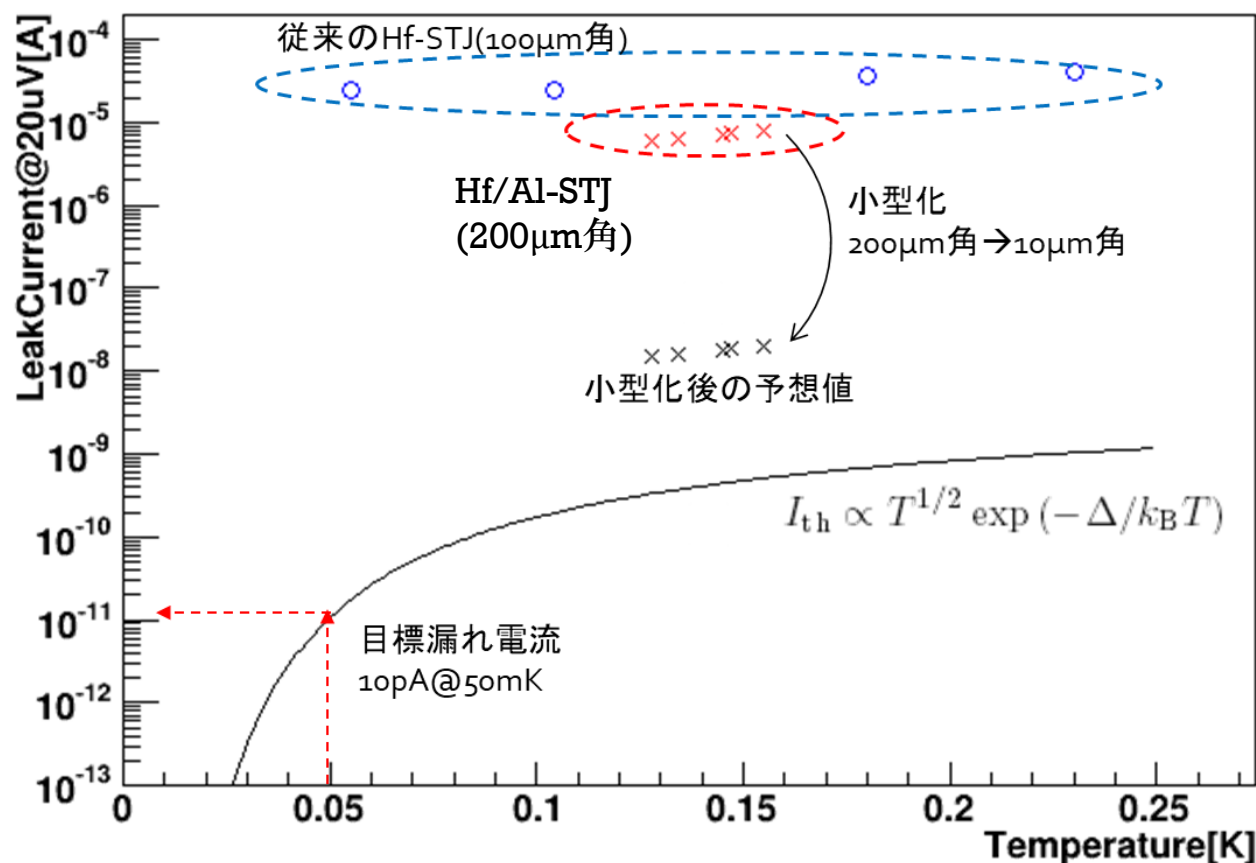
- パルス光応答
- 波長 465nm 可視光レーザー
- 100ms 毎に $5\mu\text{s}$ 間 5MHz (25回)の発振



- **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。

従来のサンプルとの性能比較

- Al層を追加することで漏れ電流が1/4に改善。
- 素子の小型化(200 μm 角 \rightarrow 10 μm 角)を行うことで1/400まで抑制が可能。
- 目標性能を達成するためには小型化以外に100倍程度の改善が必要。



Al層を追加したSTJの開発成果と課題

<成果>

- 漏れ電流が従来と比較して1/4 (サイズ差を考慮すれば1/16)に改善
- 光応答が確認でき, STJとして動作していることが確認できた。

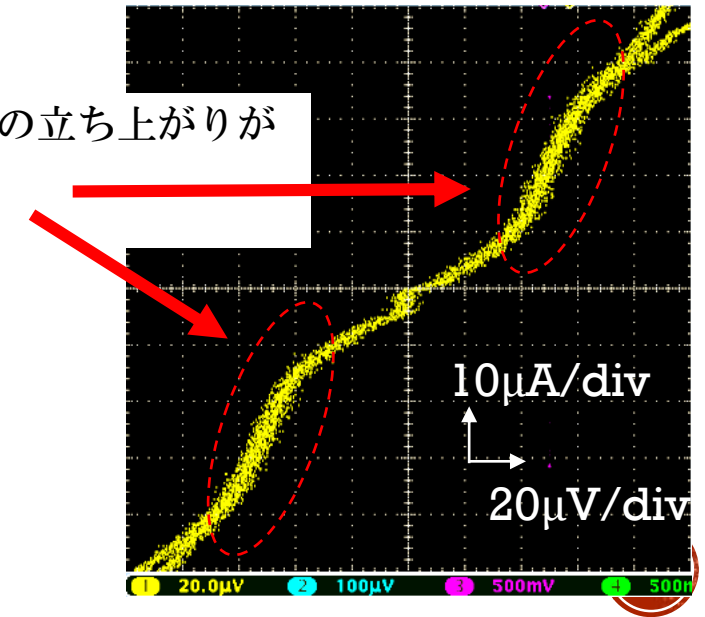
<課題>

- 漏れ電流が要求値を満たしていない。
 - 小型化(200 μm 角 \rightarrow 10 μm 角)することで400倍程の改善が見込めるが、要求値にはさらに100倍の改善が必要。
 - $|V|=2\Delta$ での立ち上がりが鈍っている。 \rightarrow 超電導体の Δ に不均一性が存在する
 - Al層の Δ や近接効果の影響と考えられる。



- HfのみでSTJを作成して Δ を均一にする。
- 表面の凹凸が小さいHf薄膜を用いてSTJを作成する。
 - 絶縁膜の厚み(1.5nm)より表面の凹凸が小さくできれば絶縁膜厚さの均一性が増し、漏れ電流が抑制できる。

$|V|=2\Delta$ の立ち上がりが
緩やか

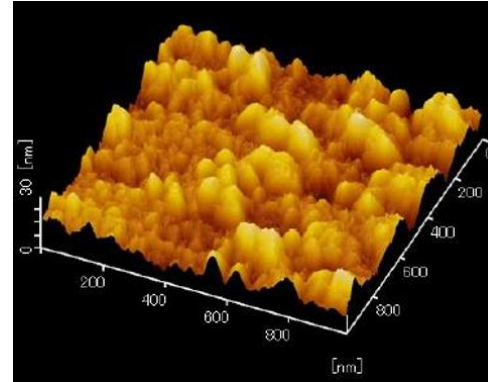


表面の滑らかなHf薄膜を用いたSTJ

- 成膜条件を変更し、表面の滑らかなHf薄膜の作成を試行した。

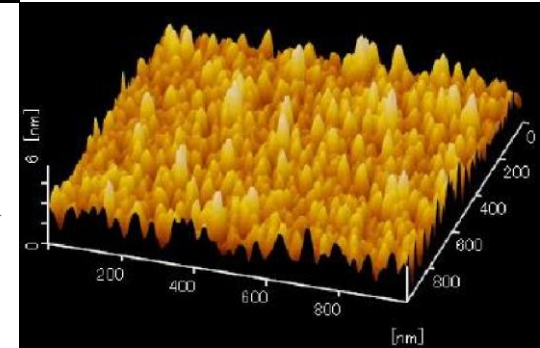
- 成膜条件1: Ar 2.0Pa, 70W

- 平均面粗さ $R_a = 1.9\text{nm}$
- 自乗平均面粗さ $RMS = 2.5\text{ nm}$



- 成膜条件2: Ar 0.5Pa, 50W

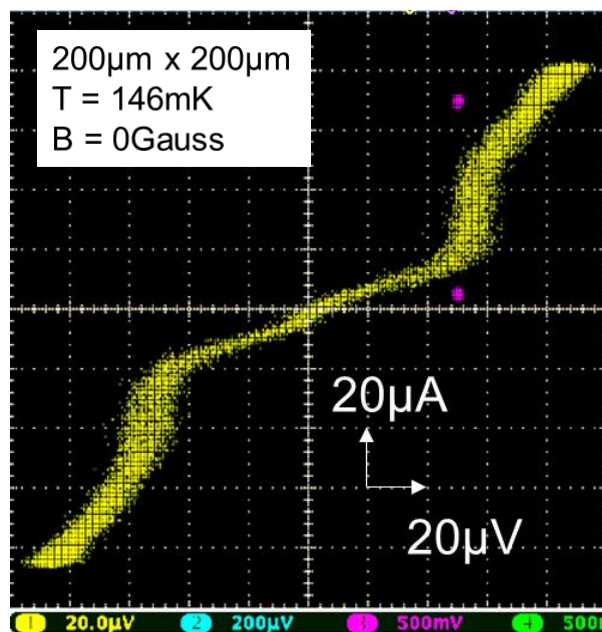
- 平均面粗さ $R_a = 0.76\text{nm}$
- 自乗平均面粗さ $RMS = 0.96\text{ nm}$



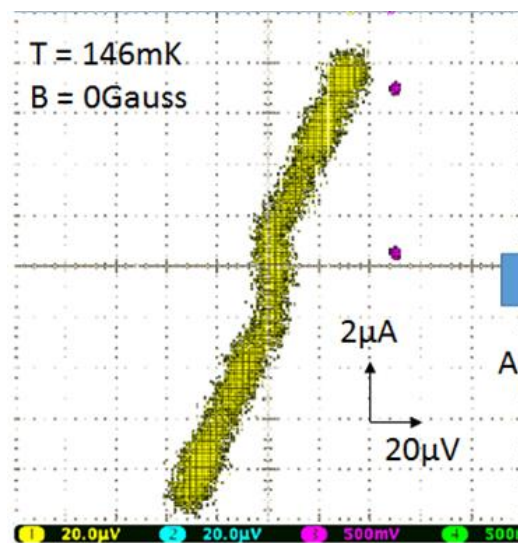
- これらのHf薄膜を用いてSTJの作成・評価を行った。

成膜条件1 (RMS=2.5nm)の薄膜を用いたHf-STJ

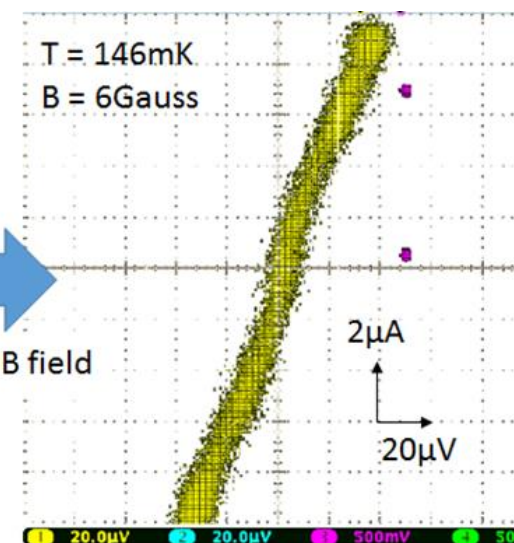
- ジョセフソン電流($\sim 2\mu\text{A}$)を確認
- $\Delta \sim 25\mu\text{eV}$ 。Hf/Al-STJと違い 2Δ での立ち上がりが垂直
 - \rightarrow 超伝導体全体がバルクHfと同等の Δ を持つ
- 漏れ電流: $7\mu\text{A}@20\mu\text{V}$
 - \rightarrow Al層を追加したものと同等の数値をHfのみで達成



IV特性



IV特性(原点付近拡大、
磁場無し)



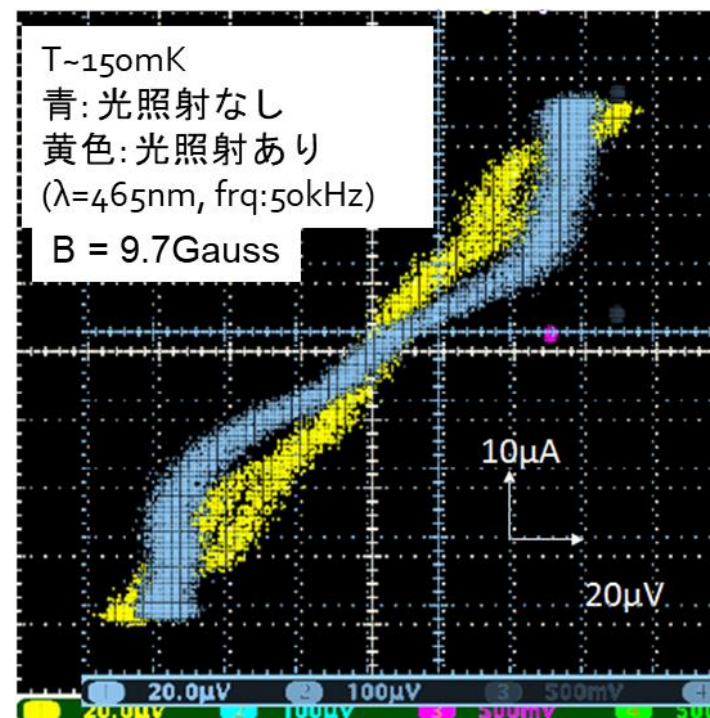
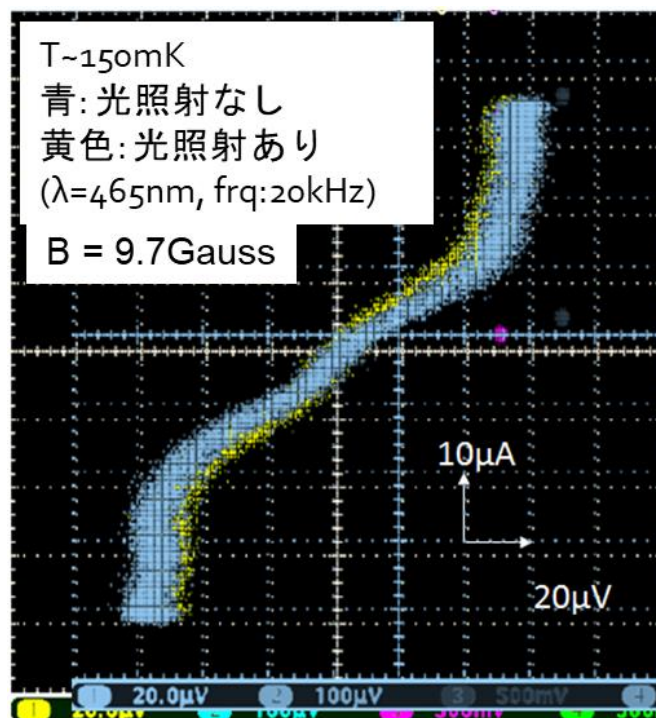
IV特性(原点付近拡大、
磁場6Gauss)

成膜条件1 (RMS=2.5nm)の薄膜を用いたHf-STJの光応答

$\lambda=465\text{nm}$ レーザー光に反応してIV特性が変化することを確認した。

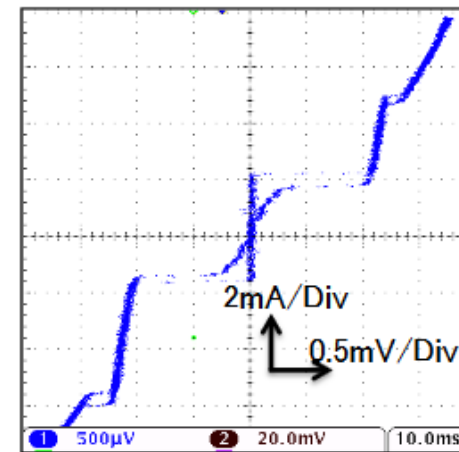
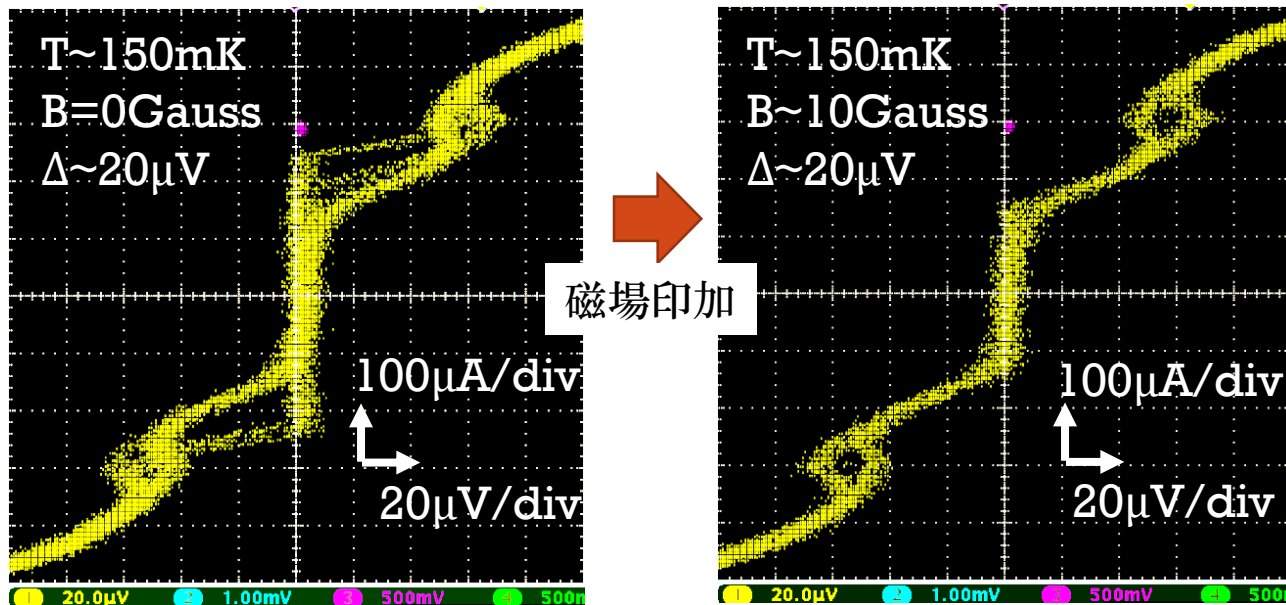
- 20kHzで照射: 電流 $2\mu\text{A}$ 増加
- 50kHzで照射: 電流 $7\mu\text{A}$ 増加

→ 光応答を確認。

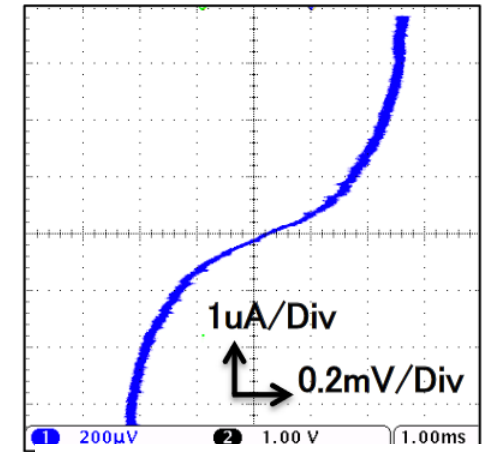


成膜条件2(RMS=0.96nm)の薄膜を用いたHf-STJ

- ジョセフソン電流: $\sim 250\mu\text{A}$ を確認。
- $\Delta \sim 20\mu\text{eV}$, 漏れ電流が大きく均一性の確認はできていない。
- 漏れ電流: $170\mu\text{A}@20\mu\text{V}$
- IV特性の形状が良くできたNb/Al-STJの冷却不十分なときの形状に似ている。
 - 現在は T_c に近い温度で測定しており熱ノイズが大きいので、十分に冷却($T_c/10$ 以下)することで良い特性を示す可能性がある。



Nb/Al-STJのIV特性@3K
(磁場なし)



Nb/Al-STJ@400mK
(磁場あり)
熱励起ノイズが減り
漏れ電流が非常に小さい

今後の計画

- 漏れ電流抑制の手段として以下を進める。
 - 成膜条件の調整による、Hf表面の平坦化 (=均一な絶縁膜の形成)を目指す。
 - 小型化: 現在の $200\mu\text{m}$ 角から $10\mu\text{m}$ 角に小型化し、400倍の改善を目指す。
- 現在、冷凍機の不調によりHfの T_c より十分低い温度での評価ができていないので冷凍機の復旧を行い、熱起因の漏れ電流を抑制できる $T \sim 50\text{mK}$ での測定を目指す。

まとめ

- 25meVの光子に対して2%のエネルギー分解能を実現する検出器としてHf-STJの開発を行っている。
- STJとして動作するHf-STJ素子の作成に成功し、可視光レーザーパルス光への応答を確認した。
- 漏れ電流抑制のため、Hf薄膜の平坦化による絶縁膜の均一性の向上を試みている。
- Hf成膜条件の調整や小型化を行い、より漏れ電流の少ないSTJの作成を目指す。