

# COBAND実験のためのHf-STJ の研究開発IV

筑波大学 武政健一

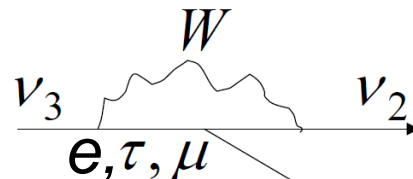
日本物理学会2018秋季大会@信州大学

2018.9.14

# COBAND(COsmic BAcground Neutrino Decay search)実験

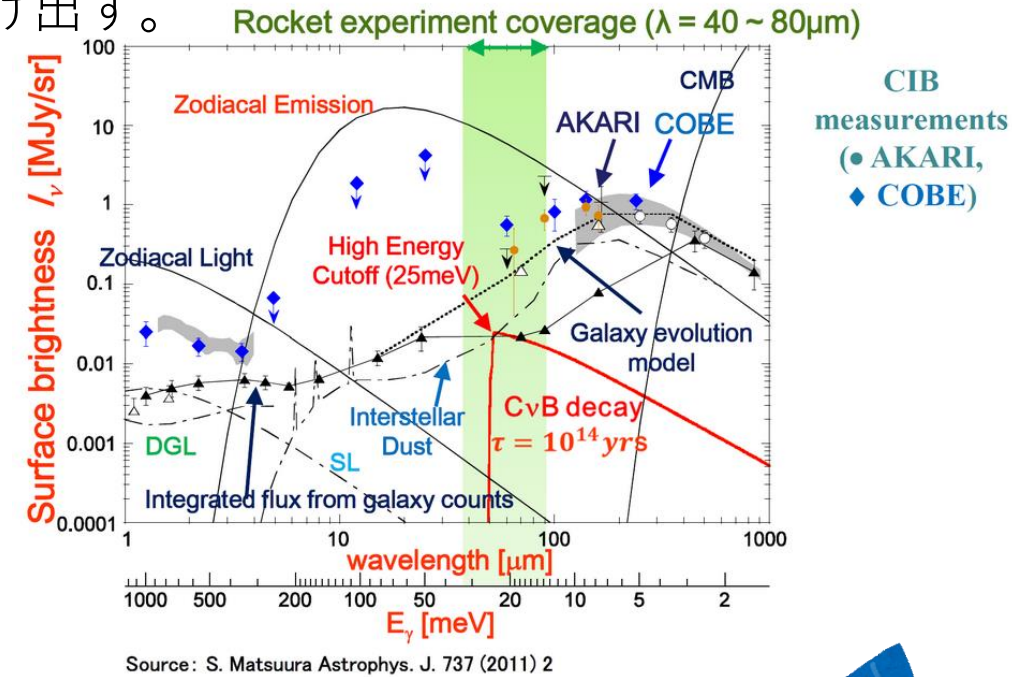
## • COBAND実験

- 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



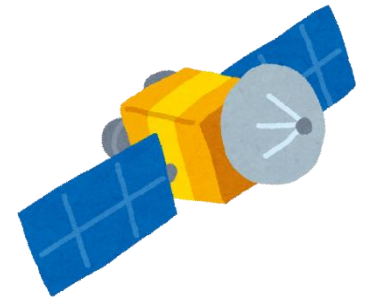
The diagram shows a neutrino  $\nu_3$  decaying into a photon  $\gamma$  and a neutrino  $\nu_2$ . The decay is mediated by a W boson, with parameters  $e, \tau, \mu$  indicated. The energy of the photon is given by the equation:

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



## • COBAND衛星実験

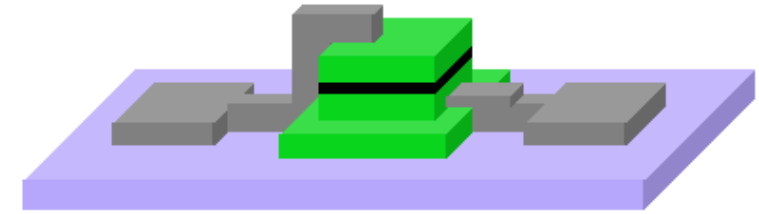
- 人工衛星にて100日間のデータ収集(2020年以降)
- $\tau(\nu_3) \sim 10^{17}$ 年の感度 (標準模型で $\tau(\nu_3) \sim 10^{43}$ 年, LR対称模型で $\tau(\nu_3) \sim 10^{17}$ 年)
- 望遠鏡: 直径20cm, 視野:  $0.1^\circ$
- 検出器: Hf-STJ( $E_\gamma \sim 25 \text{ meV}$ を分解能2%以下で連続的に測定する必要がある)



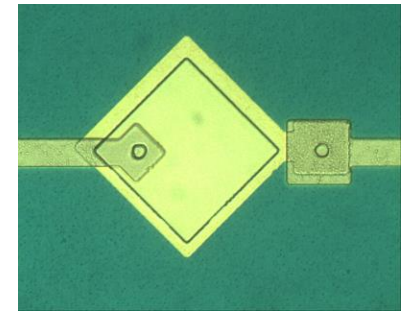
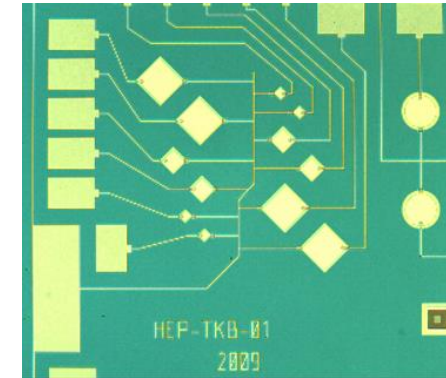
# STJ (Superconducting Tunnel Junction) Detector

## 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 $\mu\text{m}$ 角, 厚み ~500 nm

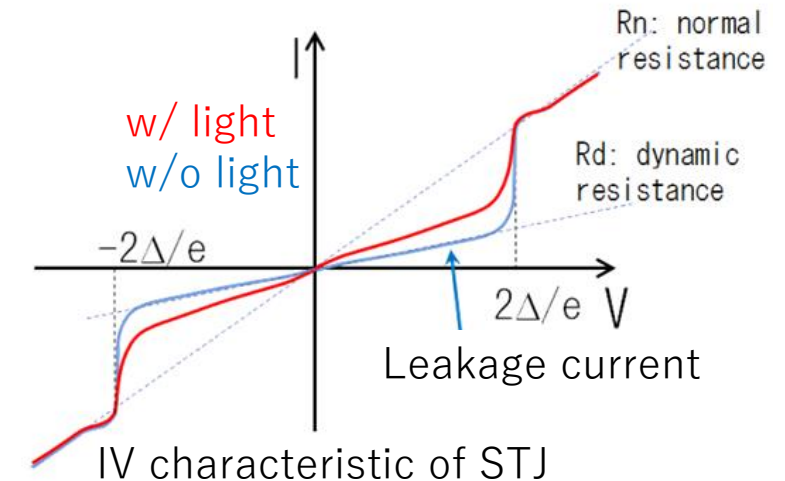
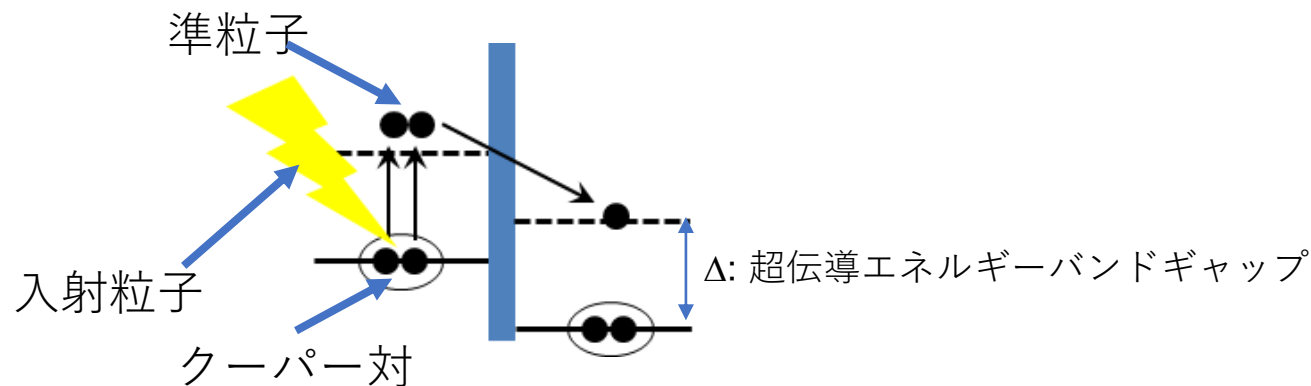


Overhead view of STJ detector



## 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



# Hf-STJのエネルギー分解能

- STJのエネルギー分解能

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

$\Delta$ : 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

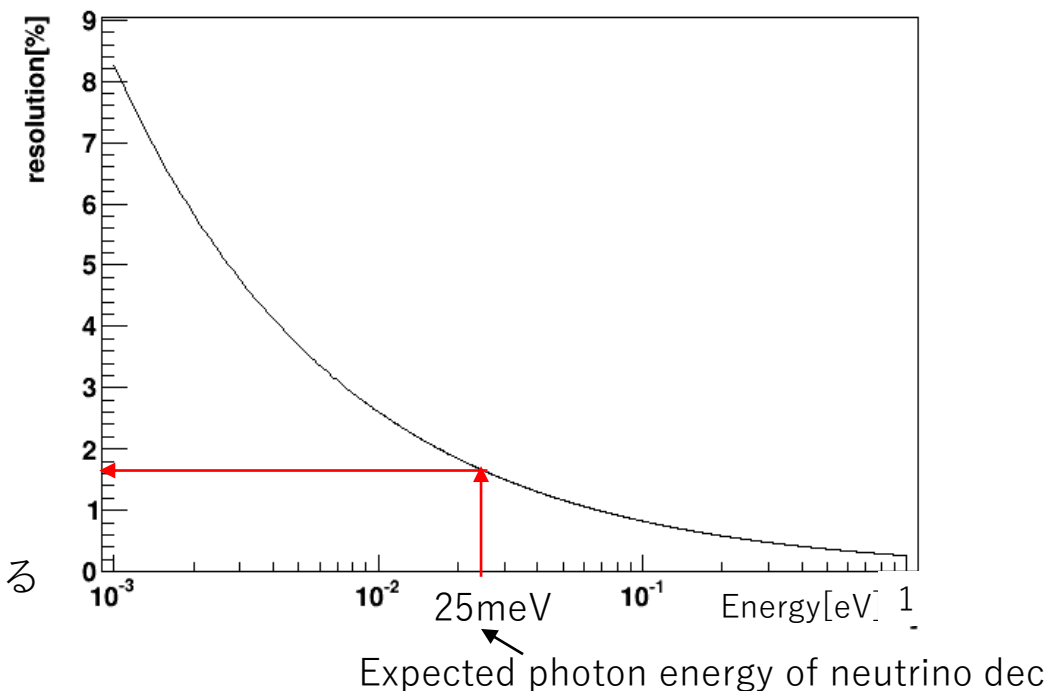
- $\Delta$ が小さいほど準粒子の生成数が大きくなり、エネルギー分解能が良い。

Material	Tc(K)	$\Delta$ (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  $\mu$ sの場合)

Expected energy resolution of Hf-STJ



# 開発環境

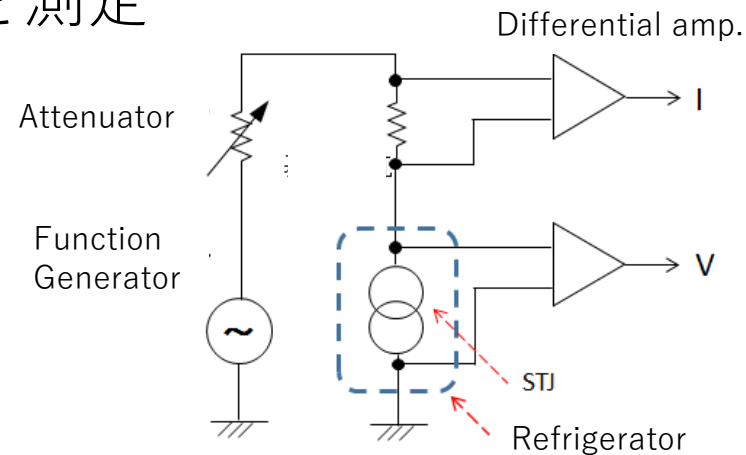
## 作成:

- KEEK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
  - フォトリソグラフィによるパターンニング
  - 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



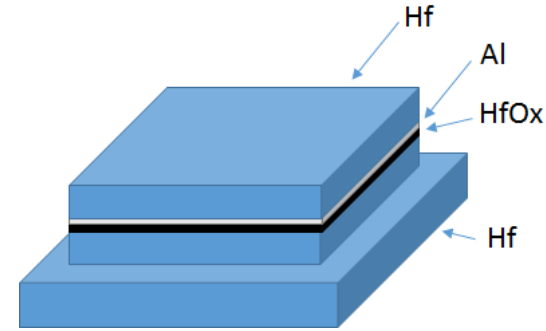
## 評価:

- 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

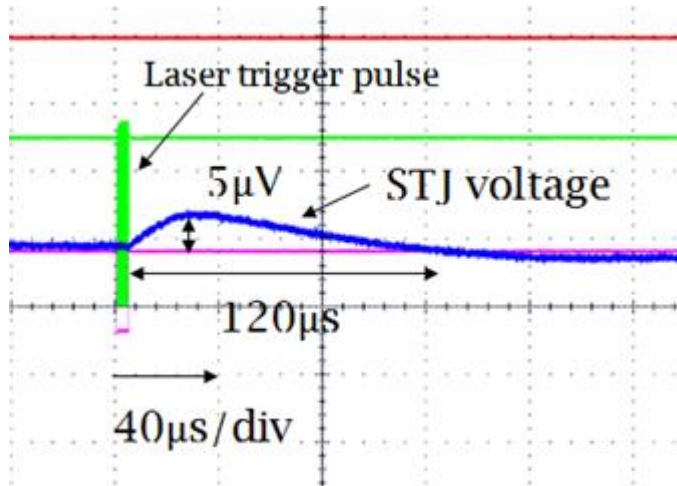




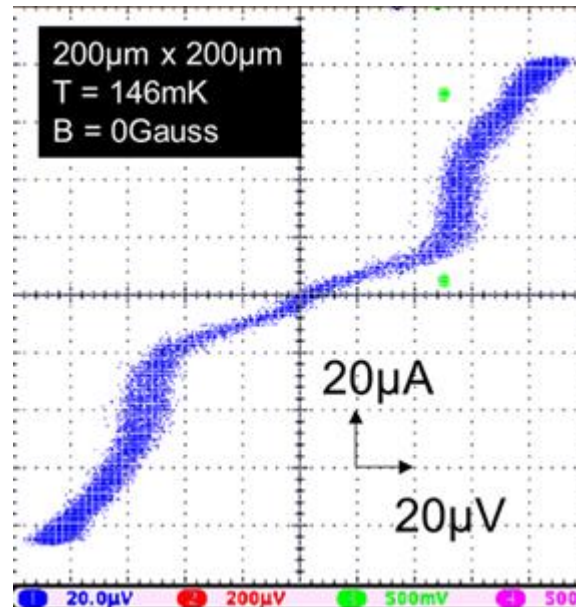
# これまでの成果



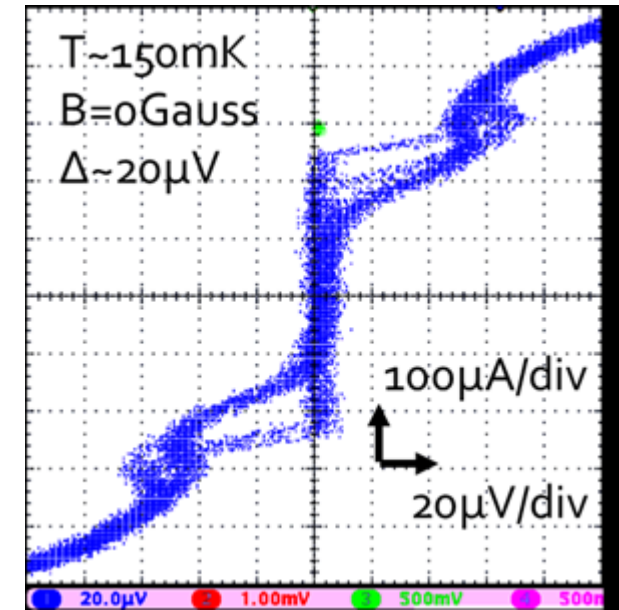
- 絶縁膜上に10nm程のAl層を追加したHf-STJにて漏れ電流の抑制 ( $5\mu\text{A}@140\text{mK}$ , 従来と比べて1/16)と可視光への応答を確認した。
- 絶縁膜の品質向上のため、Hf薄膜の表面粗さの改善を試みた。
  - 表面粗さを改善(RMS=2.6nm)することでHfのみを用いて、Al層を追加した素子と同等の漏れ電流を実現した。
  - さらに表面粗さを改善した(RMS=0.96nm)ものでは、漏れ電流は大きい ( $170\mu\text{A}@150\text{mK}$ )ものの、大きいジョセフソン電流を観測した。



Al層を追加したHf-STJの光応答



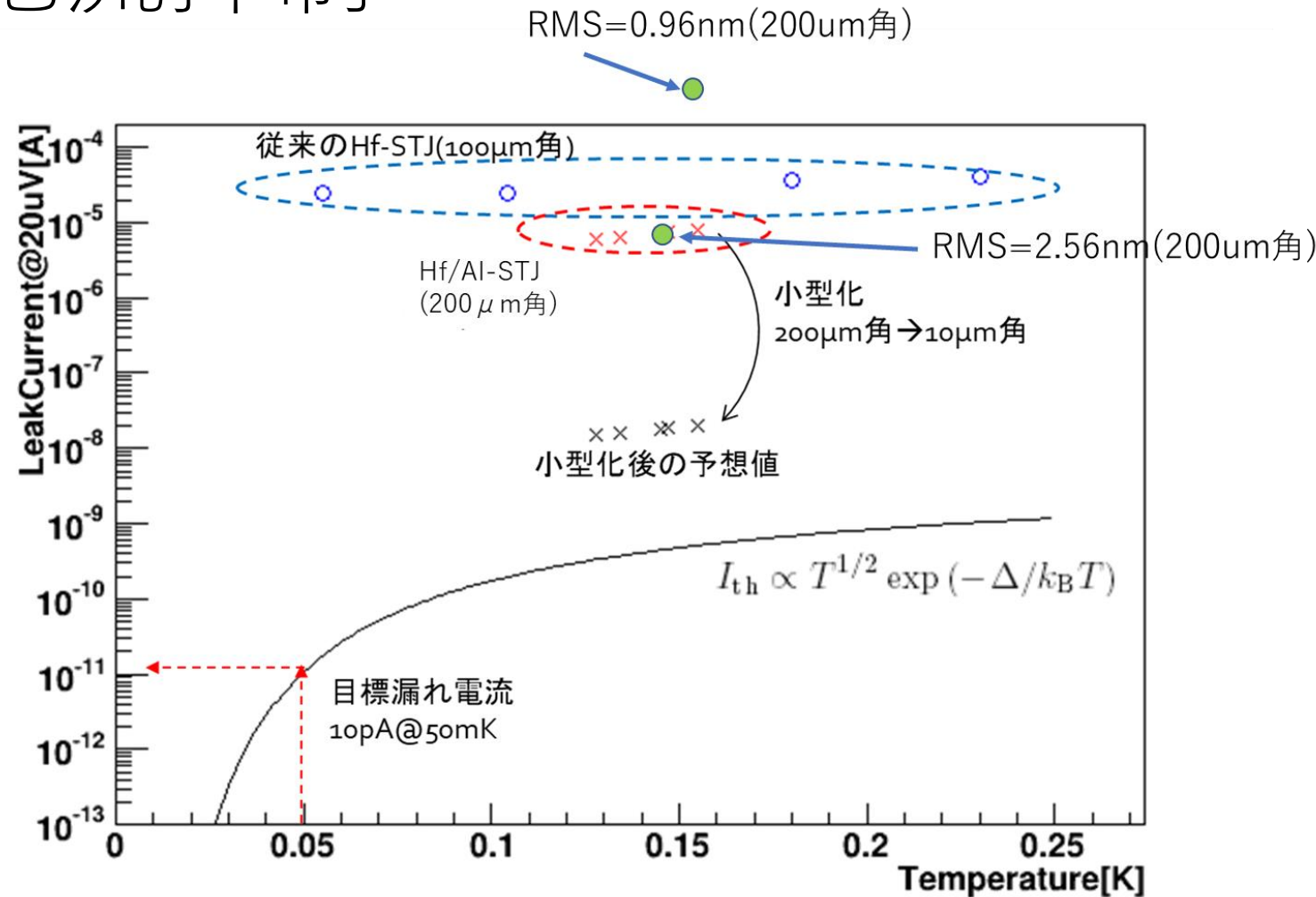
RMS=2.6nmの薄膜を用いたHf-STJ



RMS=0.96nmの薄膜を用いたHf-STJ

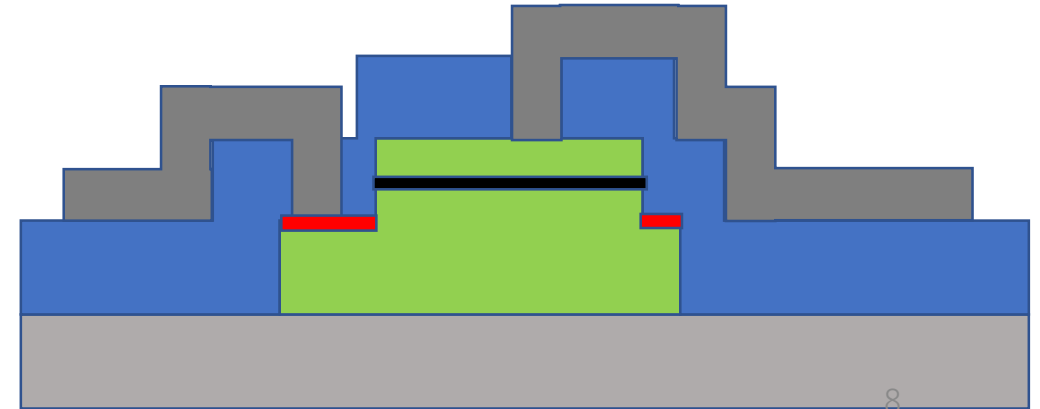
# 小型化による漏れ電流抑制

- Hf表面の粗さの改善や酸化条件の探索を行い漏れ電流の改善を図っている。
- それとは別に、小型化による漏れ電流の抑制を試行している。
- これまで200  $\mu\text{m}$ 角の素子を評価してきた。
- 小型化の効果を見るため10  $\mu\text{m}$ 角を新たに作成、評価した。



# 小型化するための問題点

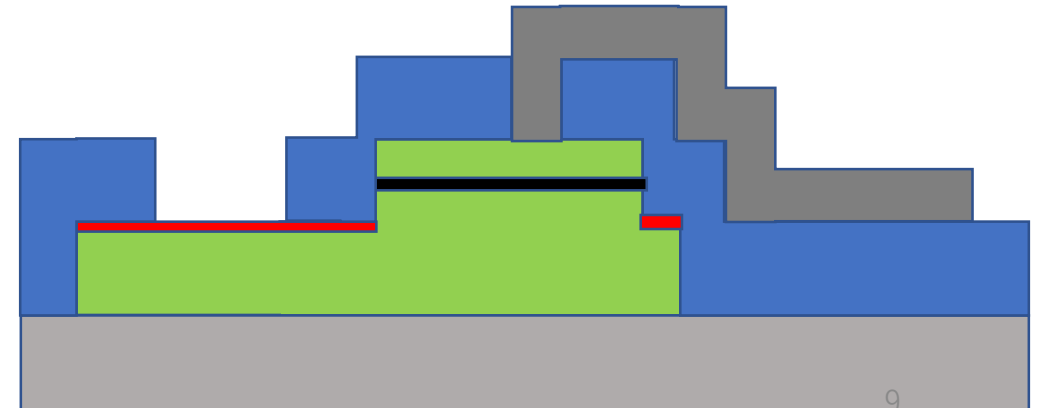
- HfはICP-RIEで形状加工するが、削った表面はフッ化Hfが生成されてしまう。
- 通常のSTJの構造では、下部電極の読み出し線との接触点に5nm程度のフッ化Hfが残ってしまい、導通が取れない。
  - 読み出し線形成前の逆スパッタでは貫通できない強度。
- そのため、読み出し線が付けられなかった。
  - これまで $200\mu\text{m}$ 角の素子は、下部・上部ともに素子に直接ワイヤーボンディングしていた。
  - $10\mu\text{m}$ 角にボンディングすることは困難なため測定できなかった。
- → 構造を変更することで対応。





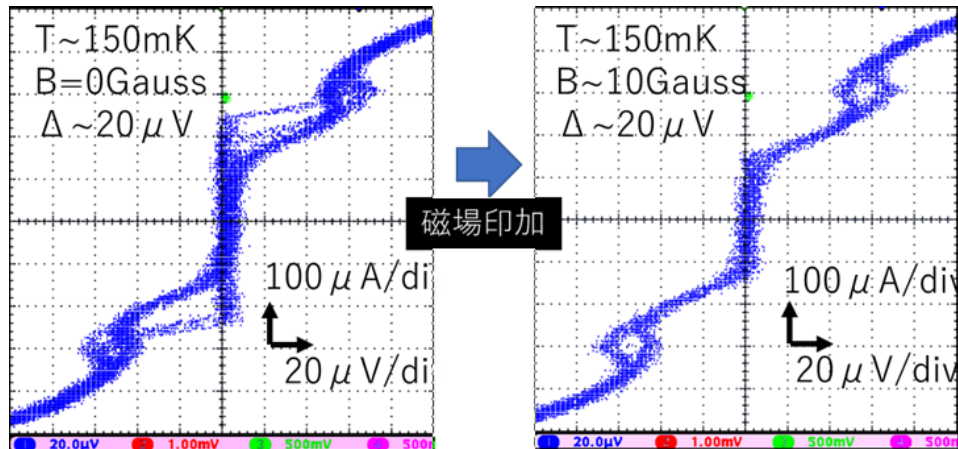
# 構造の変更

- ICP-RIEで生成されたフッ化Hfはワイヤーボンディングで貫通して導通が取れることを確認済み。
- 下部電極と一体化した読み出し電極を作成し、ボンディングでフッ化Hfを貫通することで導通をとれるようにした。
- これにより $10\mu\text{m}$ 角の測定が可能になった。

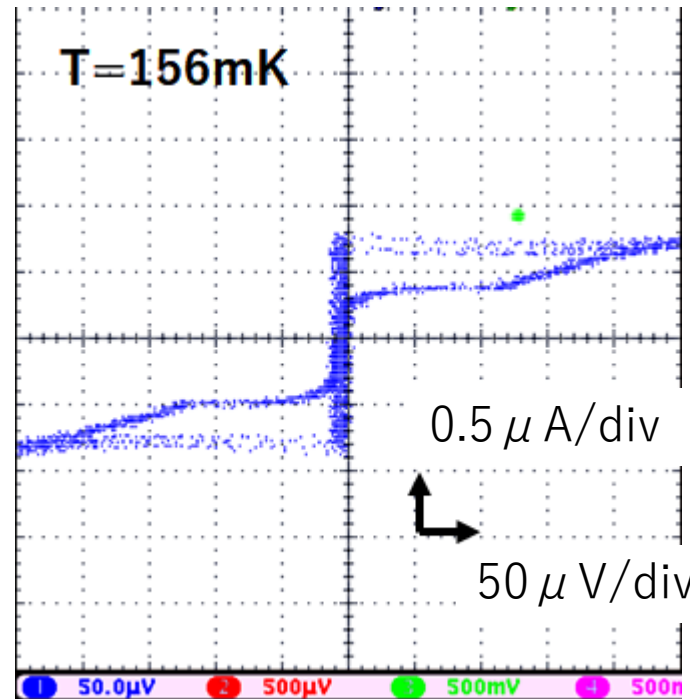


# 小型化による漏れ電流抑制

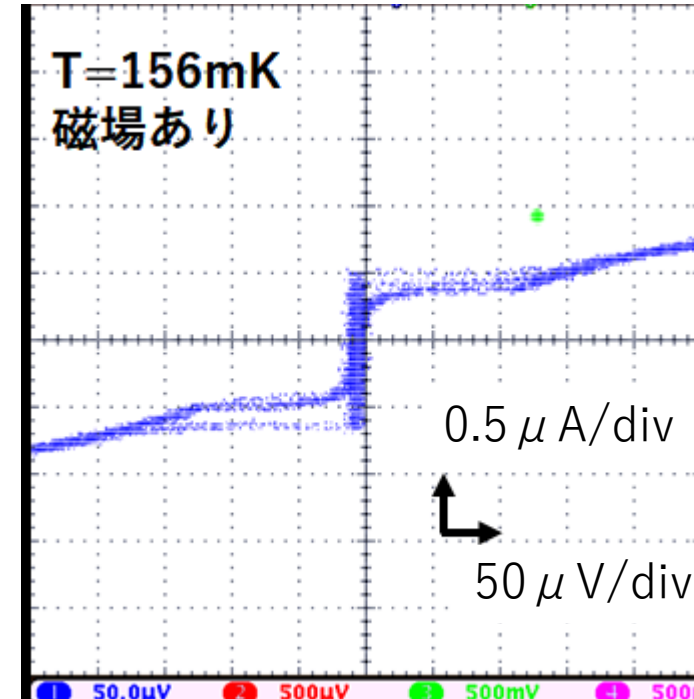
- 構造の変更により、配線付きで導通が取れている。
- 漏れ電流 $\sim 0.3 \mu\text{A}$ @ $20 \mu\text{V}$ 
  - 同条件で作成した $200 \mu\text{m}$ 角の素子と比較して、 $1/560$ に減少。(面積は $1/400$ )
- $\Delta = 50 \sim 100 \mu\text{eV}$  (ストレスか配線のNbの影響か)



同条件で作成した $200 \mu\text{m}$ 角の素子  
(読み出し配線なし)

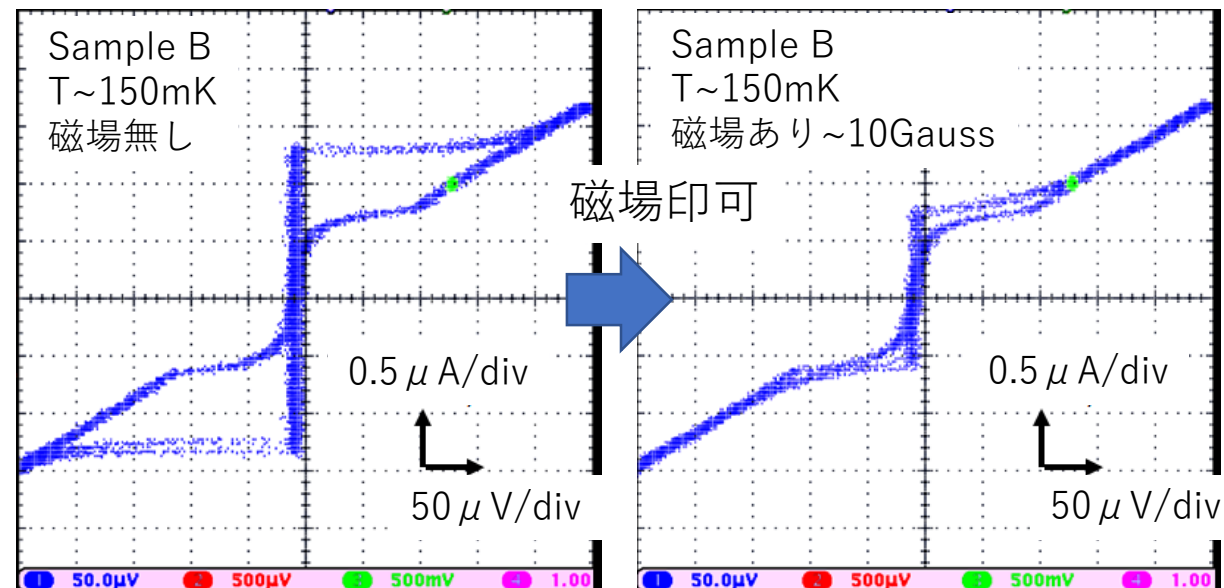
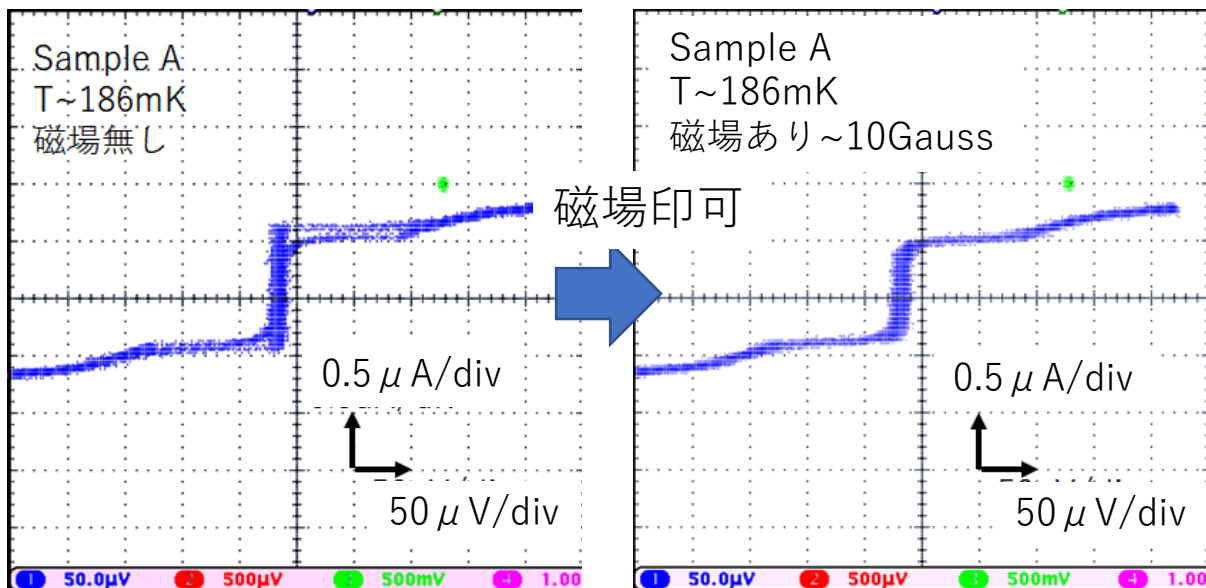


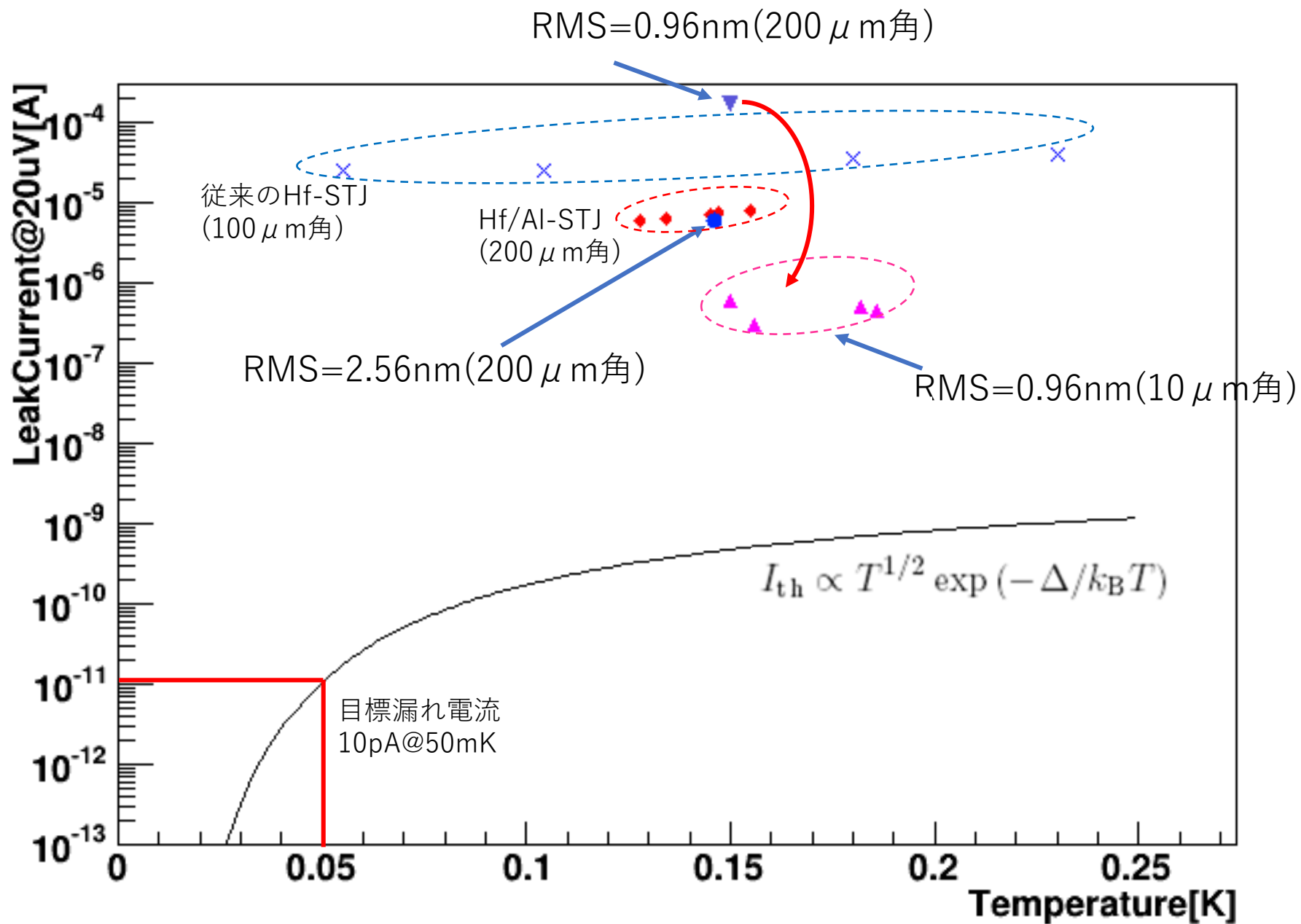
小型化した $10 \mu\text{m}$ の素子



# 小型化した素子を複数測定

- 同じ設計の $10\mu\text{m}$ 角の素子を複数測定し、同程度の漏れ電流になっていることを確認した。
  - Sample A:  $0.5\mu\text{A}$  ( $200\mu\text{m}$ 角と比較して1/400)
  - Sample B:  $0.6\mu\text{A}$  ( $200\mu\text{m}$ 角と比較して1/333)

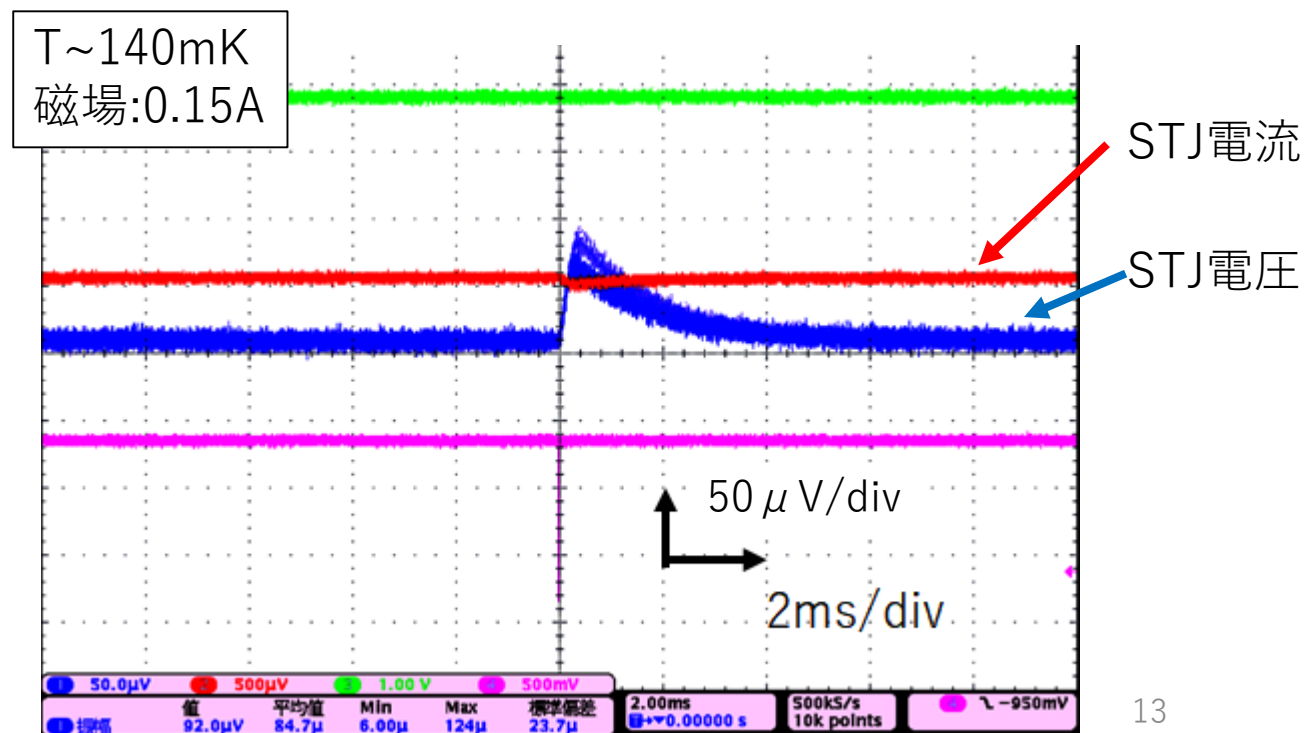
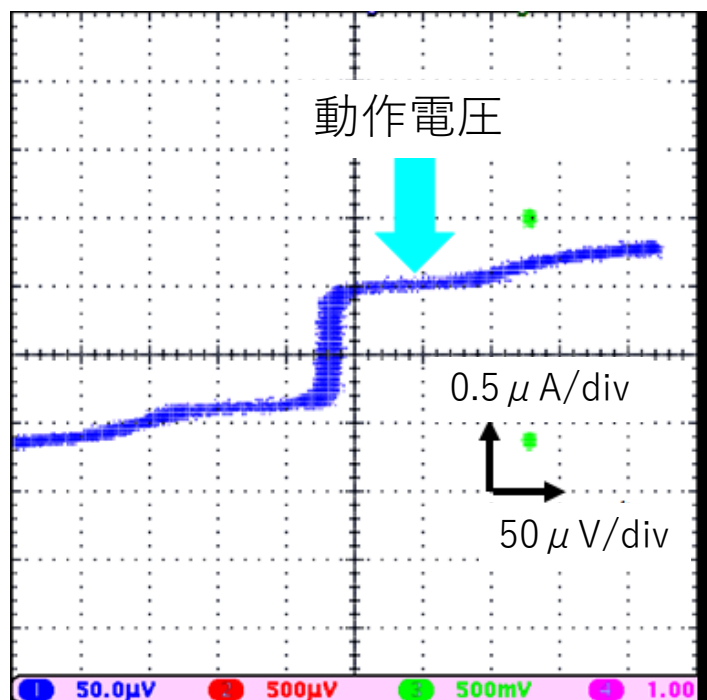




小型化により漏れ電流は小さくなるが、受光効率の低下が予想される。  
STJにアンテナを接続し、対処することを予定している。

# 光応答

- $\lambda = 465\text{nm}$ レーザーを光ファイバーを通してSTJに照射。
- DC光は
  - 出力弱いと反応みえず
  - 出力上げると超伝導破れる。
- STJにかける電圧を動かしても極性変わらず。
- 準粒子ではなく温度上昇による超伝導の破れが見えていると考えられる。





# まとめ

- 漏れ電流抑制のため、小型化した素子を作成・評価した。
- 漏れ電流は面積に反比例して減少しており、期待していた効果を示した。
- ストレスか読み出し配線を付けたためか、 $\Delta$ の悪化が見られた。
  - 原因調査中
- 素子の評価温度が $T_c$ ギリギリ付近のため、熱ノイズが非常に大きく光応答の評価が困難。
- より低温( $\sim 100\text{mK}$ )での評価を行う。
  - 筑波大学の希釈冷凍機の改善を進めている。
  - また、韓国太田のKAISTにサンプルを持っていき評価を行うことを予定している。