

COBAND実験のための Hf-STJ研究開発 I

1

武政健一, 金信弘, 武内勇司, 永田和樹, 笠原宏太, 八木俊輔, 若狭玲那, 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,
吉田拓生^D, 広瀬龍太^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

筑波大数理, 理研^A, KEK^B, 岡山大^C, 福井大学^D, 近畿大学^E, JAXA^F, 関西学院大学^G

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($E_\gamma \sim$ 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。

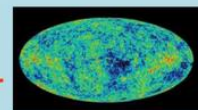
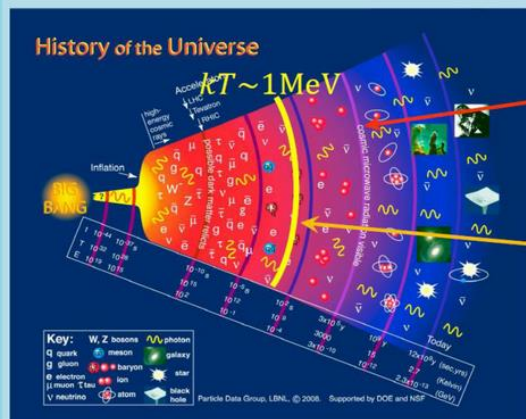


- 宇宙背景ニュートリノの存在の検証
- ニュートリノ質量の決定

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

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

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

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

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



COBAND実験webページ:

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

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: $E_\gamma = \frac{\Delta m_{32}^2}{m_3}$

- 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

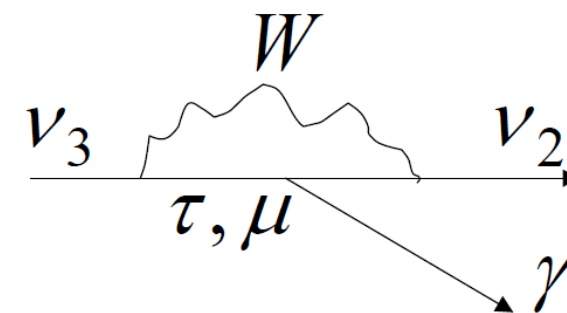
- $\nu_3 \rightarrow \nu_2 + \gamma$

- $\tau > 10^{43} \text{ years}$ (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測されている。)



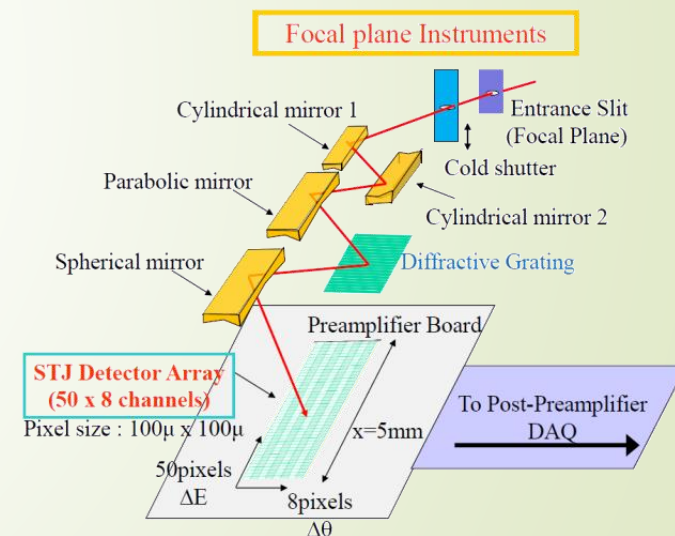
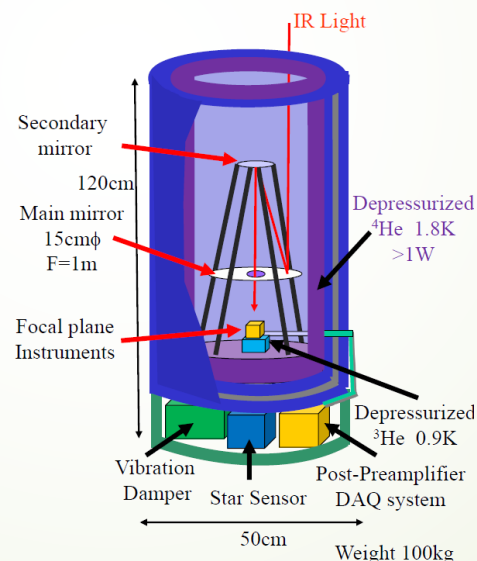
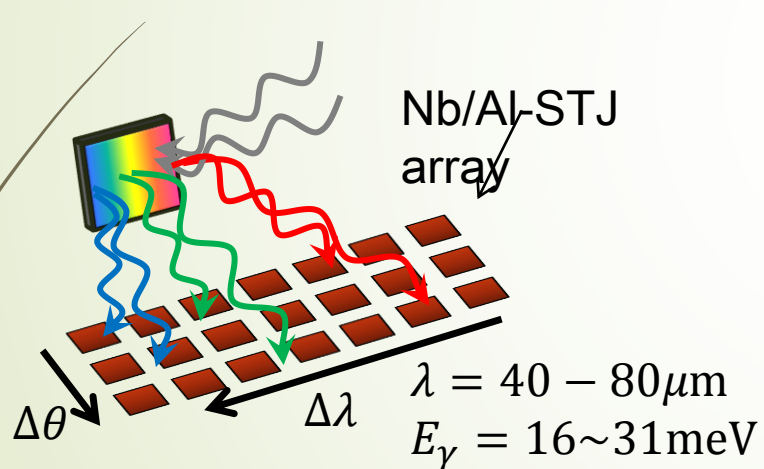
ニュートリノ崩壊ファインマン図

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 (2017年)

- 上空200kmで200secのデータ収集を行う。
- ニュートリノ (ν_3) 寿命の下限值を現在の値より2桁ほど改善できる ($\sim 10^{14}$ years).
- 使用する検出器：回折格子で分光し、Nb/Al-STJアレイでカウントする。

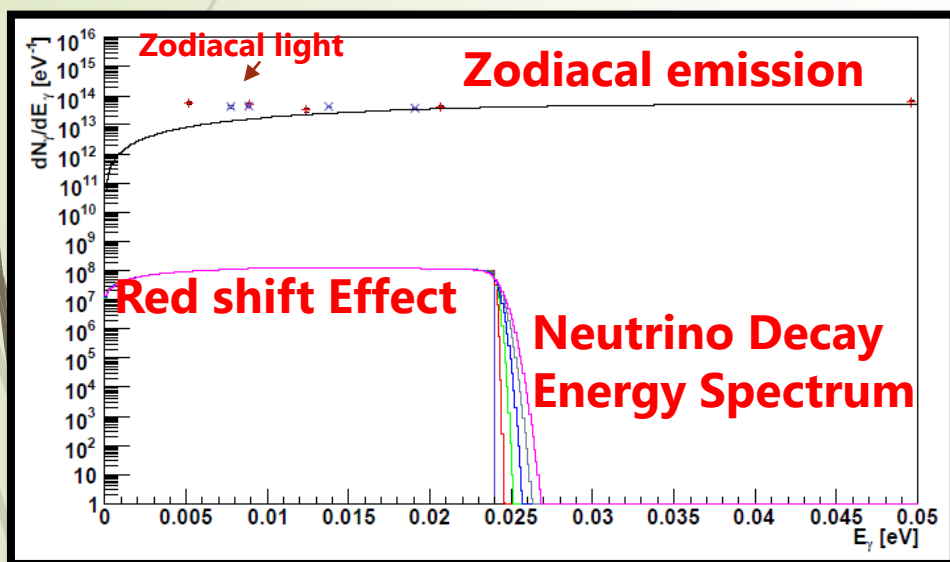


■ 衛星実験 (2020以降)

- 予想感度: $\tau(\nu_3) \sim 10^{17}$ years
- 使用する検出器：Hf-STJ

衛星実験

- 直径20cm, 視野角 0.1° の望遠鏡を使用して、光検出器へ宇宙赤外線を集光する。
- 測定時間 $\sim 10\text{H}$
- 黄道光がメインバックグラウンドとなる。
- ニュートリノ崩壊で発生する光子は、エネルギーの高い側にエッジを持つのでそれを見つけ出す。



← 予想される光子と背景事象(黄道光)のエネルギースペクトル

- $m_3 = 50\text{meV}$ を仮定 $\rightarrow E_\gamma \sim 25\text{meV}$

■ 検出器への要求:

スペクトルのエッジを捉えるため、

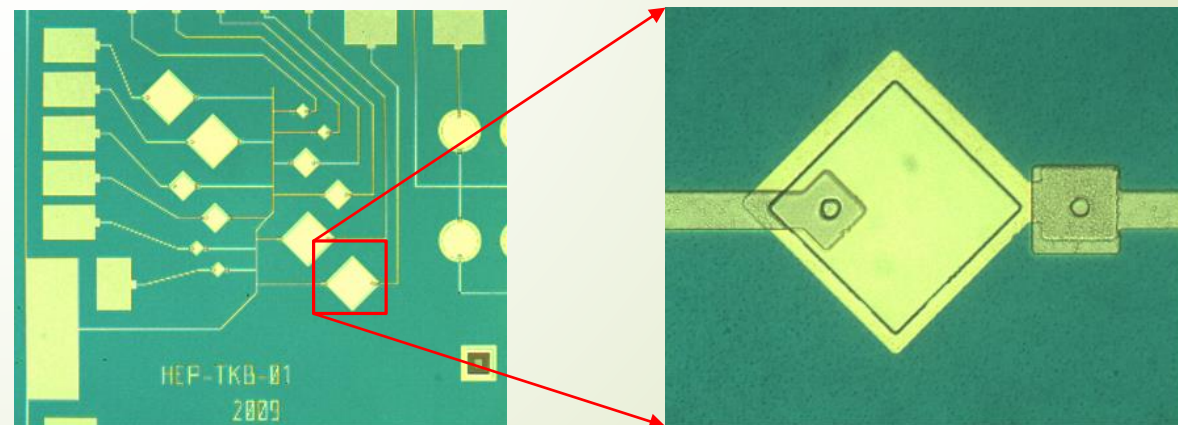
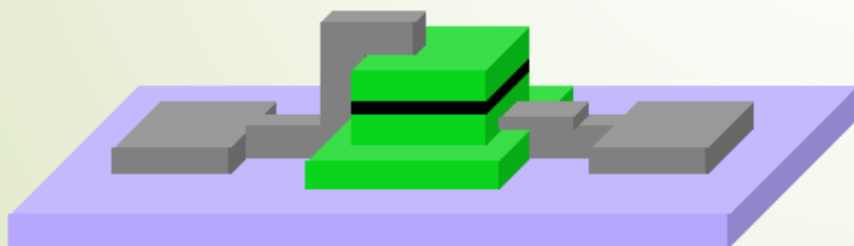
- $E_\gamma \sim 25\text{meV}$ 付近のエネルギースペクトルを連続的に測定可能
- $\Delta E/E < 2\%$ のエネルギー分解能

→ Hf-STJの開発

ニュートリノ崩壊の予測分布は検出器の
エネルギー分解能毎に色を変えてプロットしている。
左から順に0%から5%まで1%刻みで変化している。

Superconducting Tunnel Junction (STJ)

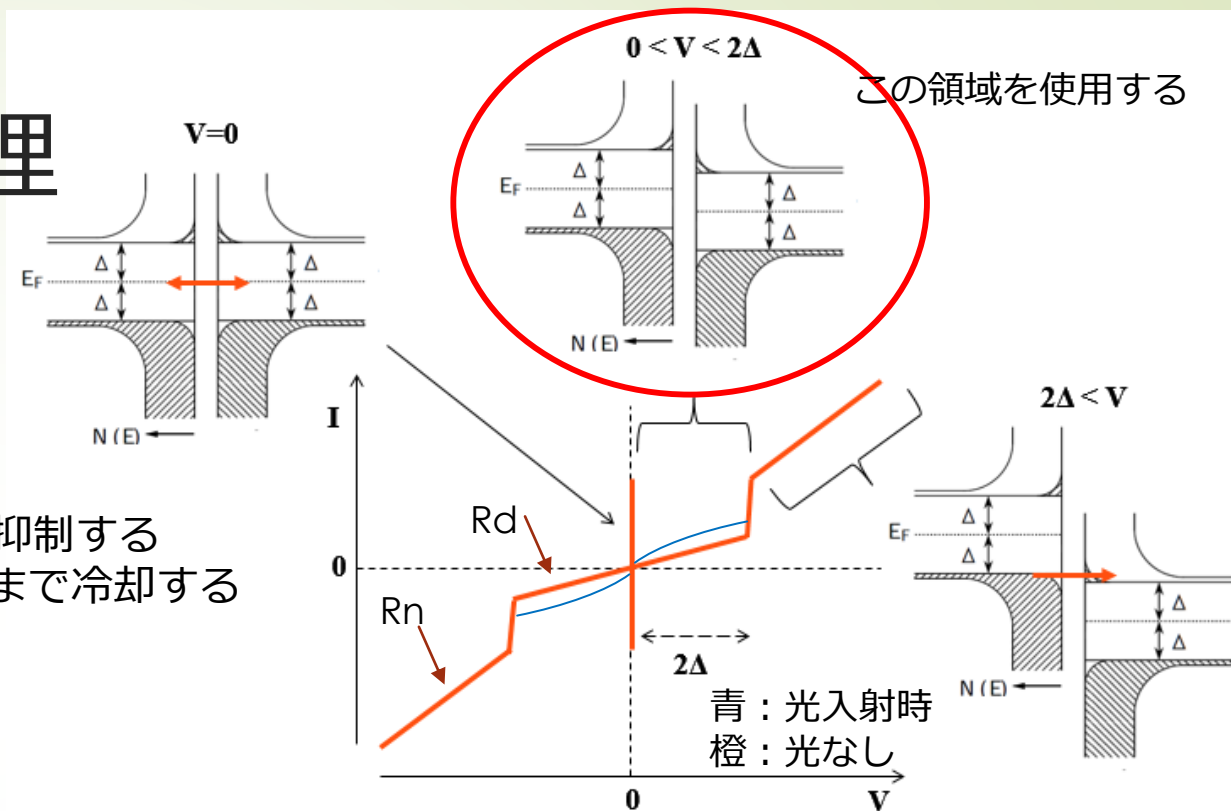
- 超伝導体を用いた光検出器
- キャリア生成に必要なエネルギーが小さいため、エネルギー分解能に優れる
- 構造
 - 超伝導体/絶縁膜(トンネルバリア)/超伝導体という構造のジョセフソン素子
 - 大きさ：縦横 数10～数100 μm 角 × 高さ 数100nm
 - 絶縁膜は厚さ数nm程度



STJのIV特性・動作原理

動作時には、

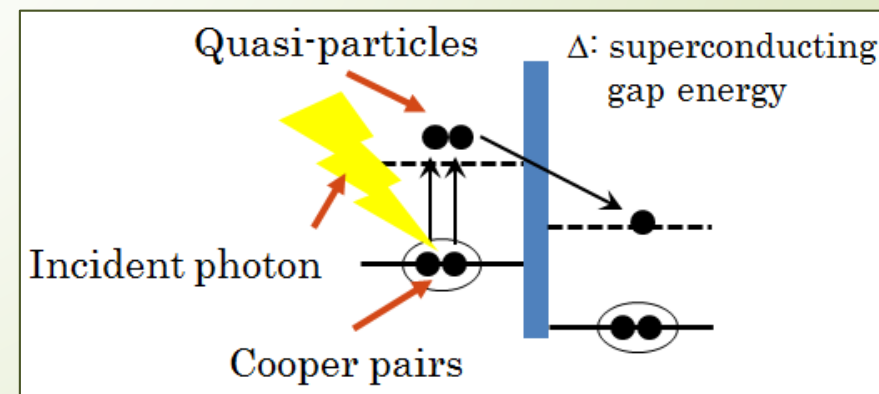
- ・絶縁膜に平行に磁場をかけ、ジョセフソン電流を抑制する
- ・熱励起による漏れ電流を抑制するため、 $T_c/10$ 程度まで冷却する
- ・上下電極に $0 < V < 2\Delta$ の電圧をかける



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



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

- 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	0.13	0.021

Tc: 超伝導転移温度

熱ノイズを抑制するためTcの1/10以下で使用する

- $N_{q.p.} = 25\text{meV}/1.7\Delta = 700$

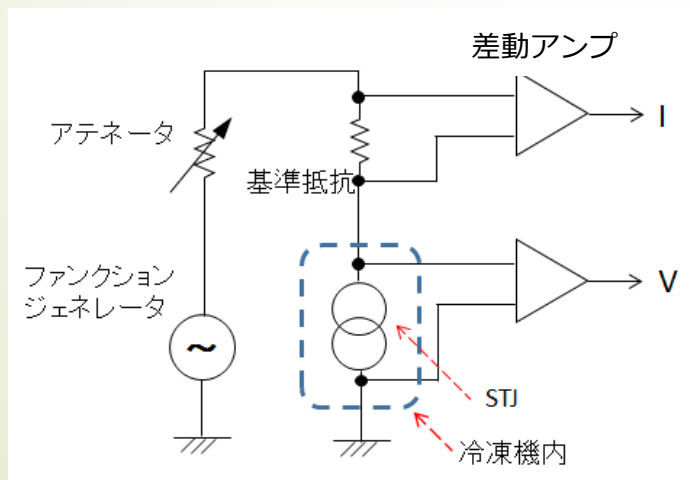


- ファノ因子にNbと同じ0.2を仮定すると2%のエネルギー分解能を達成できる。
- 漏れ電流への要求値: $R_d > 2\text{M}\Omega$ (ファノ因子0.2, 信号幅1 μs の場合)

- Hf-STJはニュートリノ崩壊の観測に必要な要求を満たすことができる。

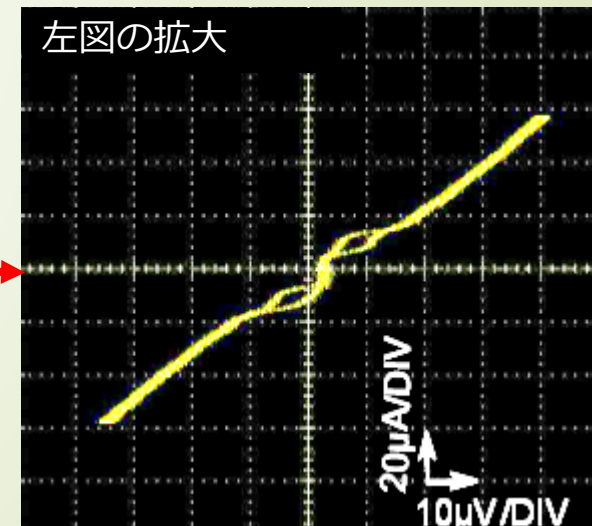
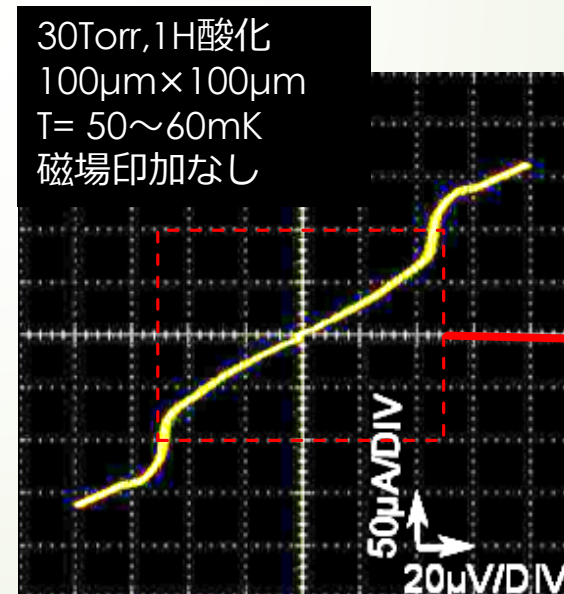
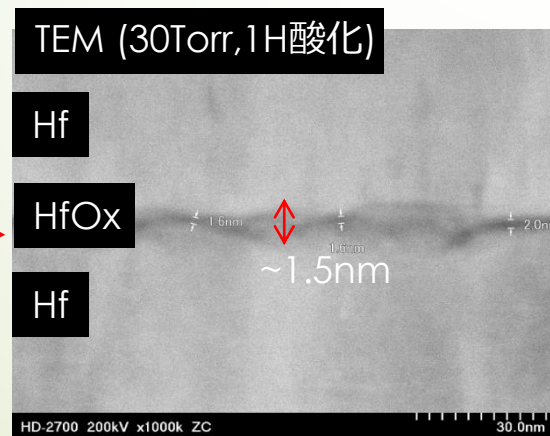
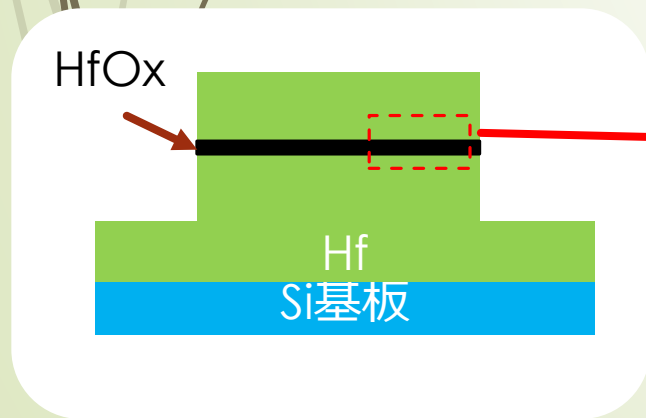
Hf-STJの作成・評価環境

- 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。



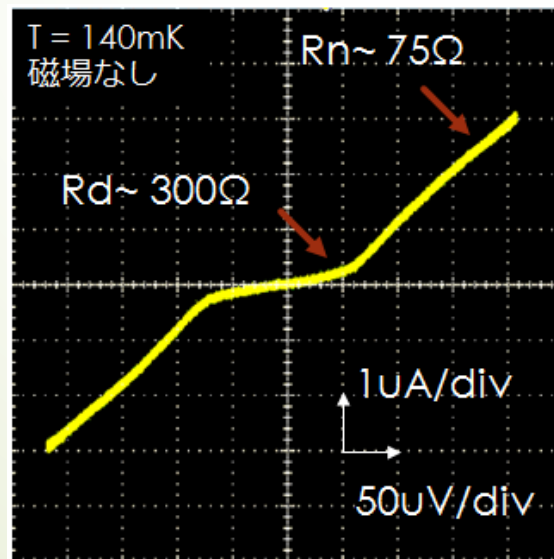
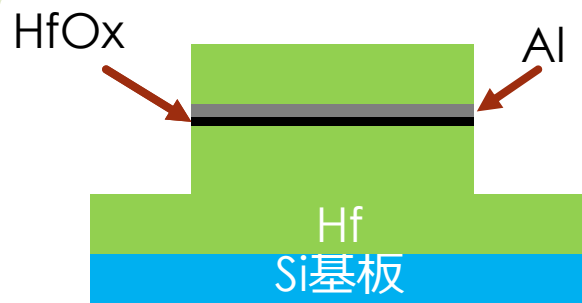
これまでの経過(1)

- **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程度できているが、漏れ電流が大きい($R_d \sim 0.8\Omega$)
- 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



これまでの経過(2)

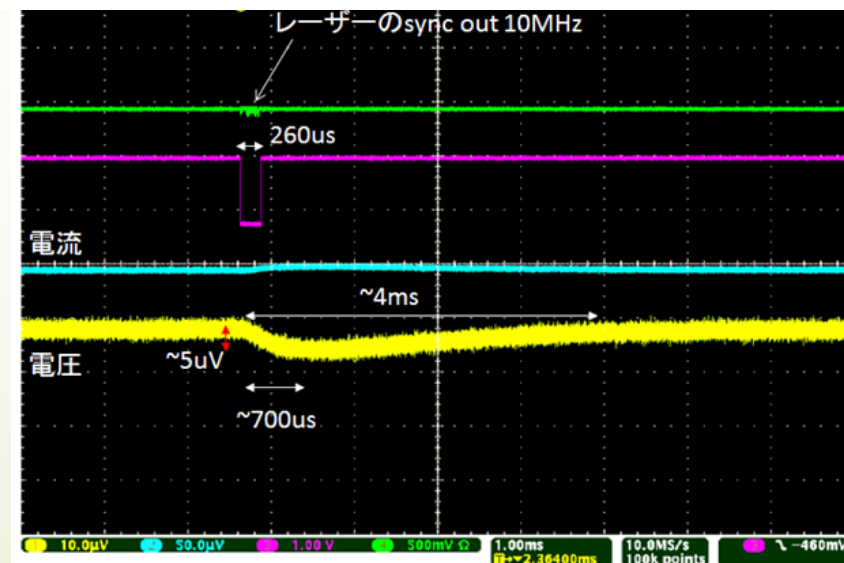
- **Hf/Al素子**：トンネルバリア上にAlを成膜したサンプル (200 μ m角)
 - Hf/Al/HfOx/Hf = 250nm/10nm/1.5nm(熱酸化30Torr,1H)/300nm
- Rd領域でのリークが改善。(Rd \sim 300 Ω)
- 変極点が60 \sim 200 μ V付近にあり、Alの近接効果を受けている。 } エネルギー分解能が悪化
- 磁場の有無によらず、ジョセフソン電流が現れない。 }
- 光応答がみられたが応答が遅く、
レーザー照射による温度上昇が見えていると考えられる。 } 信号が通りにくい



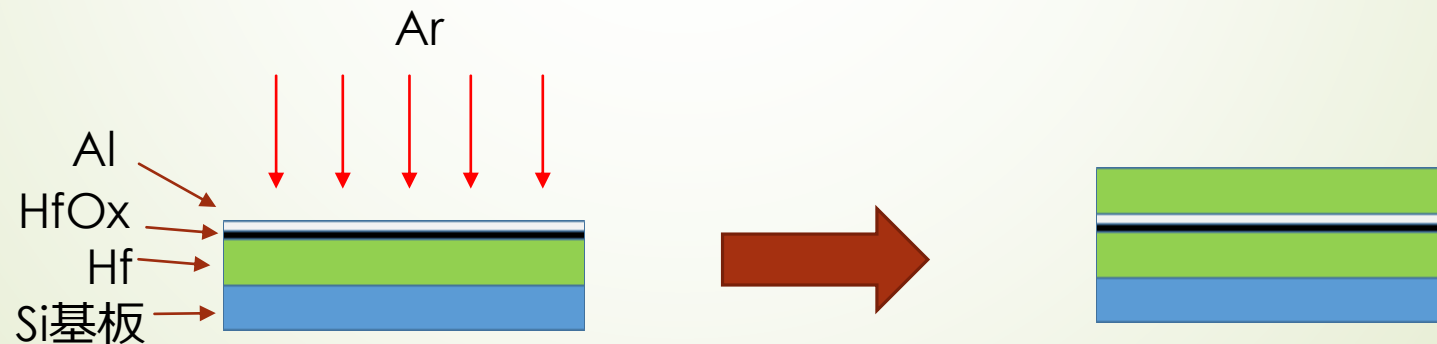
パルス光応答

波長：465nm

1s毎に260us, 10MHzの発信 \rightarrow 1回当たり2600パルス



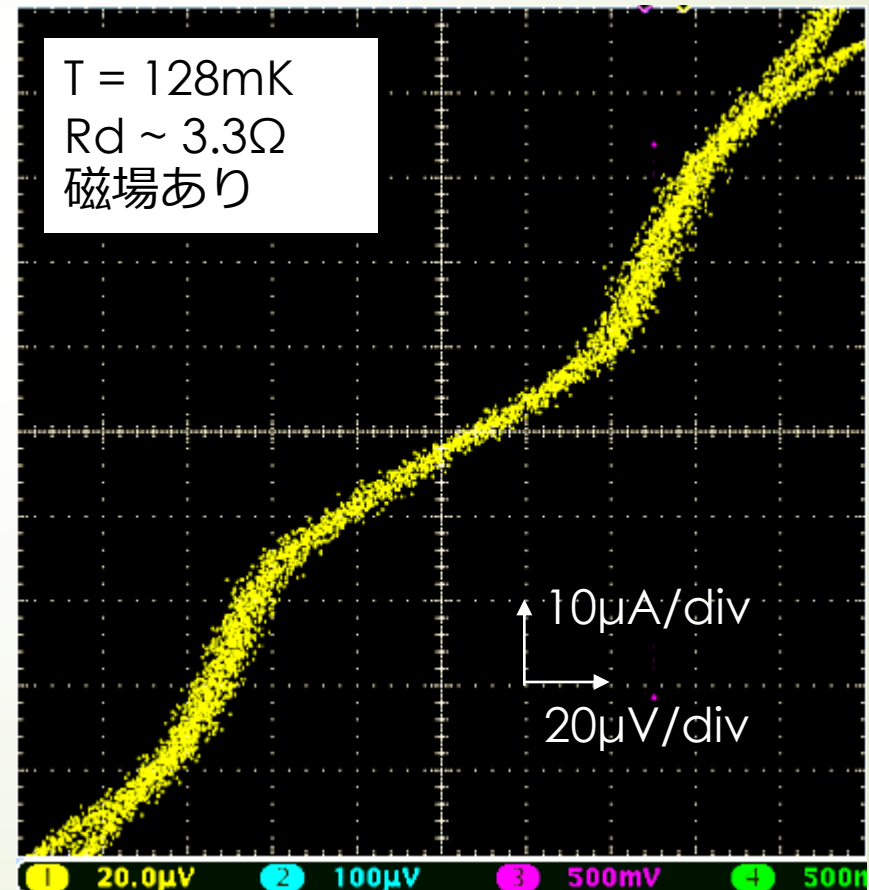
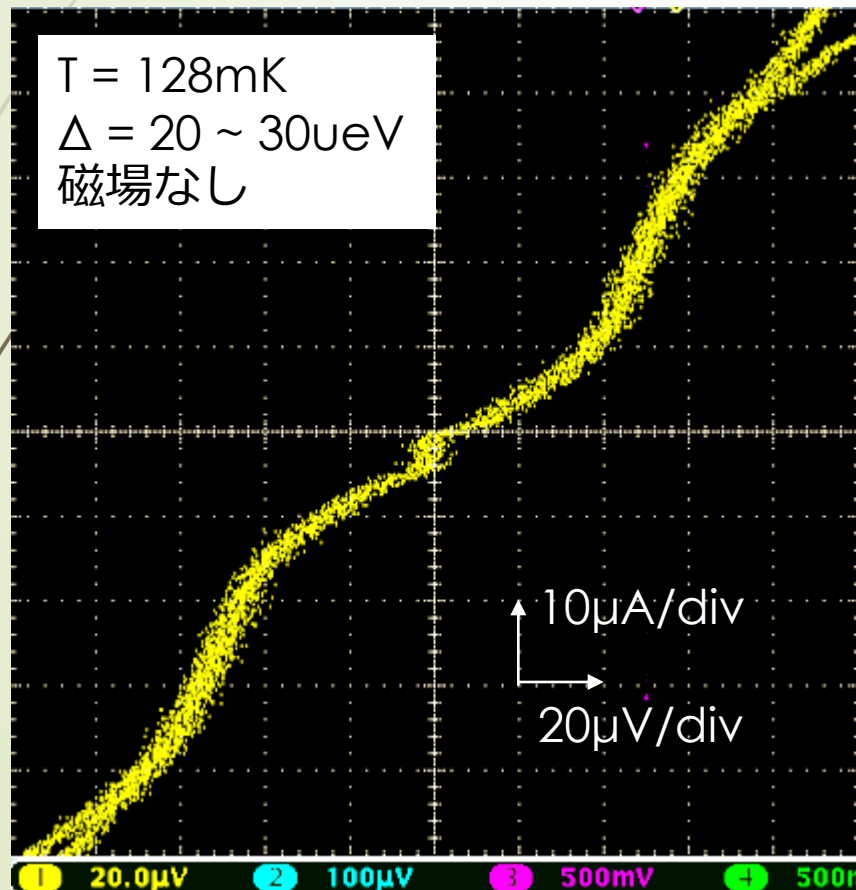
- pure Hf素子とHf/Al素子の良い所取りを目指し、絶縁膜上のAlの厚さを調整した素子を作成。
 - Hf/Al/HfOx/Hf = 250nm/ ? nm/1.5nm(熱酸化30Torr,1H)/300nm
 - Alを10nm成膜後、ArプラズマでAlを削り薄くする。
- Alを薄くすることにより
 - 信号のトンネル確率を上げる。
 - 近接効果によるバンドギャップの増加を抑制。



エッチング後に上部のHf層を形成。
同一の真空装置中で行い、大気にはさらさない。

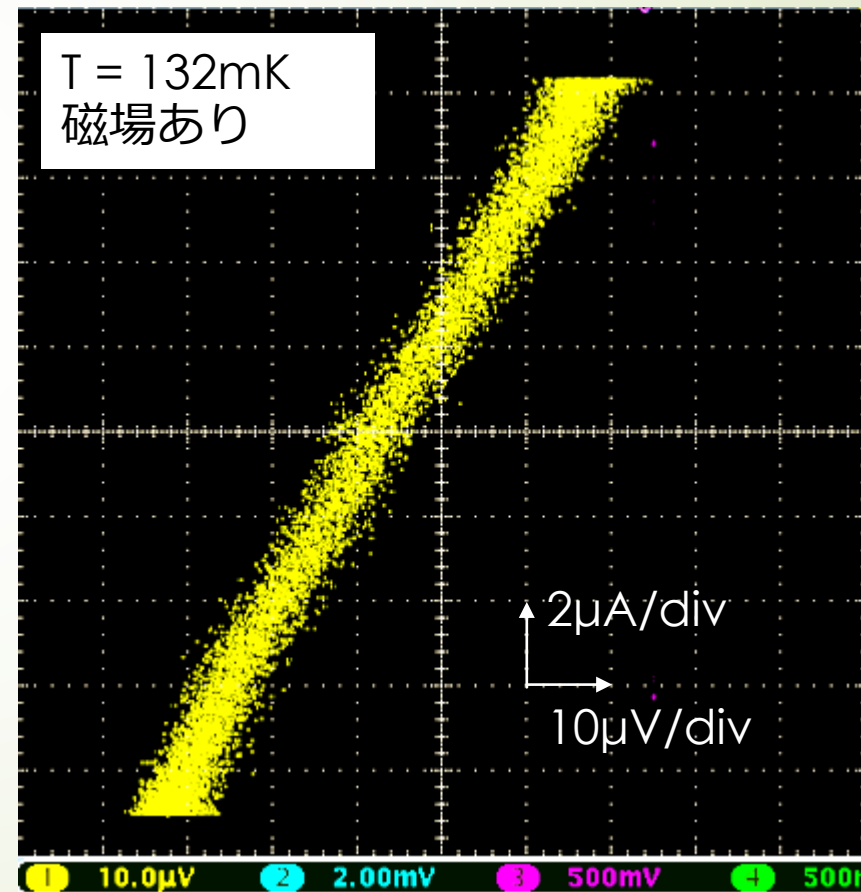
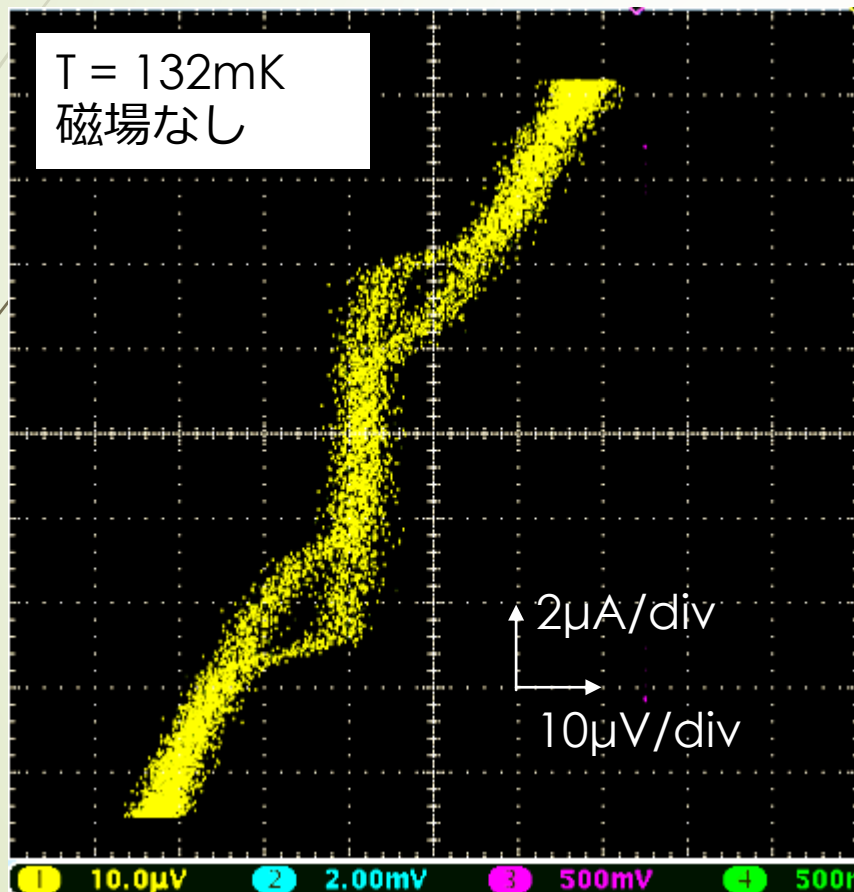
新作サンプルのIV特性

- STJ特有のIV特性を示した。
- 変極点はHfと同程度のバンドギャップを示している。→ Alの近接効果が抑制された。
- 超伝導転移温度は170mK付近



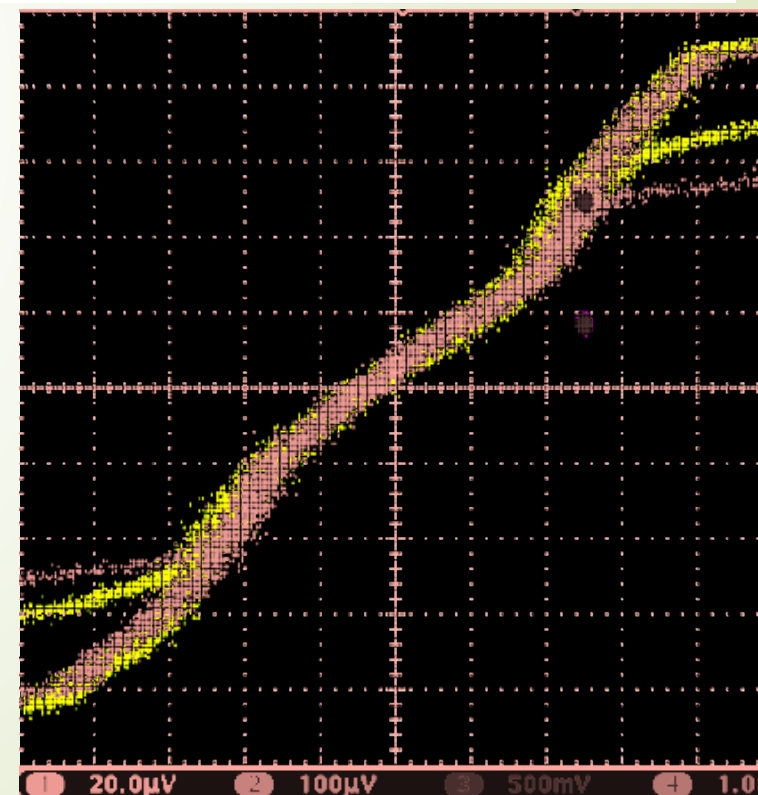
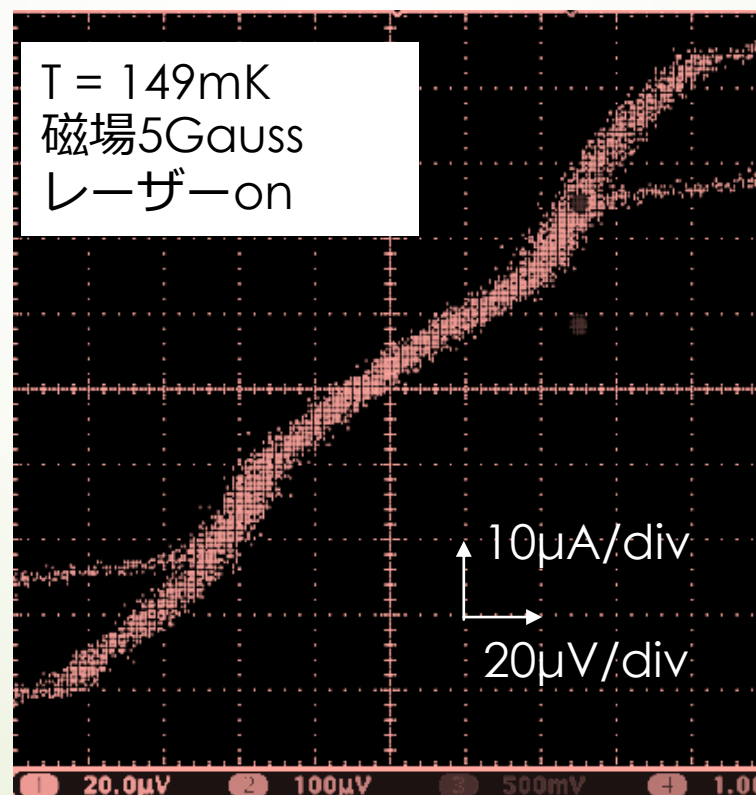
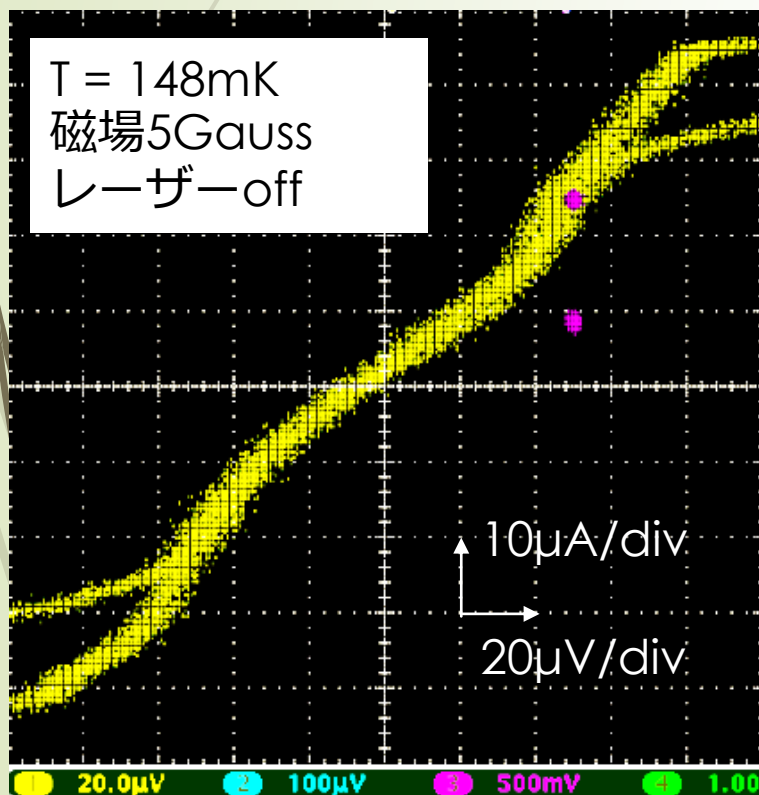
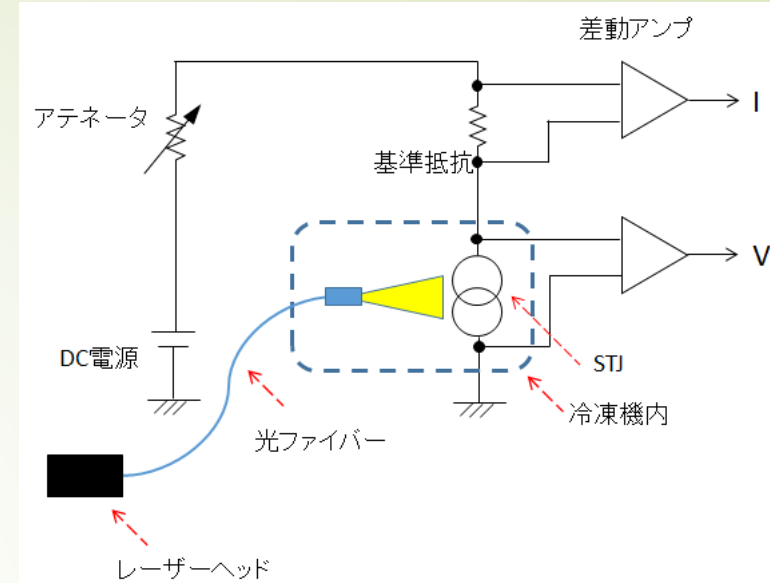
新作サンプルのIV特性

- 前頁の原点付近拡大
- 磁場印加によりジョセフソン電流が抑制されることを確認した。(約5Gauss)



光応答(1)DC光応答

- レーザー光に反応してIV特性に変化が現れた。
 - 波長：465nm
 - 発振周波数：1kHzで照射

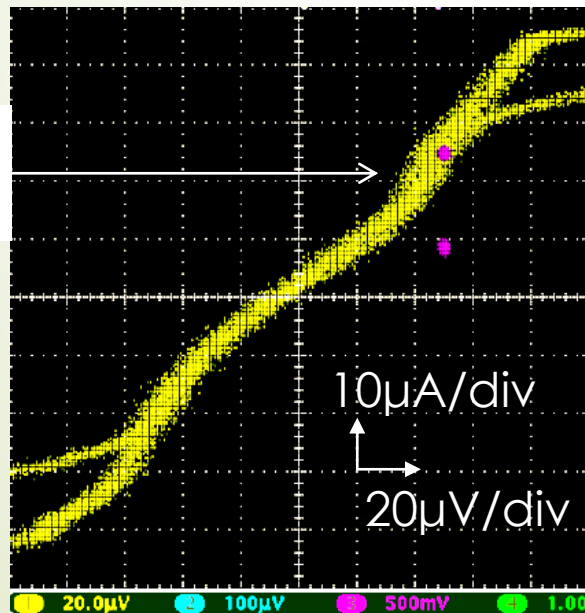


光応答(2)パルス光応答

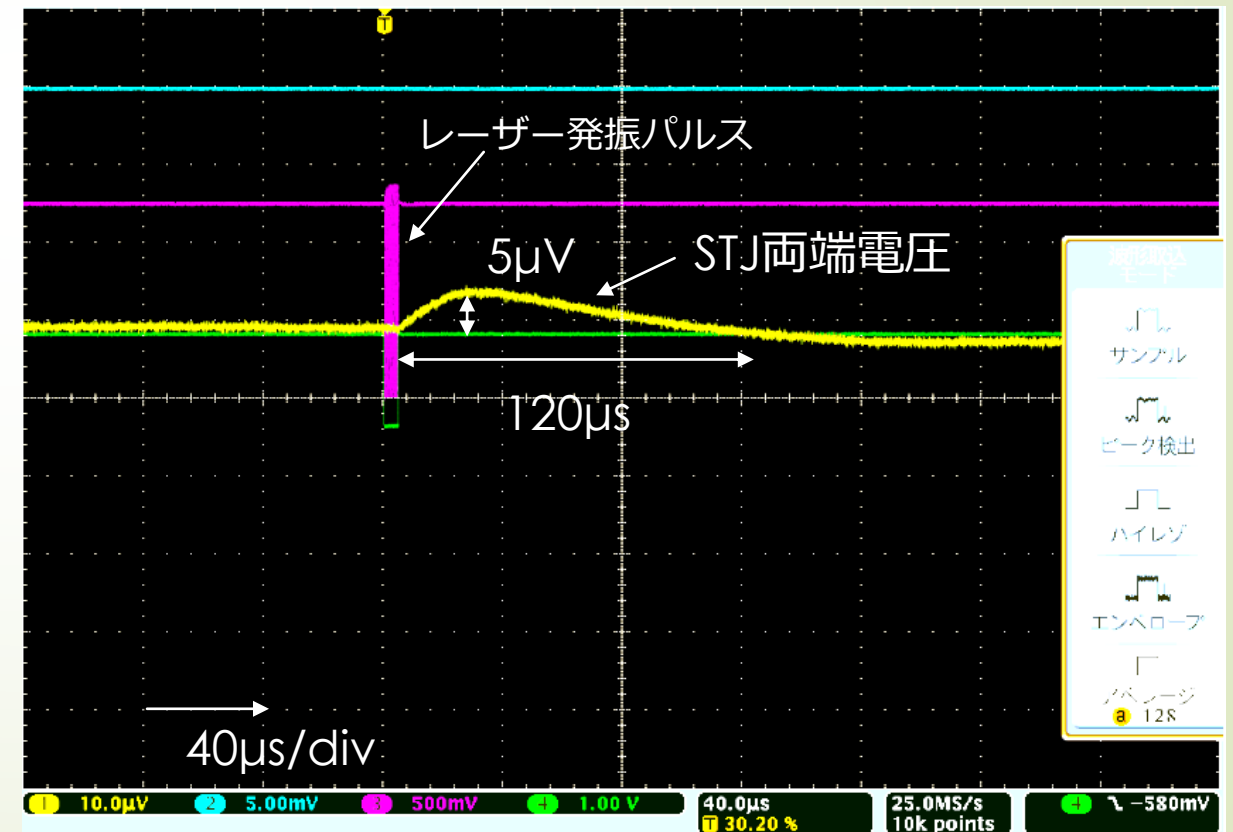
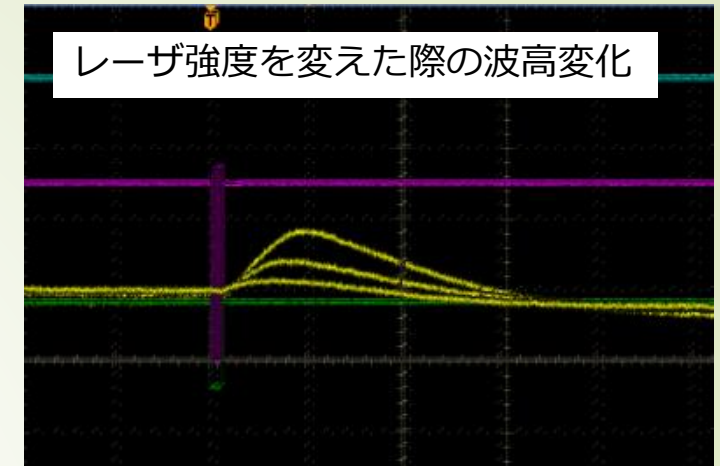
パルス光を照射

- 波長：465nm
- 100ms毎に5 μ s, 5MHzの発振 → 1回あたり25パルス
- 下部電極が非常に広いため、電荷収集時間が長くなっている可能性がある。
(下部電極を小型化したもので確認する予定)

定電流で動作させた
測定時の電流値



レーザ強度を変えた際の波高変化



まとめ

- COBAND(宇宙背景ニュートリノの崩壊探索)実験の衛星実験に用いる高感度光検出器としてHf-STJの開発を行っている。
- Hf/Al素子のAl厚の調整を行い、以下の成果を得た。
 - 漏れ電流がpure Hf素子の1/4を達成。(サイズ比を考慮すると1/16)
 - Alの近接効果によるバンドギャップの増加を抑制。 $(\Delta=20\sim30\mu\text{eV})$
 - 従来のHf/Al素子では見えなかったジョセフソン電流が観測された。
 - レーザー光応答を確認した。
- 今後は、より漏れ電流の小さい素子を実現するため、HfO_xの形成パラメータ、Alの厚みの最適条件の探索を行い、良質なトンネルバリアの形成を目指す。