

超伝導トンネル接合素子STJを用いた光・量子計測

金 信弘 (筑波大学数理物質系, CiRfSE)

於 つくば国際会議場

2016年11月10日

For COBAND Collaboration

金 信弘, 武内勇司, 武政健一, 永田和樹, 笠原宏太, 先崎蓮, 森内航也, 八木俊輔, 若狭玲那, 大塚洋一 (筑波大学), 池田博一, 和田武彦, 長勢晃一 (JAXA/ISAS), 新井康夫, 倉知郁生, 羽澄昌史 (KEK), 大久保雅隆, 浮辺雅宏, 志岐成友, 藤井剛 (産総研), 松浦周二 (関西学院大学), 石野宏和, 樹林敦子 (岡山大学), 美馬 覚, 木内健司 (理化学研究所), 吉田拓生, 廣瀬龍太, 浅野千沙, 加藤圭騎, 辻 紘也 (福井大学), 加藤幸弘 (近畿大学), 川人祥二 (静岡大学), Erik Ramberg, Mark Kozlovsky, Paul Rubinov,, Dmitri Sergatskov (Fermilab), Soo-Bong Kim (Seoul National University)

宇宙史国際研究拠点

Research Core for the History of the Universe

数理物質融合科学センター

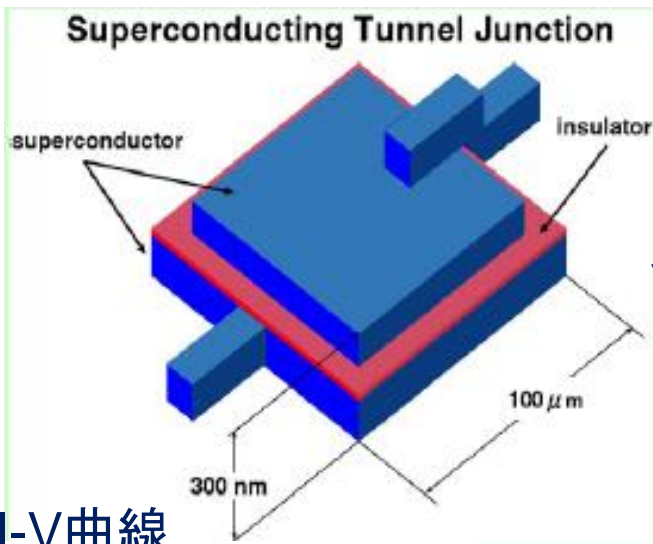
Center for Integrated Research in Fundamental Science and Engineering, University of Tsukuba



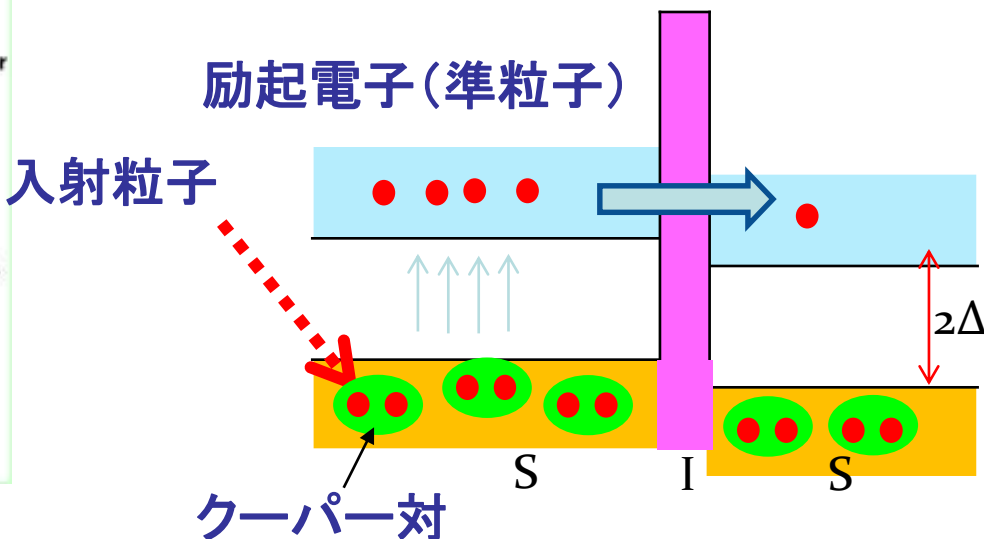
超伝導トンネル接合素子検出器

STJ (Superconducting Tunnel Junction) Detector

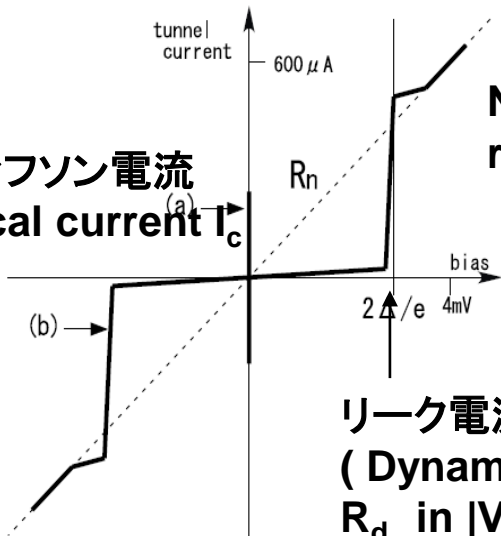
超伝導膜 / 絶縁膜 / 超伝導膜 ジョセフソン結合



STJ I-V曲線



ジョセフソン電流
Critical current I_c



Normal resistance
 R_n in $|V| > 2\Delta/e$

リーク電流
(Dynamic resistance
 R_d in $|V| < 2\Delta/e$)

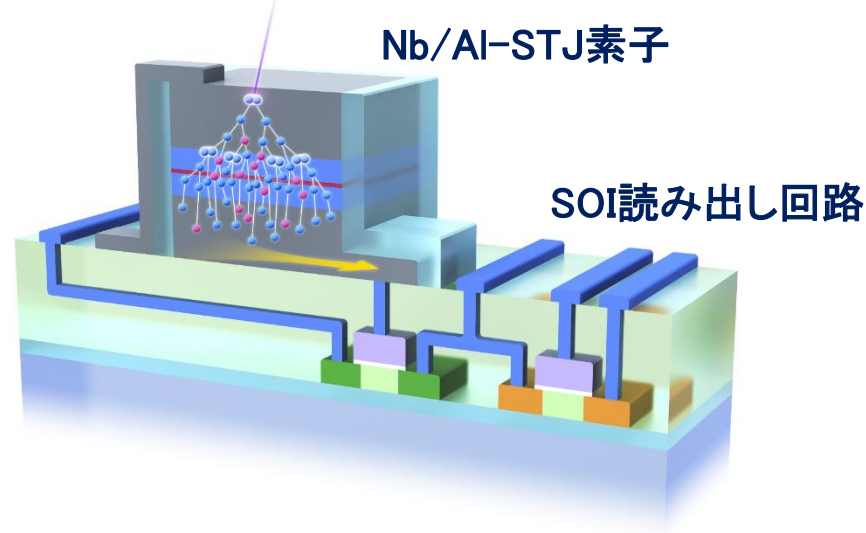
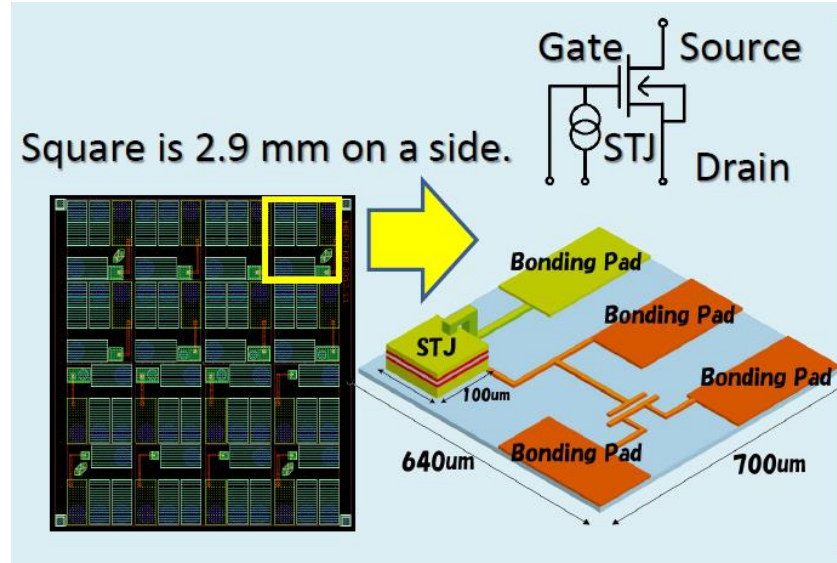
エネルギーギャップ Δ が、通常の検出器 (半導体検出器等) に比べて桁違いに小さい

⇒ 低エネルギー放射線を高エネルギー分解能で一光子ごとに測定できる

	Si	Nb	Al
Tc[K]		9.23	1.20
Δ [meV]	1100	1.550	0.172

超伝導トンネル接合素子STJ検出器の開発

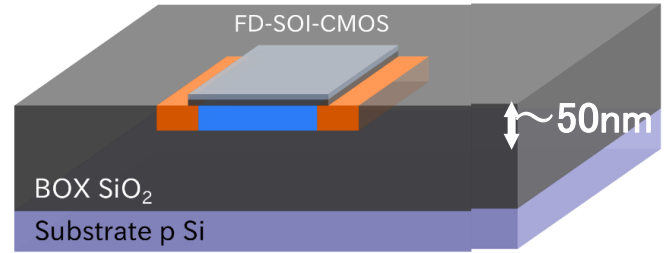
1. **SOI-STJ:** 筑波大, KEK, 産総研等との共同研究で, SOI(Silicon-On-Insulator)技術を用いた極低温増幅器と超伝導トンネル接合素子STJを一体化したSOI-STJ検出器を開発中



© Rey.Hori / KEK

+ SOI (Silicon-On-Insulator) 技術
MOSFET4Kで動作
(by T. Wada (JAXA) et al. J. Low Temp Phys. 167 602 (2012))

+ SOI回路と一体化したSTJ検出器
Nb/Al-STJをSOI回路基板上に作成



FD-SOI -MOSFET

SiO₂絶縁膜上にMOSFETを形成→非常に薄いチャンネル層
3K以下の極低温でも動作

2. **Hf-STJ:** 筑波大, KEK等との共同研究で, Hfを用いた超伝導トンネル接合素子 Hf-STJを開発中

宇宙背景ニュートリノ崩壊探索への応用

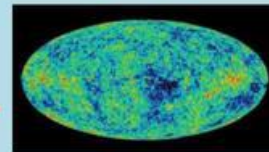
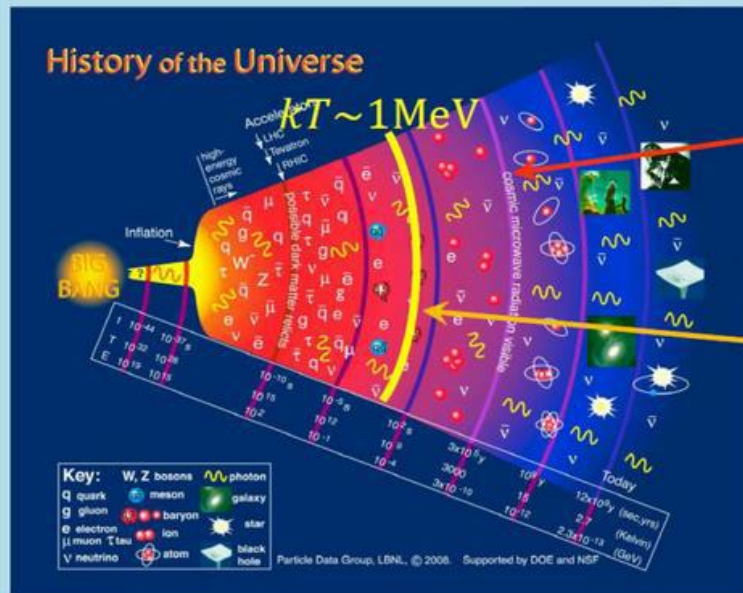
宇宙背景ニュートリノ崩壊探索

COBAND

数理物質融合科学センター宇宙史国際研究拠点が強力に推進するプロジェクト



Cosmic Background Neutrino Decay Search



CMB

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

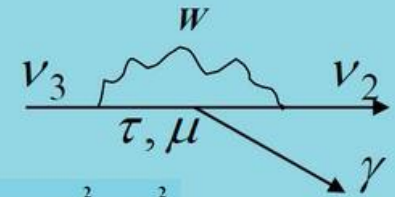
$$T_\gamma = 2.73\text{ K}$$

CνB

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

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

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



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



- ビッグバン宇宙誕生の数秒後 → 宇宙背景ニュートリノ CνB
- ビッグバン宇宙誕生の30万年後 → 宇宙背景マイクロ波放射 CMB

CνB :

- 宇宙の極初期の情報を持つ → 宇宙起源の理解の重要な鍵
- 約100個/cm³ と大量に存在 → ニュートリノ崩壊探索のニュートリノ源

2019年 ロケット実験

2020年以降 衛星実験

極低温SOI前置増幅器付きNb/Al-STJ+回折格子

Hf-STJ (マイクロカロリメータ)

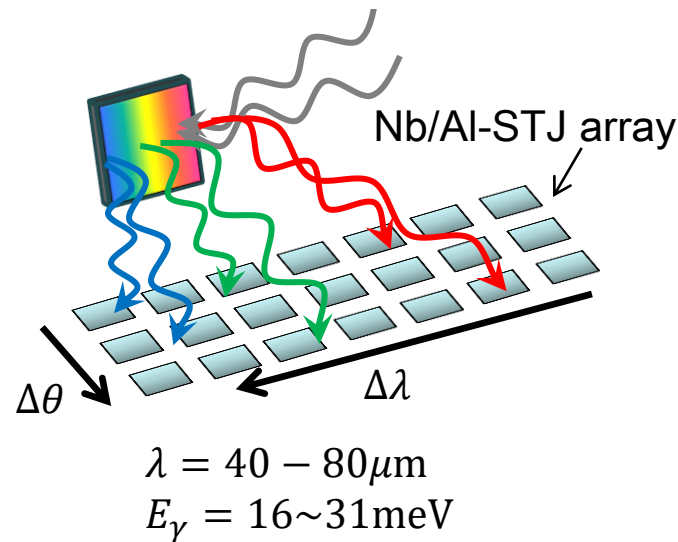
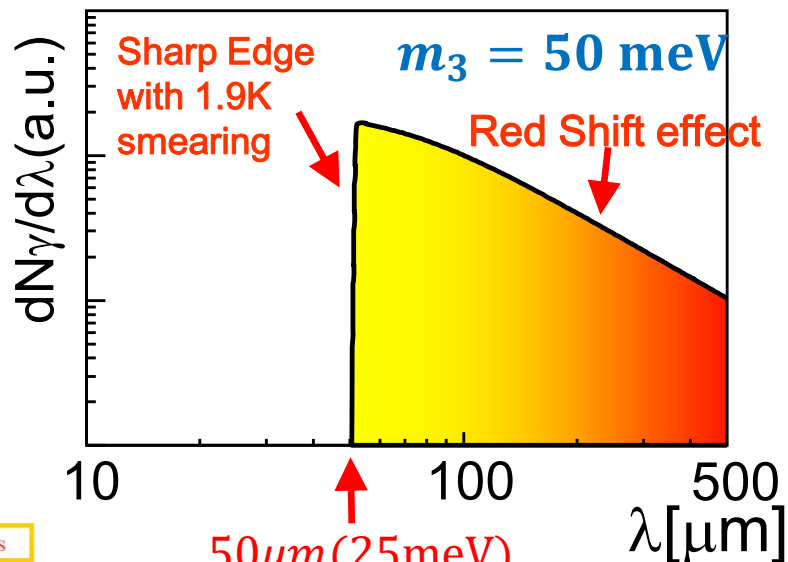
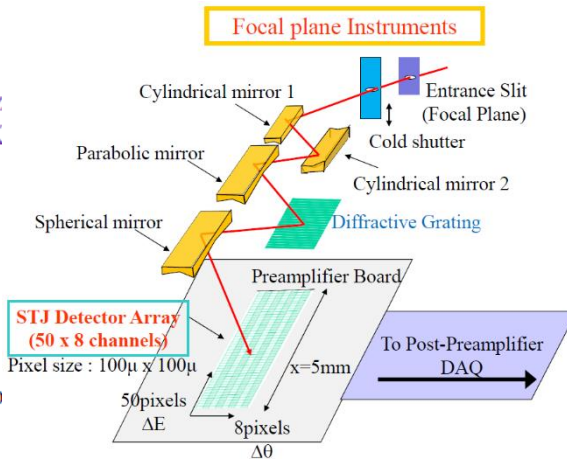
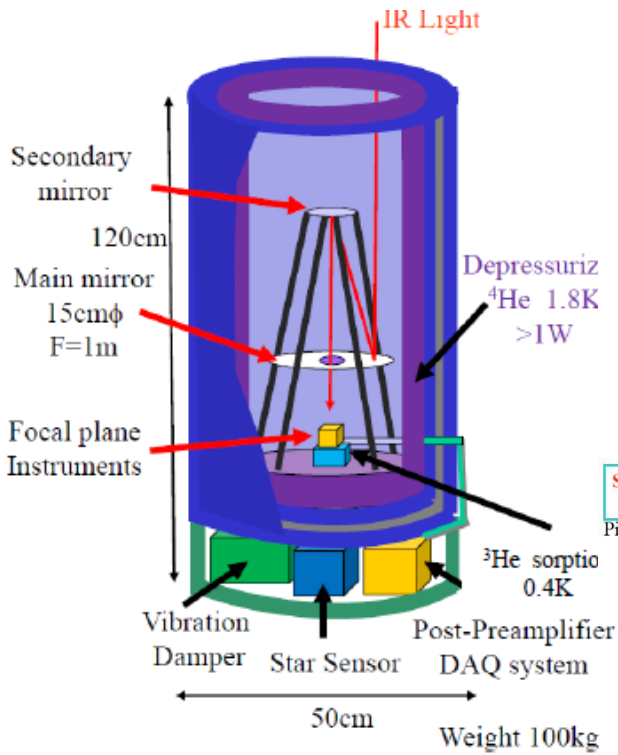
宇宙背景ニュートリノ崩壊探索ロケット実験 (COBAND実験)

$$\nu_3 \rightarrow \nu_{1,2} + \gamma$$

ニュートリノ崩壊光の波長分布

$$E_\gamma = \frac{m_3^2 - m_{1,2}^2}{2m_3}$$

ロケット搭載型遠赤外線望遠鏡



ニュートリノ崩壊探索実験のSTJ検出器に対する性能要求: 遠赤外線光子の一光子検出

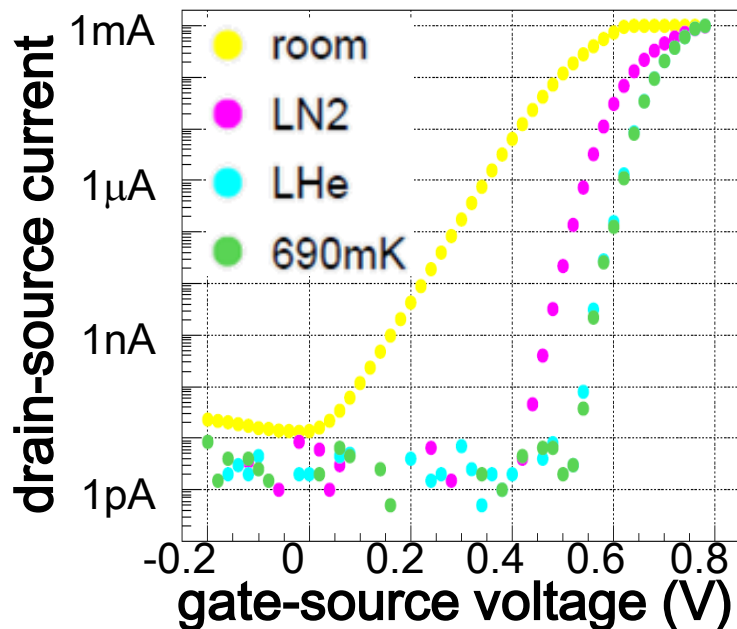
(1) 2 μ sec積分したノイズ電荷が30e以下

(2) STJのリーク電流が0.1nA以下

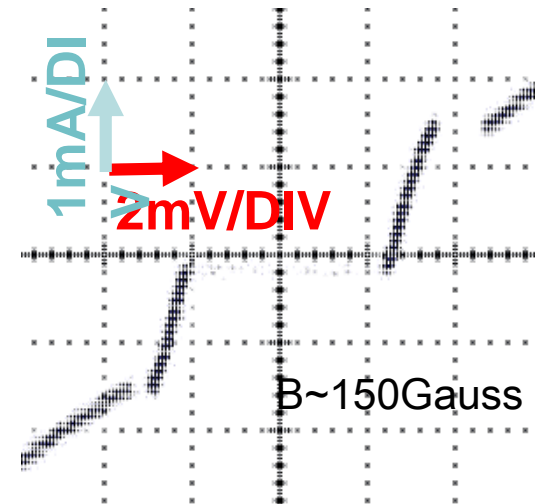
SOI-STJ: SOI上にSTJを形成後の特性評価

KEKクリーンルーム施設で FD-SOI基板上にSTJを形成。

nMOS-FETの $I_{ds}-V_{gs}$ 曲線



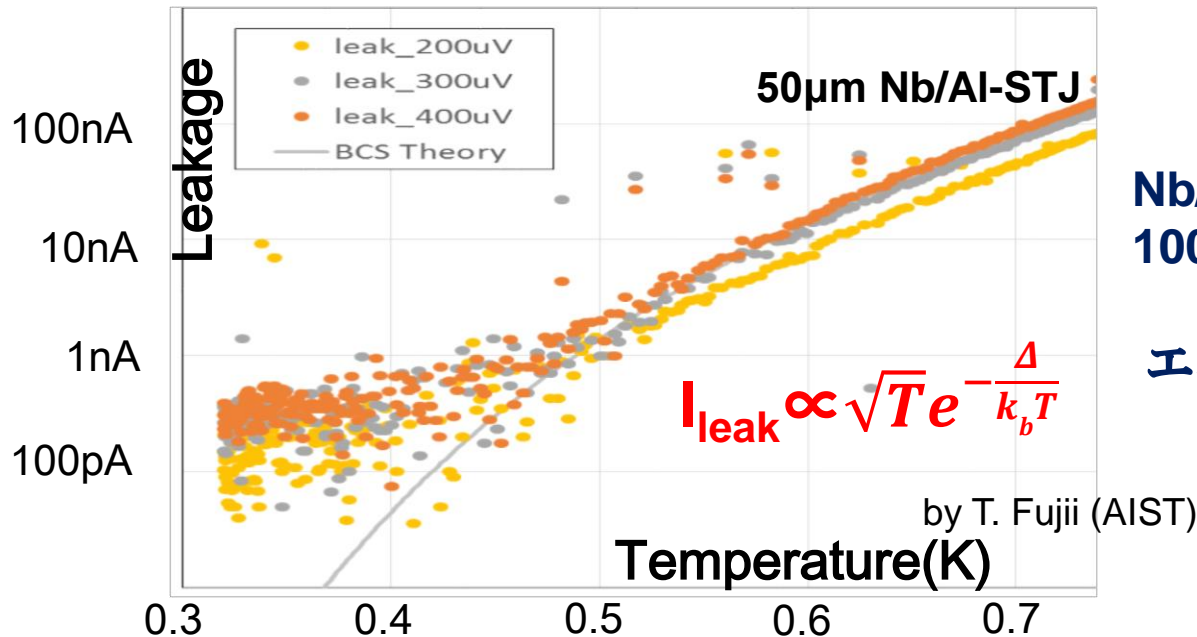
Nb/Al-STJ(50 μ 角)のI-V曲線



- STJを形成した FD-SOI基板上のMOS-FETが極低温 1 K以下で正常動作
極低温では，スレッシユホールド電圧のシフト，サブスレッシユホールド領域のドレイン電流抑制，飽和領域でのドレイン電流の上昇など，特性が変動
- SOI-STJ上のNb/Al-STJも正常に動作
- 現在、産総研CRAVITY施設を用いて、SOI-STJ開発中

Nb/Al-STJの性能評価結果

産総研GRAVITY施設で作成したSTJの性能試験： リーク電流0.2nA (50 μ m角)達成



Nb/Al/Al₂O₃/Al/Nb膜厚
100nm/70nm/1nm/70nm/120nm

エネルギーギャップ $\Delta=0.57\text{meV}$

20 μ 角のSTJでは、STJのリーク電流がニュートリノ崩壊探索実験のSTJ検出器に対する性能要求の0.1nA以下を満たした。

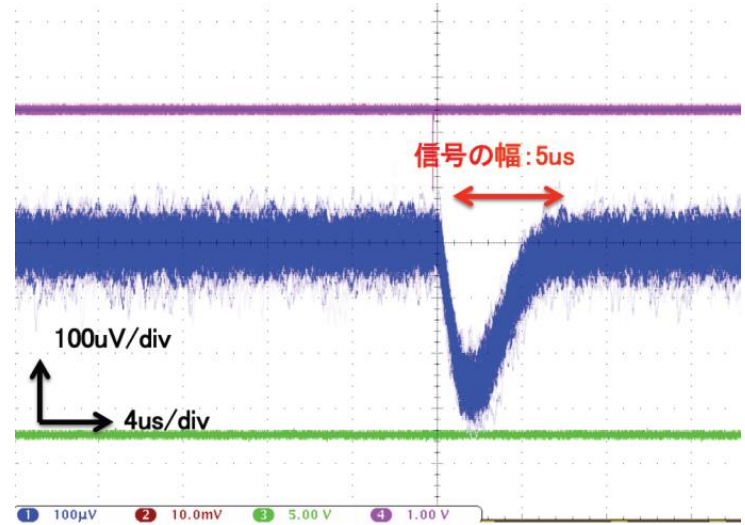
STJ size	# of samples	I_{leak} at 0.3mV
50 x 50μm ²	18	224 ± 29 pA
20 x 20 μm ²	7	39 ± 13 pA
10 x 10 μm ²	20	14 ± 7 pA

Nb/AI-STJ光応答試験

T=350mKで、波長465nmの可視光レーザーに対する
Nb/AI-STJの応答信号

光子数10に対する応答信号 (1光子に対してS/N=1)

読み出し系のノイズを小さくするために、極低温SOI前置増
幅器をSTJ直近の冷凍機内に設置する。

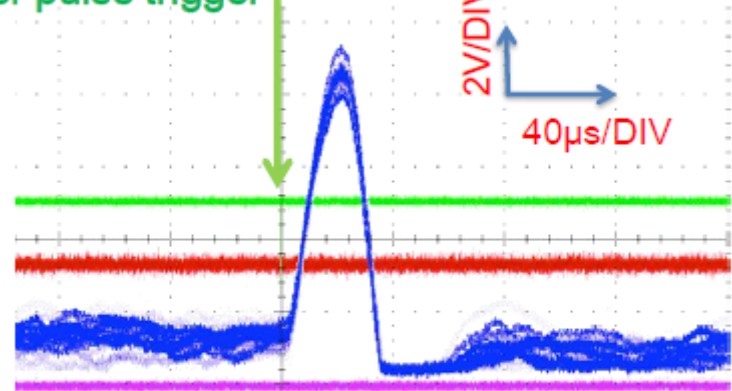


産総研CRAVITY製100x100 μm^2 Nb/AI-STJ

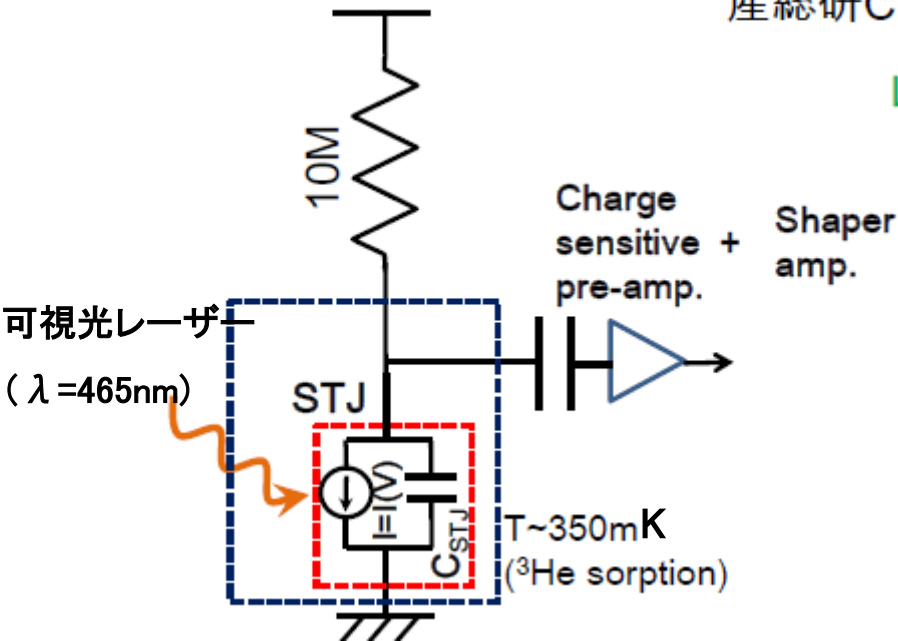
Laser pulse trigger

2V/DIV

40 μs /DIV

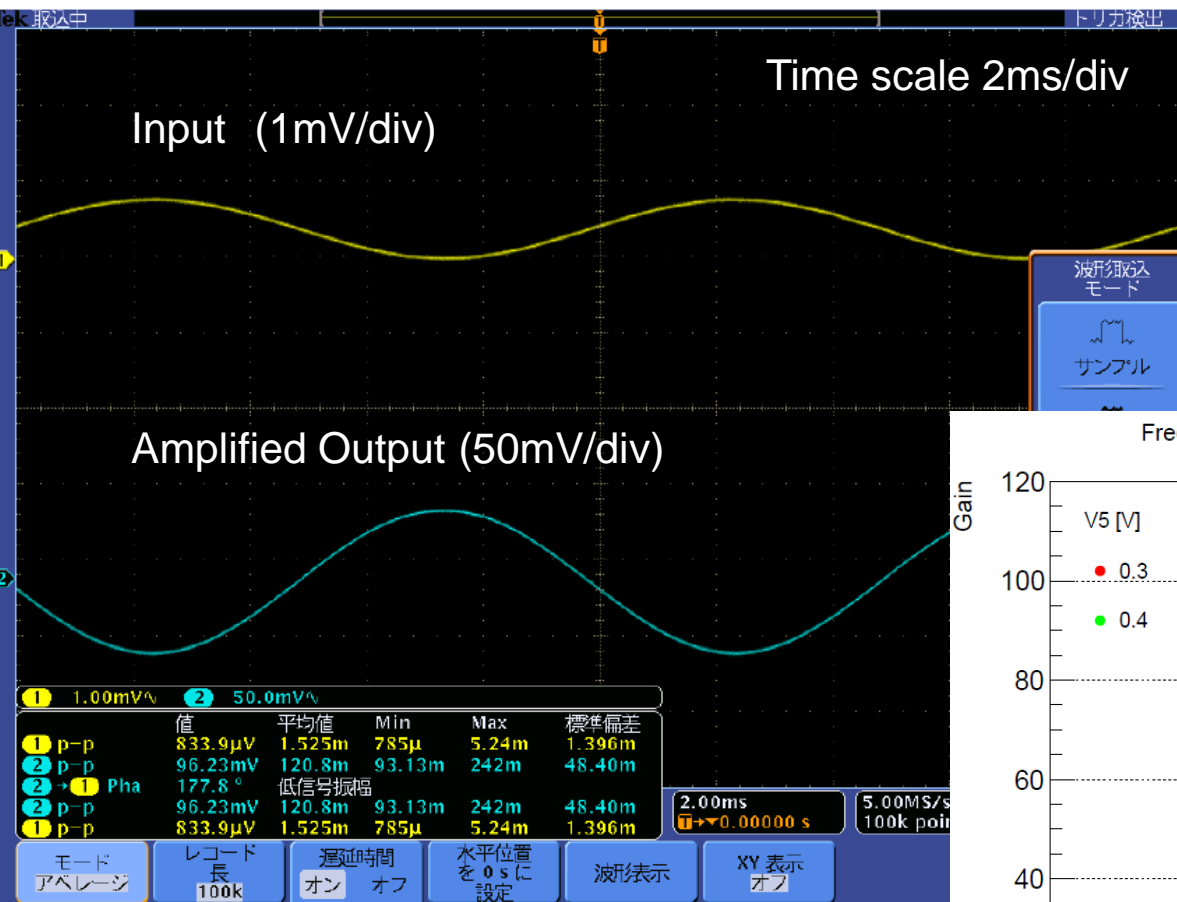


Pulse height dispersion is consistent
with 10-photon detection in STJ

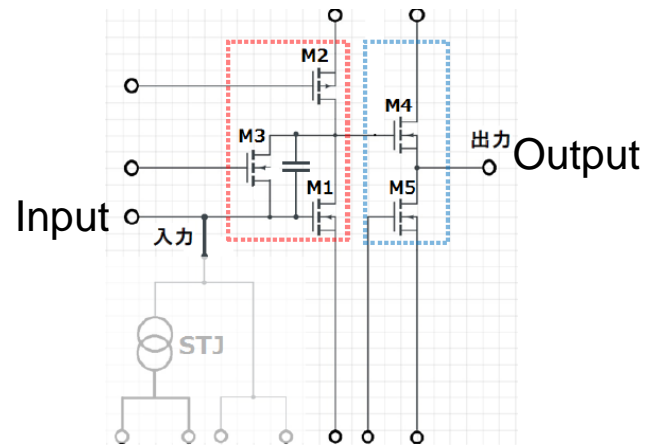


極低温SOI 前置増幅器のテスト結果

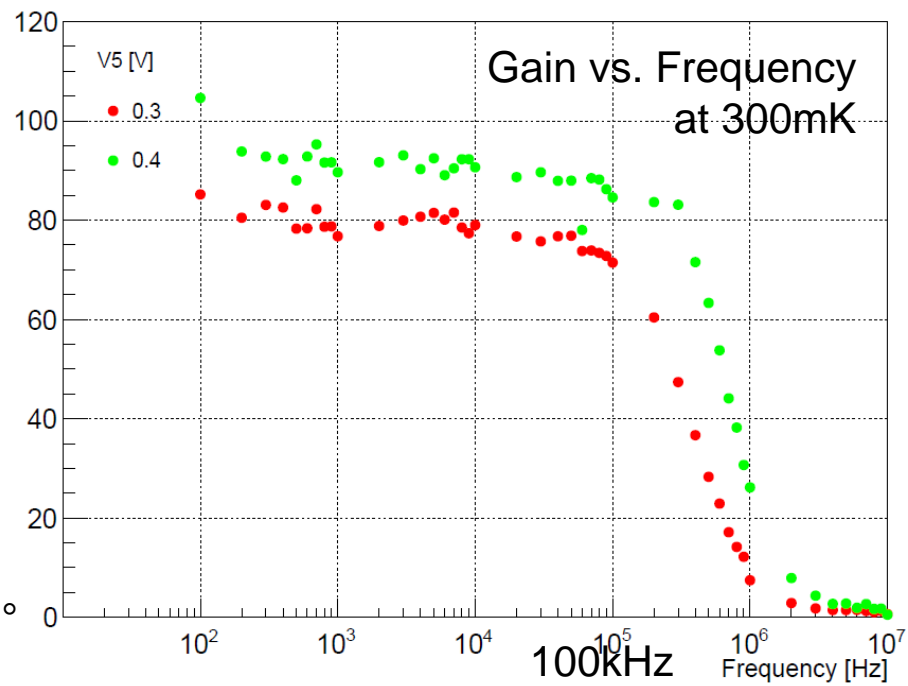
Input and Amplified Output



Amplifier + Buffer



Frequency characteristic of cold amplifier(SOISTJ4) at 300mK



300mKで、周波数400kHzまで80倍増幅が達成された。

STJ擬似信号に対する SOI 前置増幅器の出力

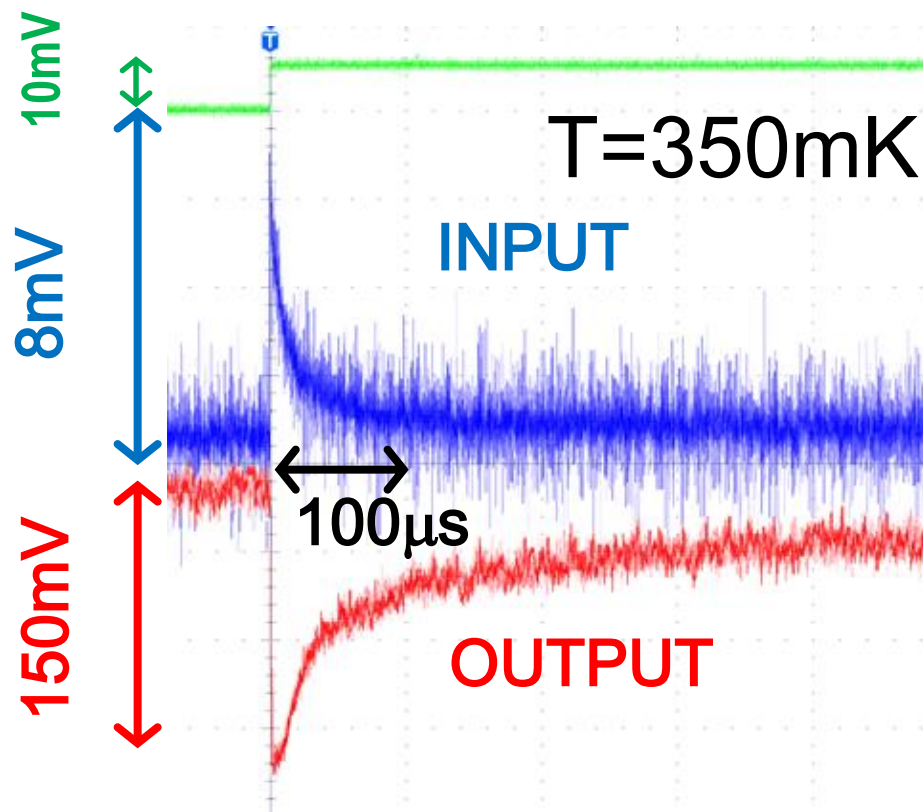
極低温SOI前置増幅器

T=350mK

増幅度 30

消費電力 100 μ W.

Nb/AI-STJの光応答信号を
極低温SOI前置増幅器で増
幅する性能試験進行中



Hf-STJ検出器のエネルギー分解能

マイクロカロリメータ： Hf-STJでは、25meVの光子はクーパー対を壊して、エネルギーを2%の精度で測定するのに十分な数の準粒子を生成する。 $\Delta(\text{Hf})=0.021\text{meV}$

STJ 検出器エネルギー分解能

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

Δ : エネルギーギャップ
 F : Fano factor (= 0.2)
 E : 入射粒子エネルギー

ハフニウム Hf を超伝導体として用いると、

$$\sigma_E / E = 1.7\% \quad \text{at } E = 25\text{meV}$$

Material	$T_c(K)$	$\Delta(\text{meV})$
Niobium	9.20	1.550
Aluminum	1.14	0.172
Hafnium	0.13	0.021

T_c : 転移温度

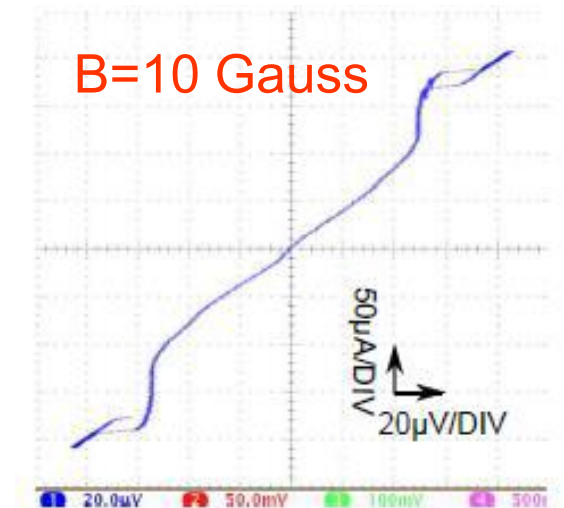
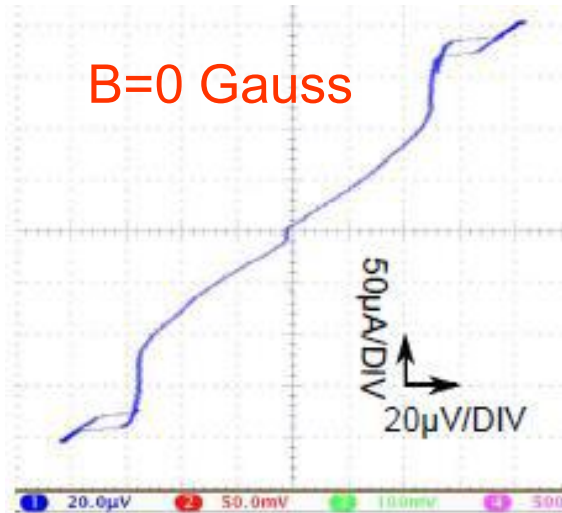
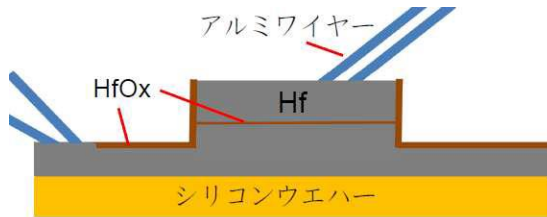
T_c の1/10程度の温度で運転

我々がHf-STJのSIS構造を
世界で初めて観測(TIPP2011で報告)

Hf-STJ検出器の開発

目標: ニュートリノ崩壊探索実験のために遠赤外一光子のエネルギーを2%の分解能で測定する。

Hf-STJ ($100 \times 100 \mu\text{m}^2$) のI-V曲線
• $T \sim 40\text{mK}$, $I_c = 10 \mu\text{A}$, $R_d = 0.6 \Omega$



STJ size	# of samples	R_d
$200 \times 200 \mu\text{m}^2$	3	$0.22 \pm 0.01 \Omega$
$100 \times 100 \mu\text{m}^2$	3	$0.60 \pm 0.10 \Omega$

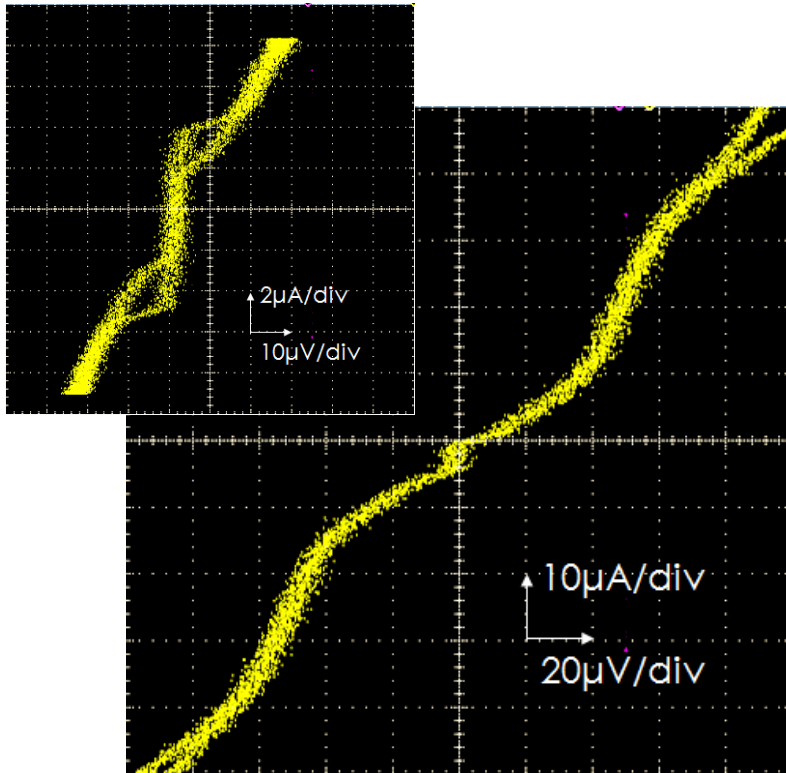
Hf-STJ開発の最新成果

2016年, HfO層(1-2 nm)の上にAl薄膜層(9nm)をつけてArプラズマで削り薄くしてHf/Al/HfO_x/Hf-STJを作成. リーク電流を下げた.

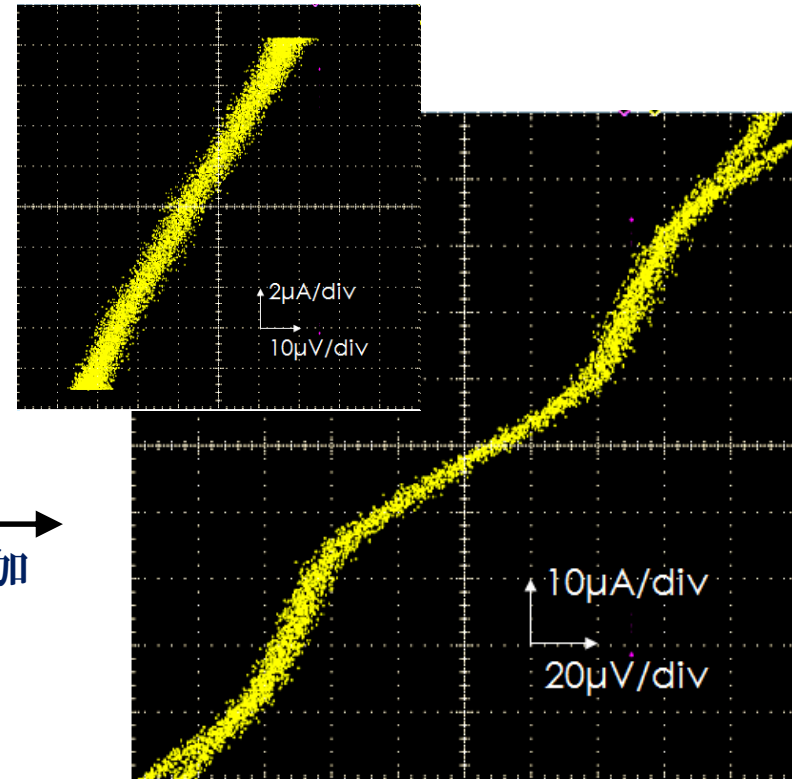
Rd: 0.2Ω → 3.3Ω

T = 128mK, Δ = 20~30 μeV

ジョセフソン電流が磁場印加で抑制

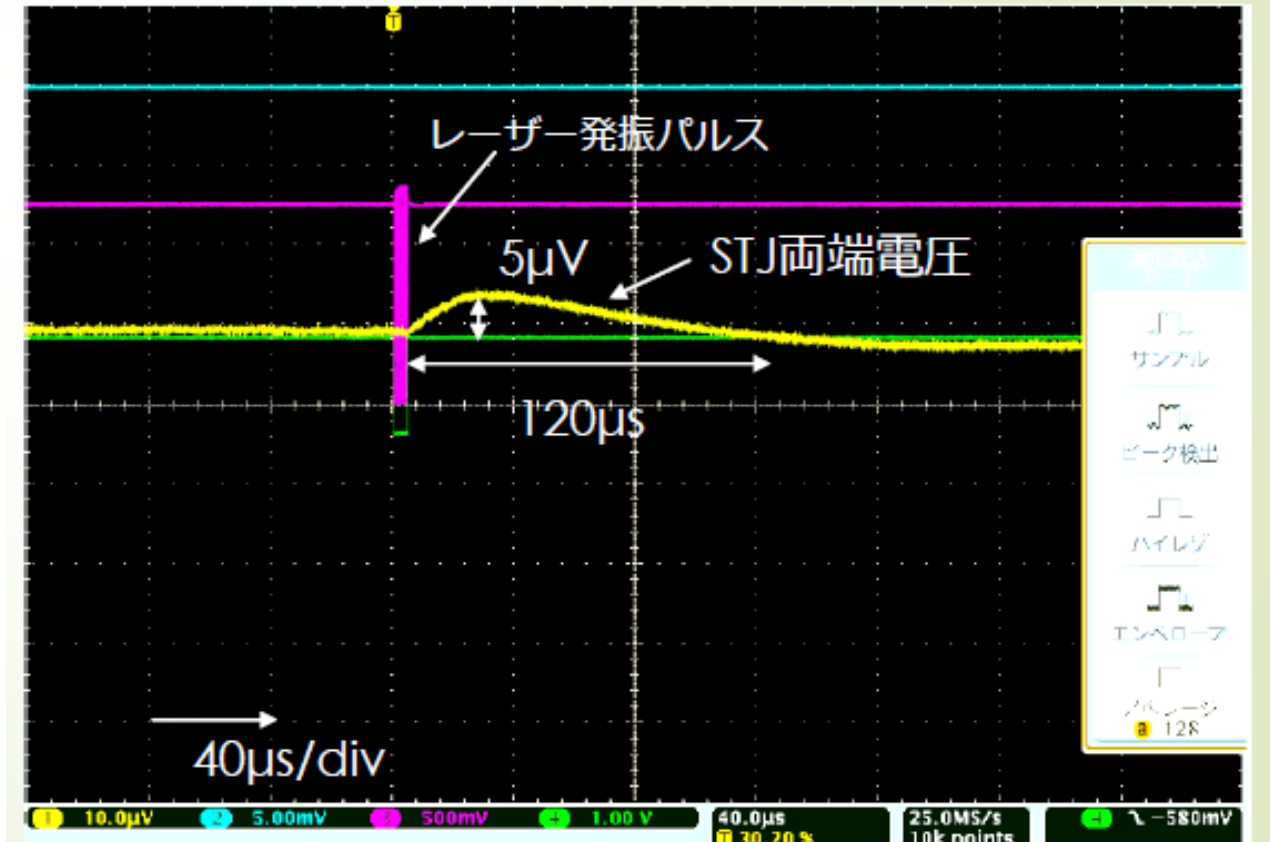
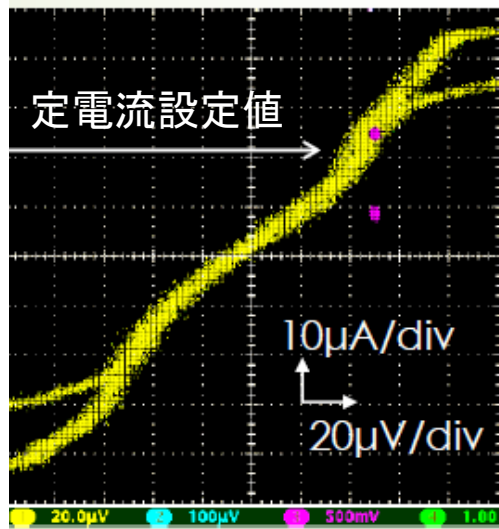


→
磁場印加
5 Gauss



Hf-STJのレーザーパルス光応答

可視光レーザー ($\lambda=465\text{nm}$) 10Hz レーザー発振パルス幅 $5\mu\text{s}$



HF-STJのパルス光応答信号を観測

光応答速度 $120\mu\text{s}$ は Nb/Al-STJ (数 μs) に比べて遅い

STJ検出器を用いた光・量子計測

数理物質融合科学センター光量子計測器開発推進室が下記の計測器開発を強力に推進している

- 宇宙背景ニュートリノ崩壊探索： 筑波大(金信弘), KEK, 産総研、JAXA等の共同研究
STJ検出器を用いて、宇宙遠赤外線のエネルギー測定 ($E \sim 25\text{meV}$, $\Delta E/E = 2\%$)
→ 宇宙背景ニュートリノ崩壊起因のカットオフ信号を探索
- 生体分子研究： 筑波大(富田成夫), KEK, 産総研、京都大の共同研究
STJ検出器を用いて、電氣的に中性の生体分子の運動エネルギーと飛行時間を測定
(運動エネルギー $E < 3\text{keV}$, $\Delta E = 200\text{eV}$)
→ 生体分子の質量を測定 → 糖ペプチドの構造解析、結合位置の決定

低エネルギー光・量子の測定、赤外線光子一光子分光、高分解能X線分光が可能

他の応用分野がありましたら、ご意見をお聴かせください。

まとめ

- 宇宙背景ニュートリノ崩壊探索COBAND実験で遠赤外線(波長 50μ 程度)光子分光のためにSTJ検出器開発
 - ロケット実験用の分光素子 + Nb/Al-STJによる遠赤外線光子計数
 - 極低温SOI増幅器によるSTJ信号の超低ノイズ読出し
 - 将来の衛星実験用のHf-STJ
- 産総研のGRAVITY施設で作成したNb/Al-STJ試作機は実験要求のリーク電流 0.1nA 以下を満たす。
- 極低温SOI前置増幅器が極低温 350mK で動作
 - 周波数帯域 $<400\text{kHz}$, 増幅度80倍
 - SOI-STJ一体型検出器を開発中
- Hf-STJのパルス光応答信号を初観測