

COBANDプロジェクトにおける STJ信号読出のための極低温SOI増幅器の開発

R&D of Cryogenic SOI amplifier for STJ signal readout in COBAND project



2020年11月30日

TCHoU 構成員会議・成果報告&交流会

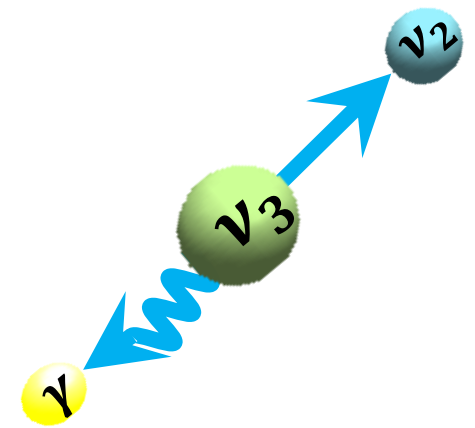
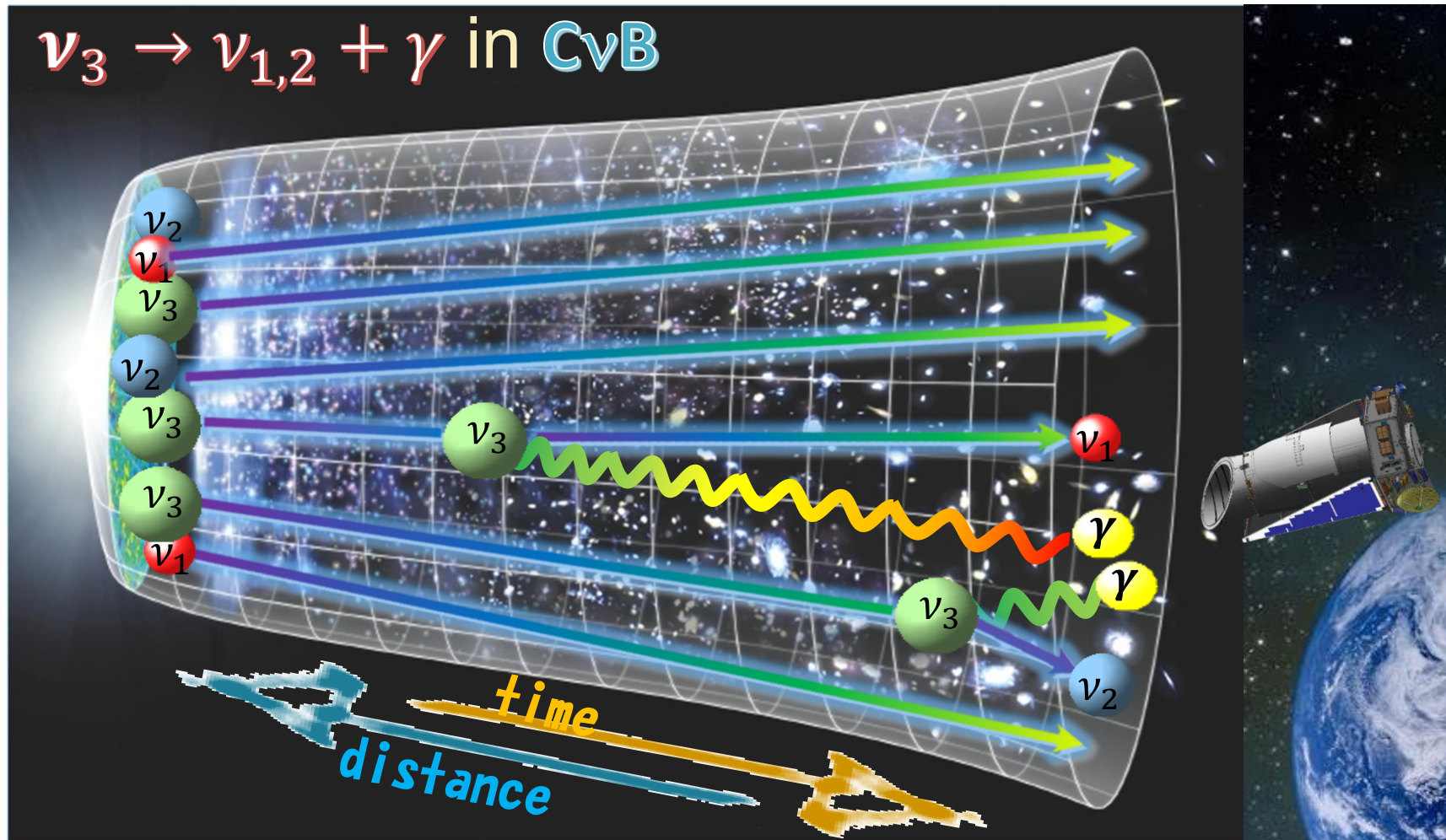
武内 勇司

COBAND (COsmic BAckground Neutrino Decay)



宇宙誕生数秒後に自由になったニュートリノ（宇宙背景ニュートリノ）は現在も宇宙全体に一様に存在し続ける。しかし極わずかに崩壊して光を出すものがある。

→ この宇宙背景ニュートリノからの微弱な光を捕える



宇宙背景ニュートリノ崩壊探索の意義

標準模型での寿命予想 $\tau \sim 10^{43}$ 年 (c.f. 宇宙年齢 10^{10} 年)



実験的寿命下限値 $\tau > 10^{12}$ 年

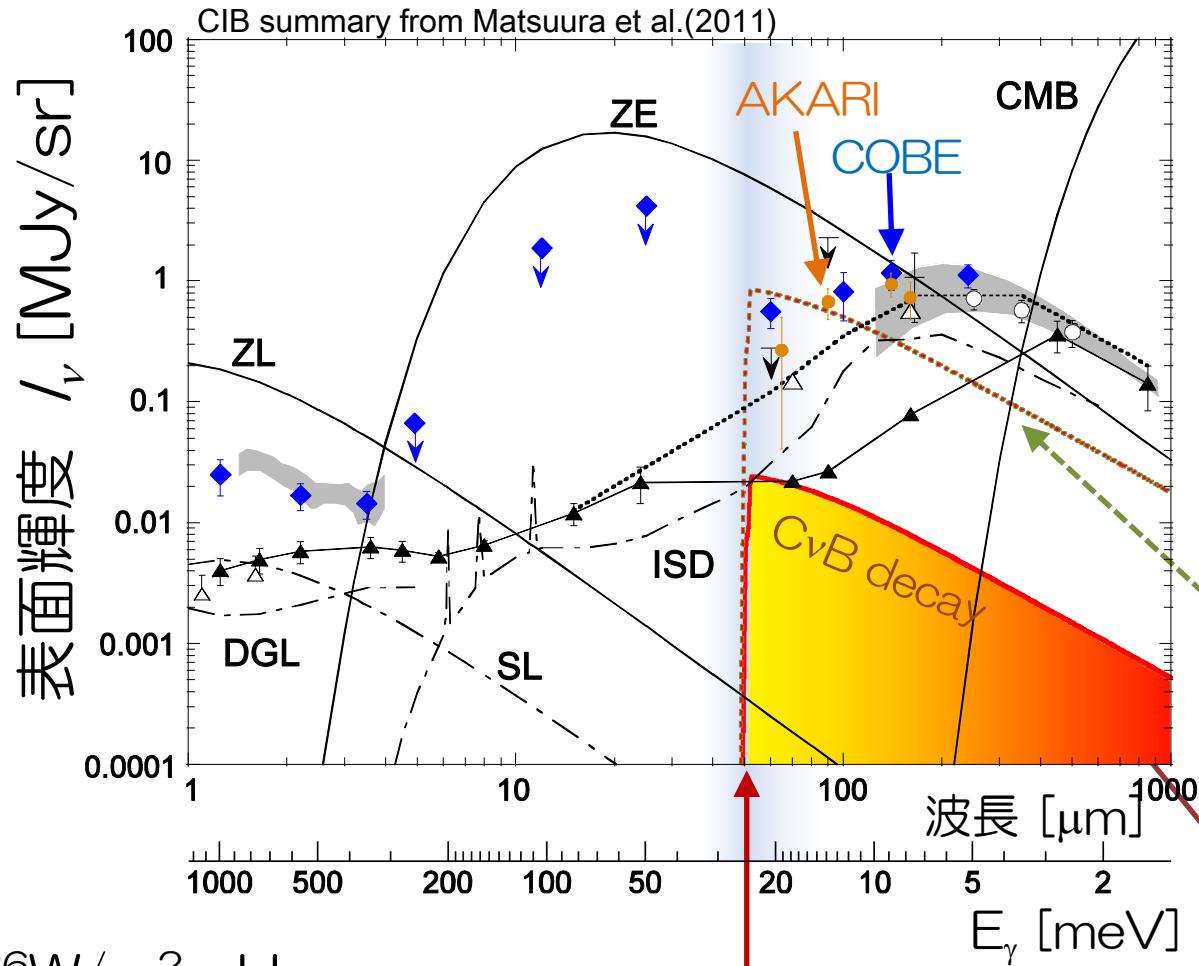
もし、宇宙背景ニュートリノからの輻射崩壊光が標準模型予想よりもずっと短い 10^{12} 年 $< \tau \ll 10^{43}$ 年で観測されたら

→ 標準模型を超える物理の発見!!!

→ 宇宙背景ニュートリノの直接検出!!!

→ ニュートリノ質量の絶対値測定!!! ← $m_3 = (m_3^2 - m_{1,2}^2) / 2E_\gamma$

期待されるニュートリノ崩壊光とノイズ光の波長分布



$1 \text{ Jy} = 10^{-26} \text{ W/m}^2 \cdot \text{Hz}$

$\lambda = 50 \mu\text{m}$
 $E_\gamma = 25 \text{ meV}$

ノイズ光 at $\lambda = 50 \mu\text{m}$

黄道光

$I_\nu \sim 8 \text{ MJy/sr}$

宇宙赤外線背景放射 (CIB)

$I_\nu \sim 0.1 - 0.5 \text{ MJy/sr}$

宇宙背景ニュートリノ崩壊光 (予想)

$\tau = 3 \times 10^{12} \text{ 年}$

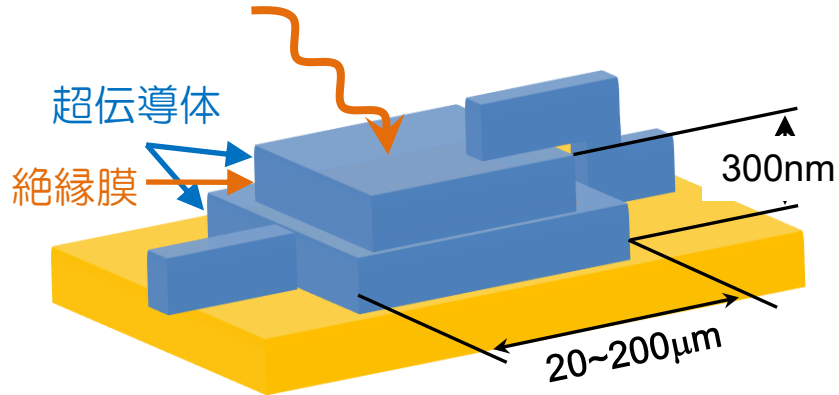
$I_\nu \sim 0.8 \text{ MJy/sr}$

$\tau = 1 \times 10^{14} \text{ 年}$

$I_\nu \sim 25 \text{ kJy/sr}$

超伝導トンネル接合素子 Superconducting Tunnel Junction (STJ)

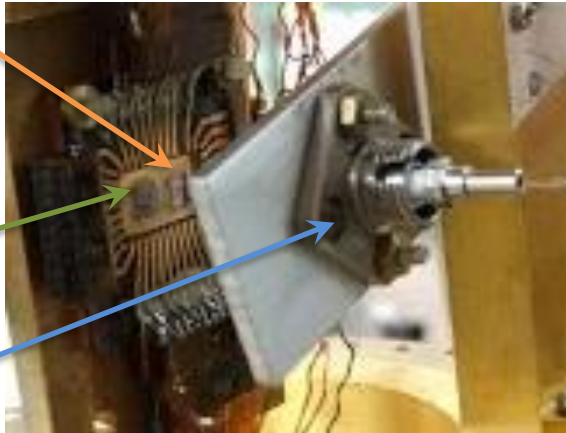
超伝導体/絶縁層/超伝導体の構造
(ジョセフソン接合)



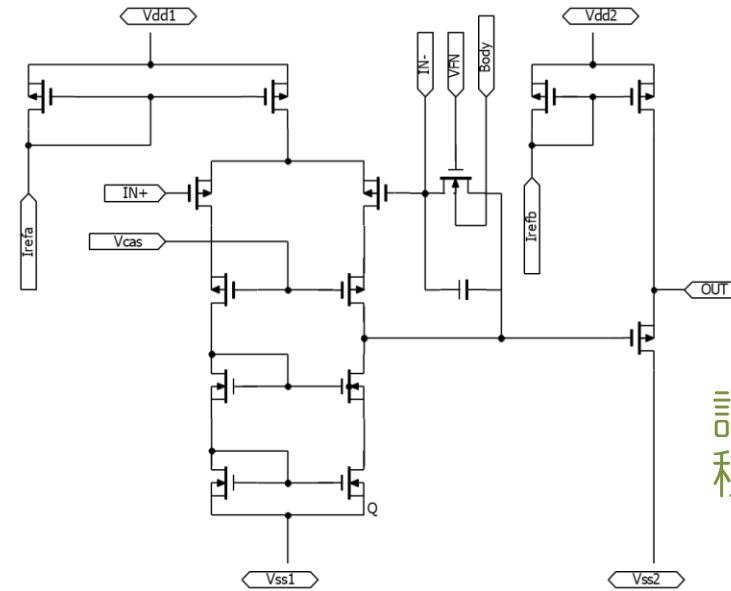
STJチップ
産総研
CRAVITY製

SOIチップ

光ファイバ



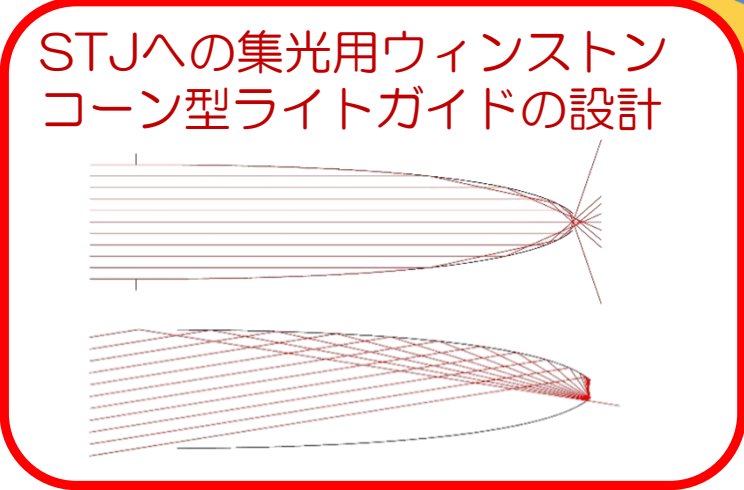
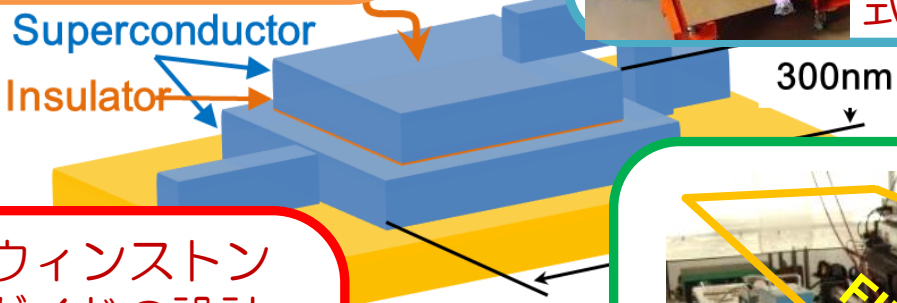
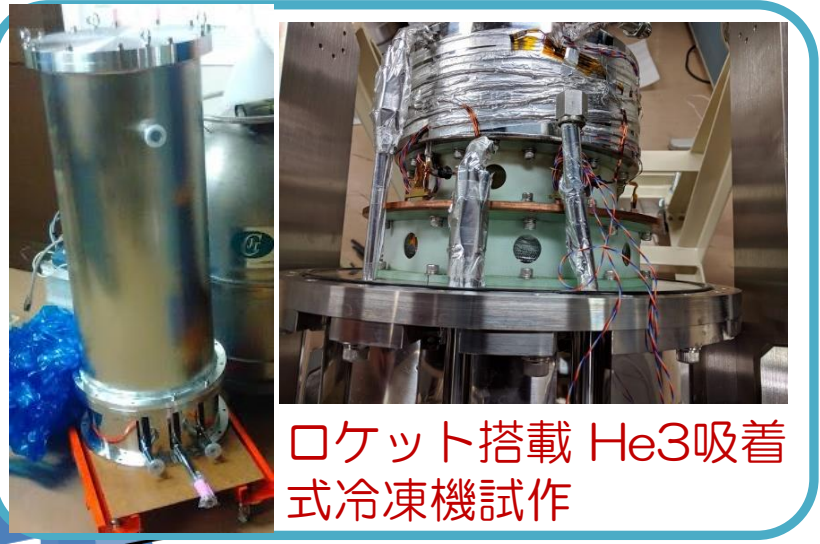
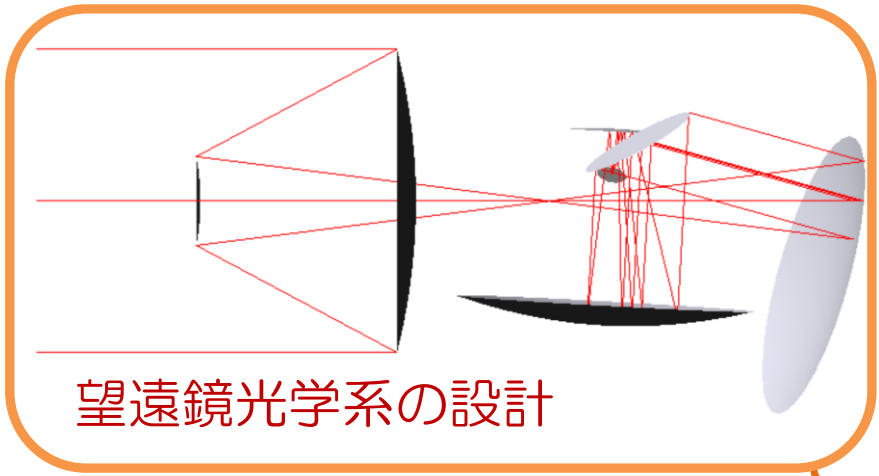
超伝導体センサー(STJ)からの光応答
信号を極低温下で増幅



試作極低温SOI電荷
積分型増幅器回路

- 超伝導ギャップ(Δ)は遠赤外フォトンエネルギーよりもずっと小さい($\Delta < 1\text{meV}$)
→ 原理的には遠赤外域一光子を検出可能
- 極低温で動く電荷アンプでの STJ 信号読出し
→ 信号雑音比(S/N)の著しい向上が期待

COBAND ロケット実験へ向けて



JAXA 観測ロケット S-520

COBAND (COsmic BAckground Neutrino Decay) Collaboration Members (2020年3月)

金信弘, 武内勇司, 飯田崇史, (武政健一), 浅野千紗, (若狭玲那, 笠島誠嘉, 中原瑳依子, 前川群,
山根 綾太, (大塚洋一) (筑波大学)

松浦周二 (関西学院大学),

池田博一, 和田武彦, 長勢晃一 (JAXA/ISAS),

吉田拓生, 鈴木健吾, 竹下勉, 浅胡武志(福井大学),

石野宏和, 樹林敦子 (岡山大学),

美馬覚 (理化学研究所), 木内健司(東京大学),

加藤幸弘 (近畿大学),

羽澄昌史, 新井康夫, 倉知郁生 (高エネルギー加速器研究機構),

浮辺雅宏, 志岐成友, 藤井剛, 大久保雅隆 (産業技術総合研究所),

川人祥二 (静岡大学)

Erik Ramberg, Paul Rubinov, Dmitri Sergatskov (Fermilab),

Soo-Bong Kim (SKKU) ,

Yong-Hamb Kim, Hyejin Lee (IBS/Center for Underground Physics)



COBAND 実験の要求する光検出器

- ニュートリノ崩壊を同定するため $\lambda \sim 50\mu\text{m}$ 域スペクトル測定による崩壊光子エネルギー端検出が重要
- 光強度測定の系統誤差 \ll 光子数の統計誤差.



$\lambda \sim 50\mu\text{m}$ ($E=25\text{meV}$) 単一光子検出が可能な性能

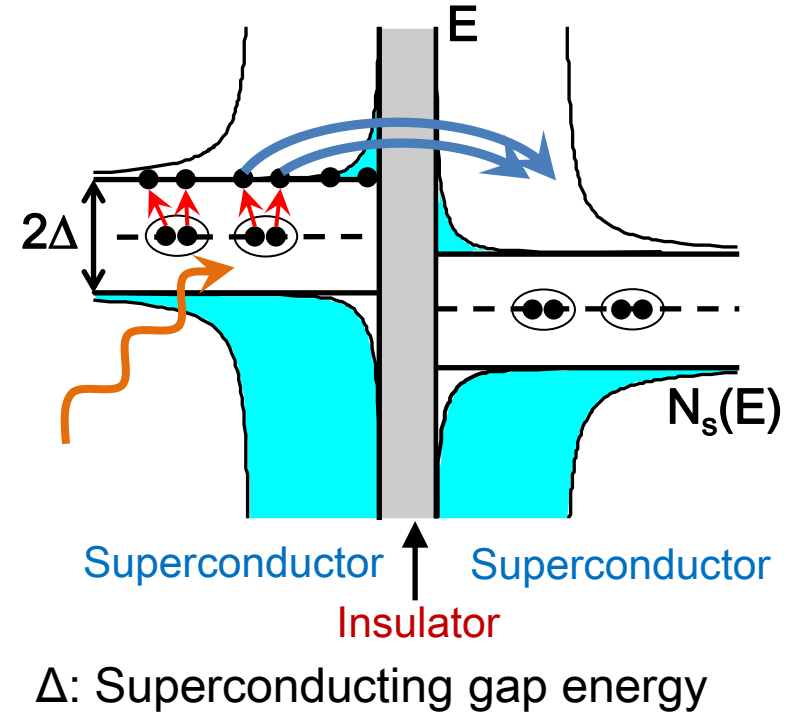
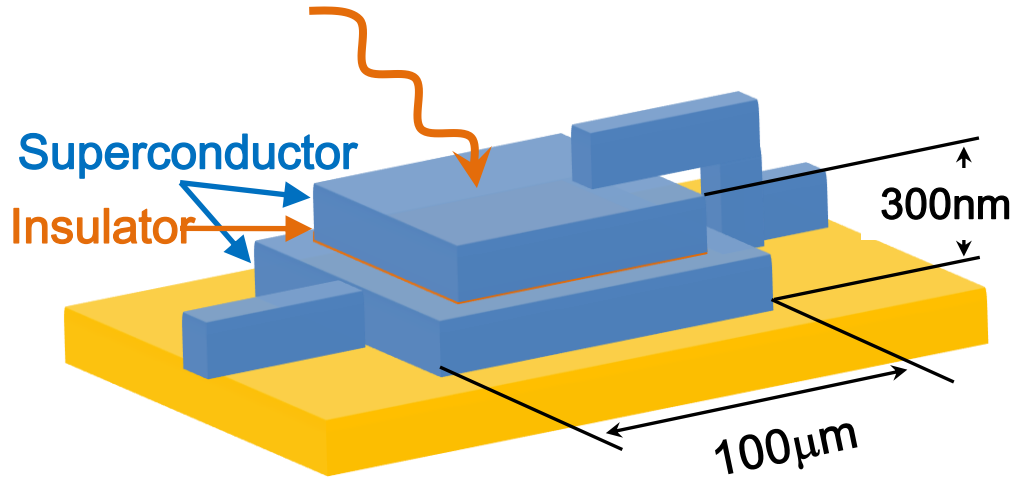
- Dark count rate が到達可能な光強度測定の感度を定める



- Superconducting Tunnel Junction (STJ) sensor
- Cryogenic amplifier readout

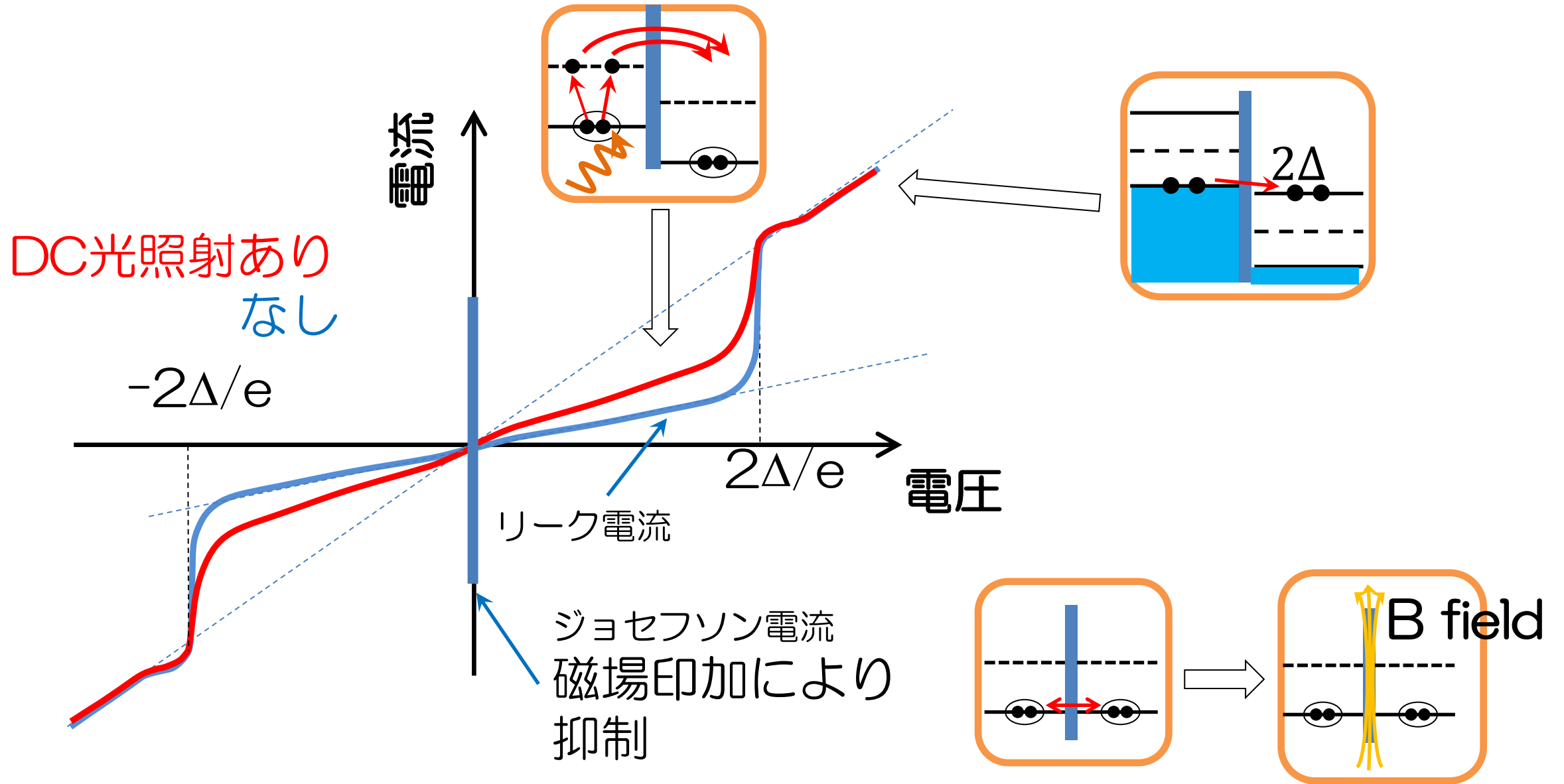
Superconducting Tunnel Junction (STJ) Detector

- Superconductor / **Insulator** / Superconductor Josephson junction device



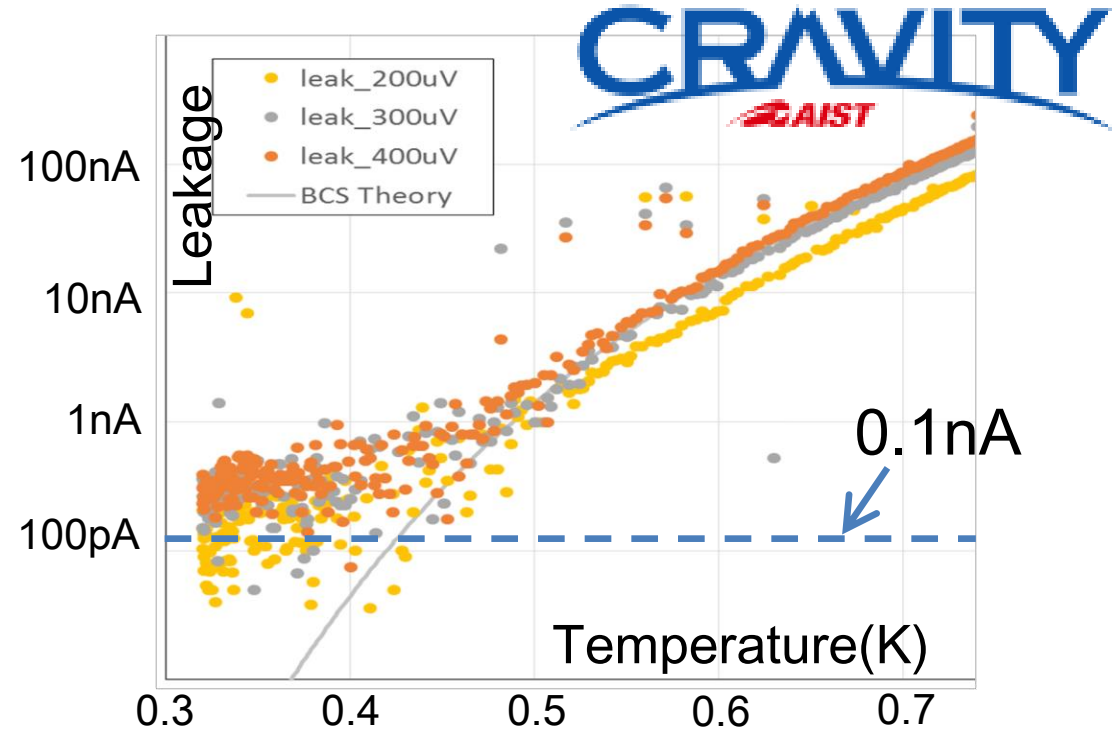
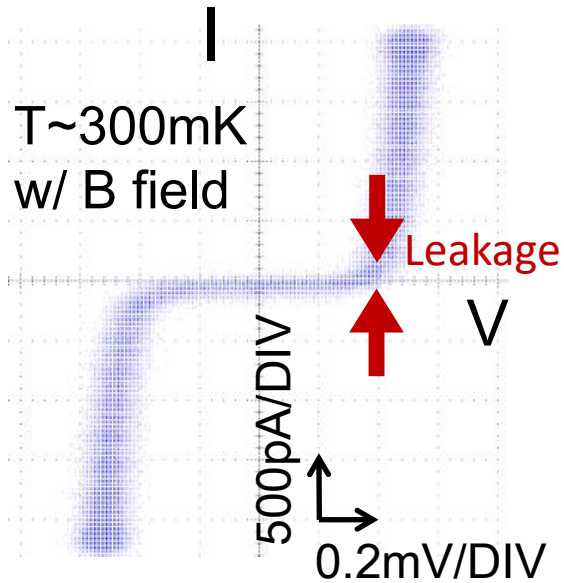
- 遠赤外光(25meV)よりも小さな超伝導ギャップエネルギー (Δ)
→ 遠赤外光の一光子検出が可能
- 比較的高速な応答($\sim\mu\text{s}$) → 光子計数に有利

STJ I-V 特性



CRVAVITY製Nb/Al-STJ

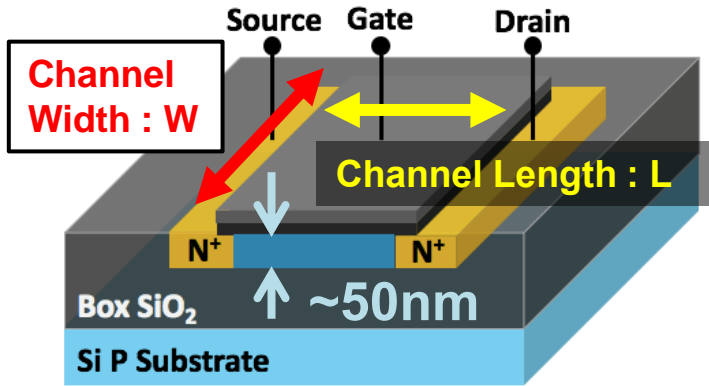
産総研CRAVITY で作製された50 μm 角 Nb/Al-STJ



- 50 μm 角でリーク200pA@0.4V, 20 μm 角ならリーク50pA@0.4V を達成
- $\Delta=0.6\text{meV}$, Al層でのバックトンネルゲインを10とすると 25meV光子に対する信号は, $N_{\text{q.p.}}=25\text{meV}/1.7\Delta \times 10 \sim 250$
- 50pA のリーク電流をSTJ信号幅($\sim 10\mu\text{s}$)で積分: $50\text{pA} \times 10\mu\text{s} \sim (3100 \pm 60)e$
- 素子そのものは, 25meVの一光子検出の要件を満たす性能

FD-SOI-MOSFET at cryogenic temperature

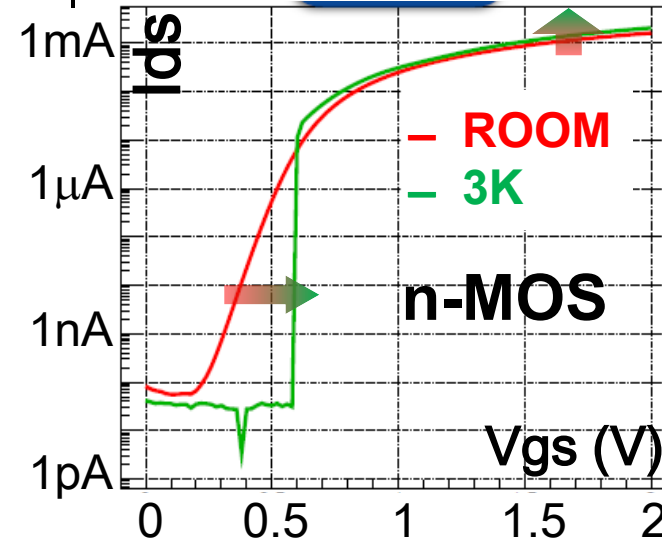
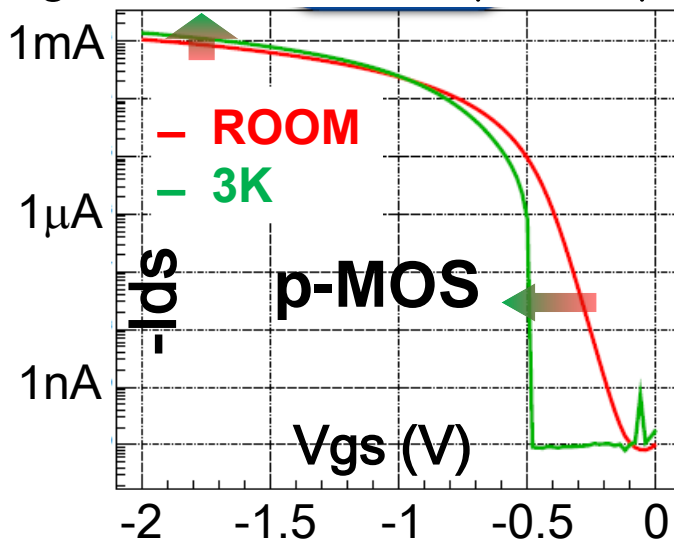
FD-SOI : Fully Depleted - Silicon On Insulator



- ❑ Very thin channel layer in MOSFET on SiO_2
- ❑ No floating body effect caused by charge accumulation in the body
- ❑ FD-SOI-MOSFET is reported to work at 4K

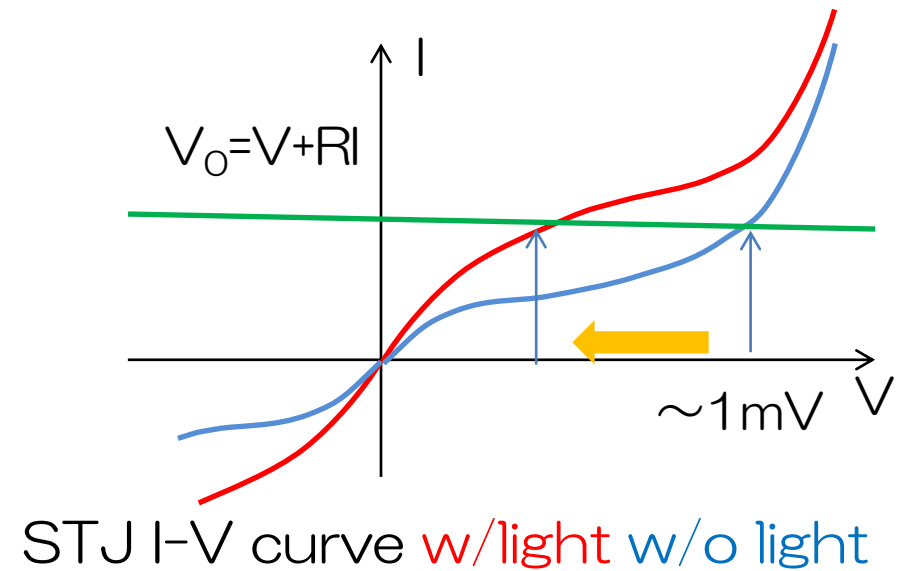
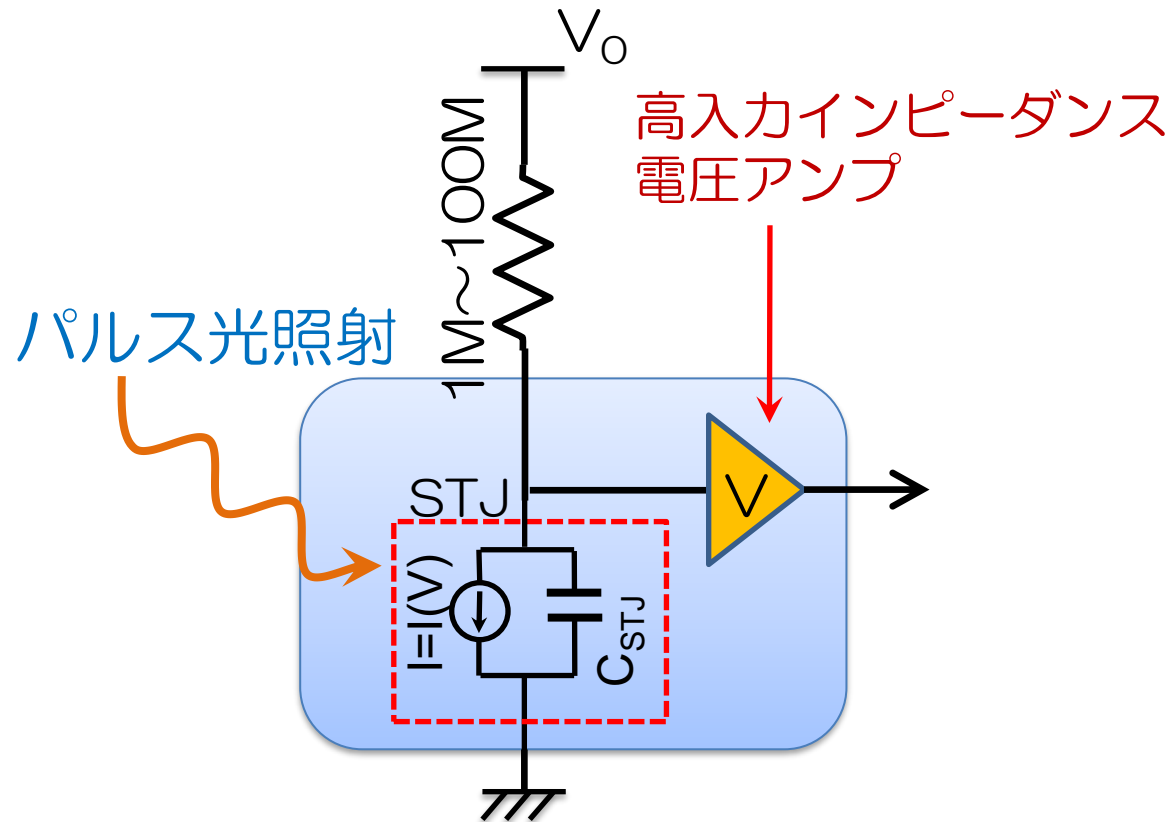
JAXA/ISIS AIPC 1185,286-289(2009)
J Low Temp Phys 167, 602 (2012)

I_d - V_g curve of $W/L=10\mu\text{m}/0.4\mu\text{m}$ at $|V_{ds}|=1.8\text{V}$



Both p-MOS and n-MOS show excellent performance at 3K and below.

STJ 光パルス信号読み出し(定電流モード)



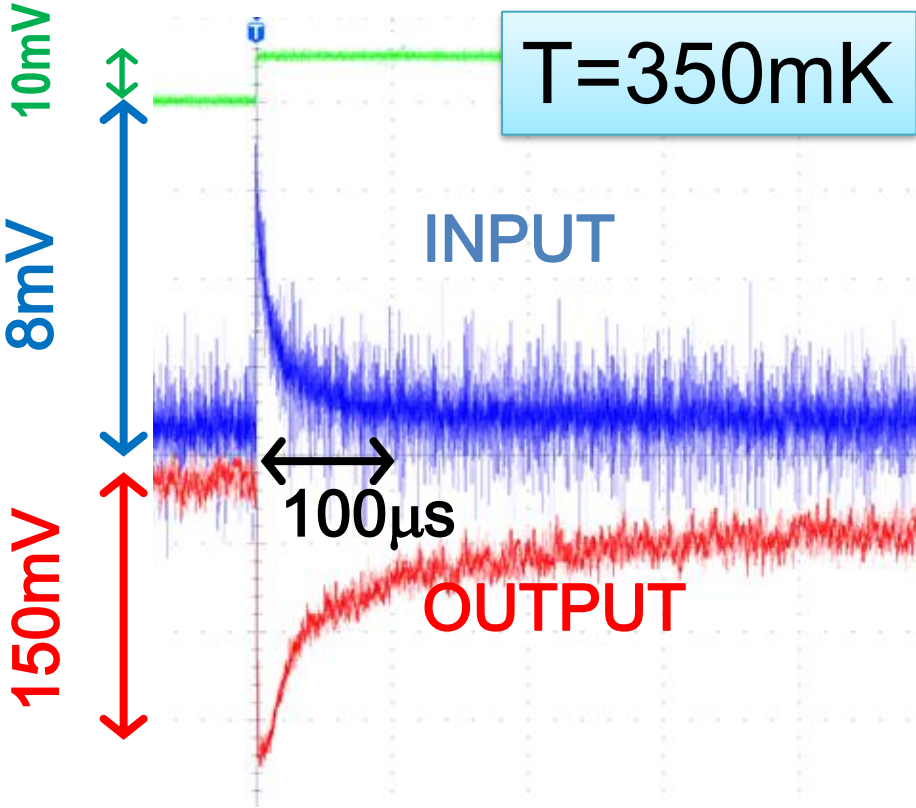
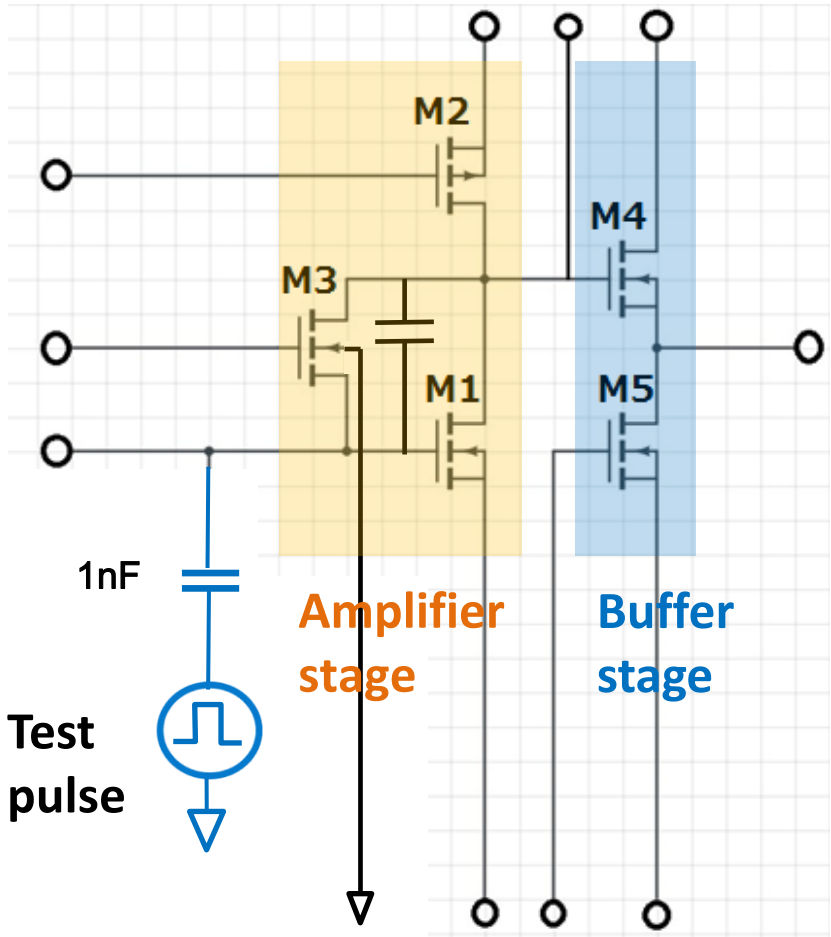
- STJに比べて大きな抵抗を直列接続
 - STJから見るとほぼ電流源
 - 冷凍機の外から容易にSTJへ定電流バイアスを印加可能
- 光応答信号は、STJの電圧降下として見える
 - 高入力インピーダンス電圧アンプで読み出し

STJのキャパシタンスが問題

STJは比較的大きな静電容量を持つ

- 50 μm 角 STJ で $\sim 0.1\text{nF}$

SOI prototype amplifier for demonstration test

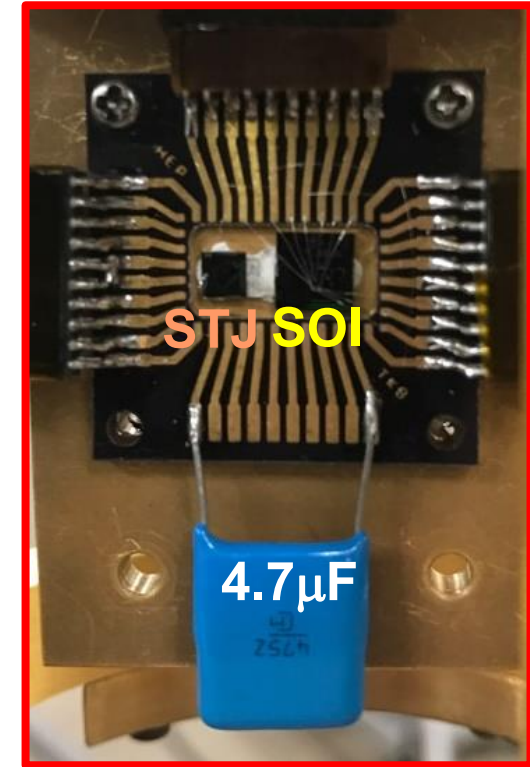
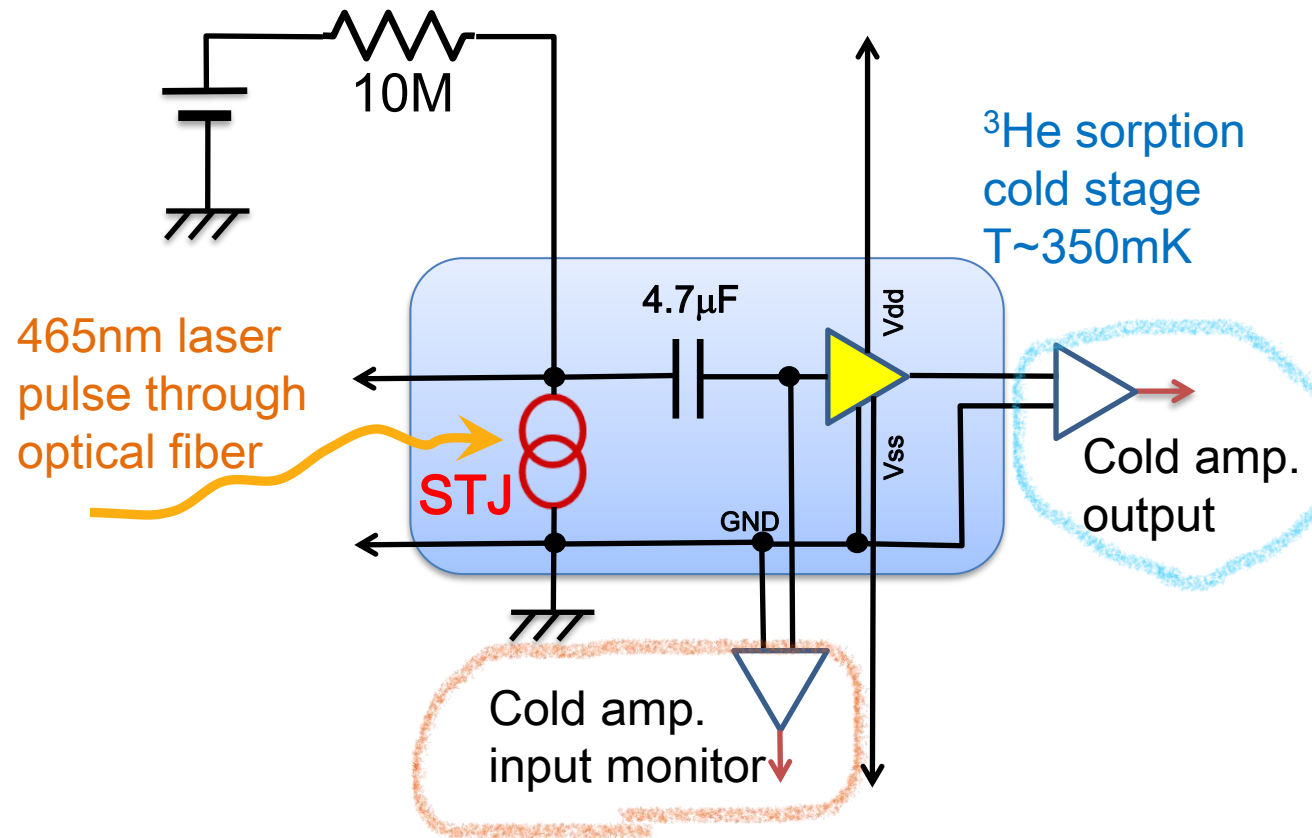


Test pulse input through C=1nF at T=3K and 350mK

- Power consumption: ~100µW
- Output load: 1MΩ and ~0.5nF

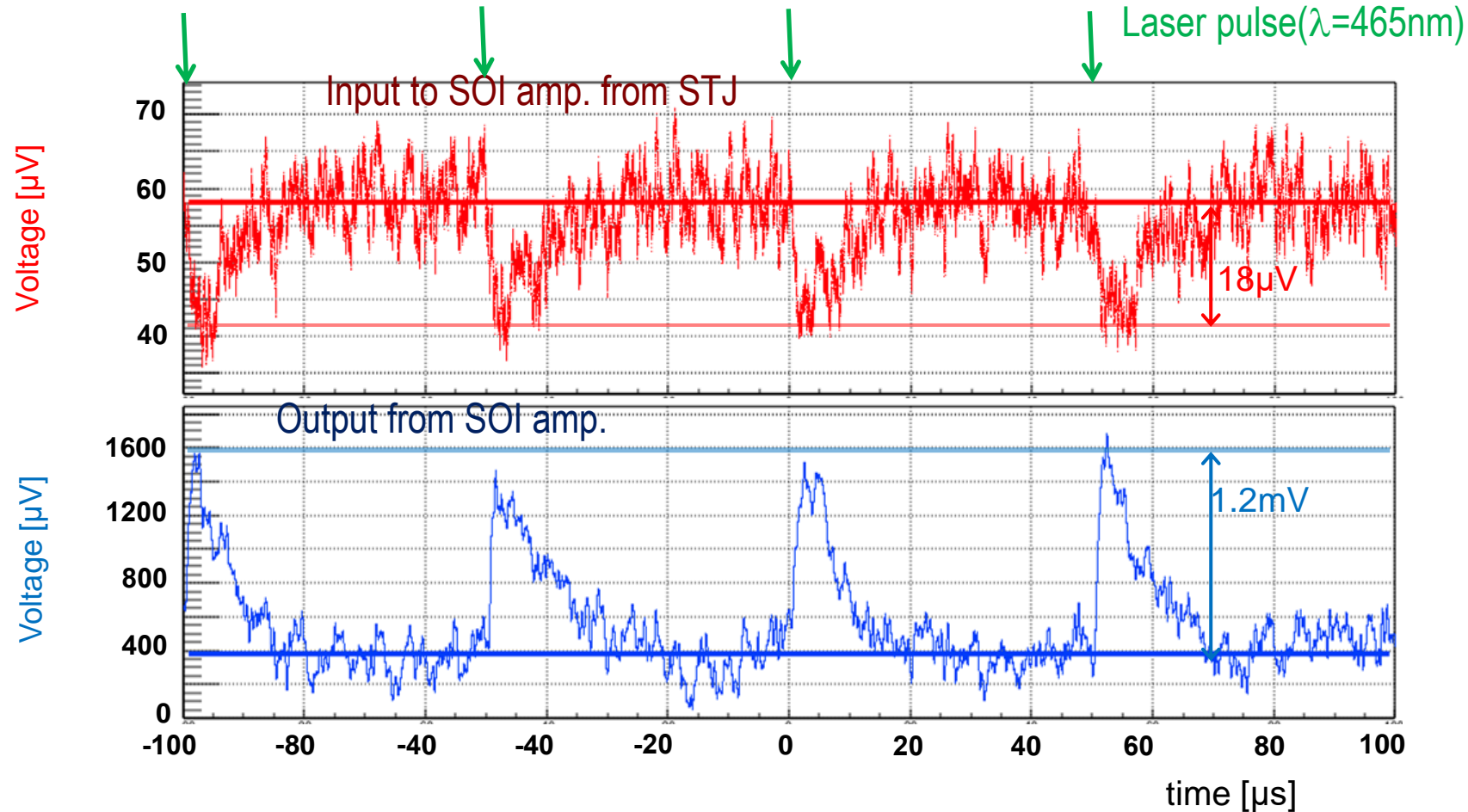
We can compensate the effect of shifts in the thresholds by adjusting bias voltages.

STJ response to laser pulse amplified by Cold amplifier



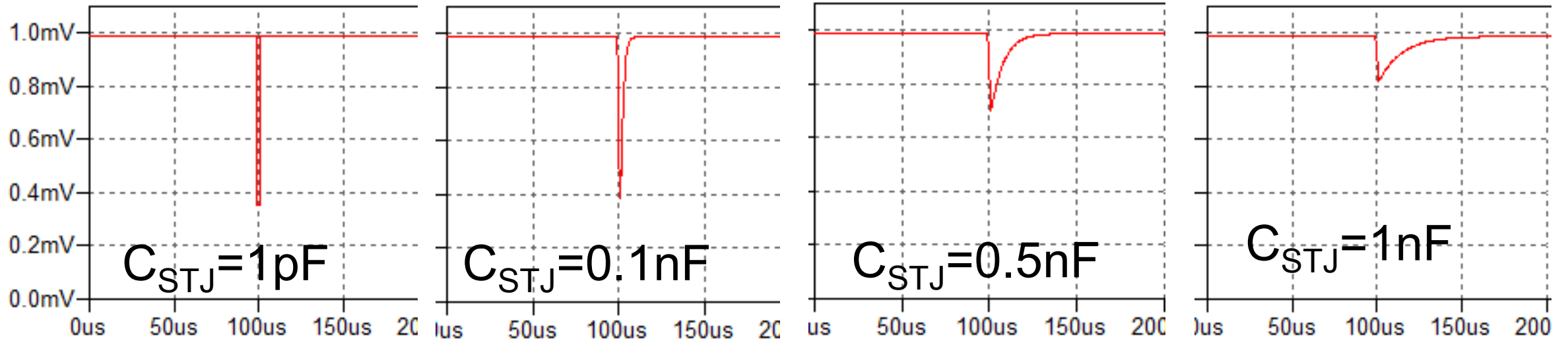
Connect 20μm sq. Nb/Al-STJ and SOI amplifier on the cold stage through a capacitance

STJ response to laser pulse amplified by Cold amplifier



Demonstrated to show amplification of Nb/Al-STJ response to laser pulse by SOI amplifier situated close to STJ at $T=350\text{mK}$

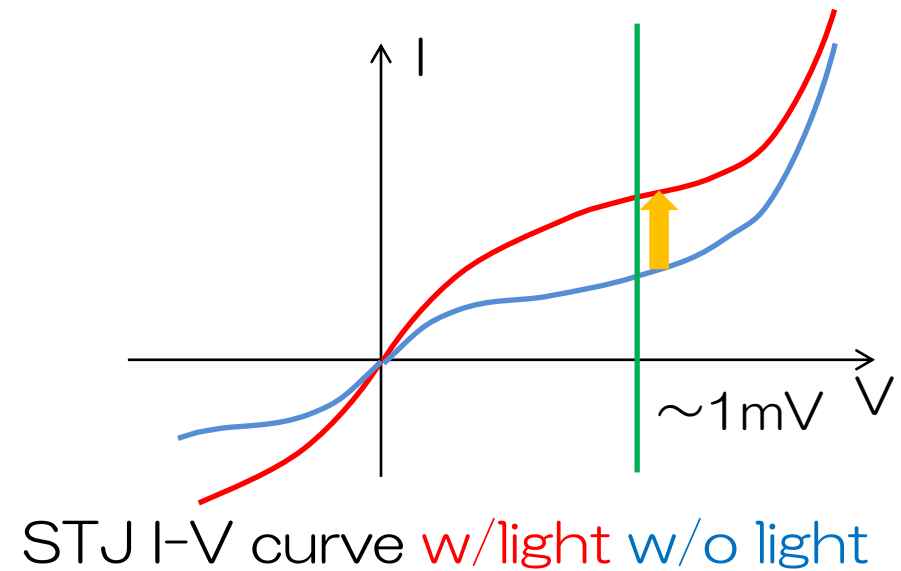
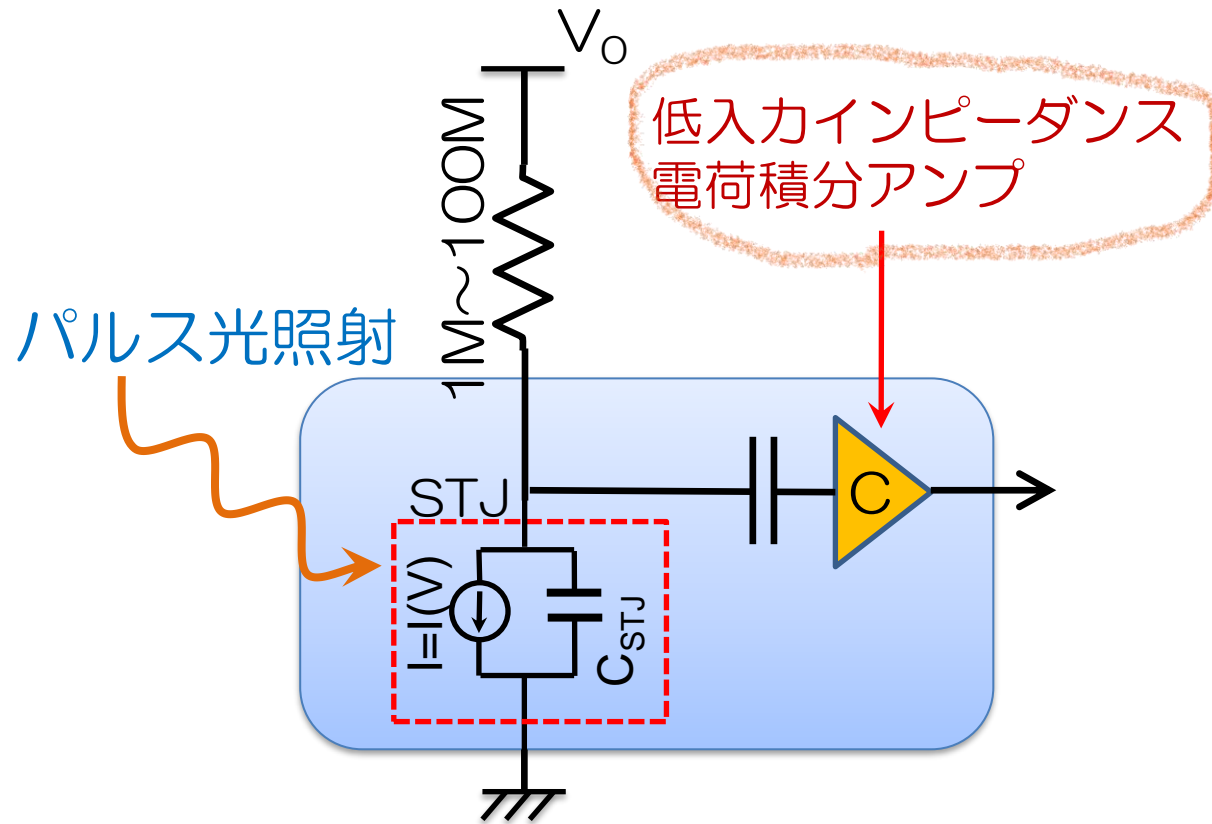
STJ定電流モード読出しのシミュレーション



- Operation voltage: $\sim 1\text{mV}$
- Signal: $\sim 100\text{nA} \cdot 2\mu\text{s}$
- $R_{STJ} \left(= \frac{dV}{dI} \right) \sim 25.5\text{k}\Omega$, $R_{ref} = 1\text{M}\Omega$ の場合

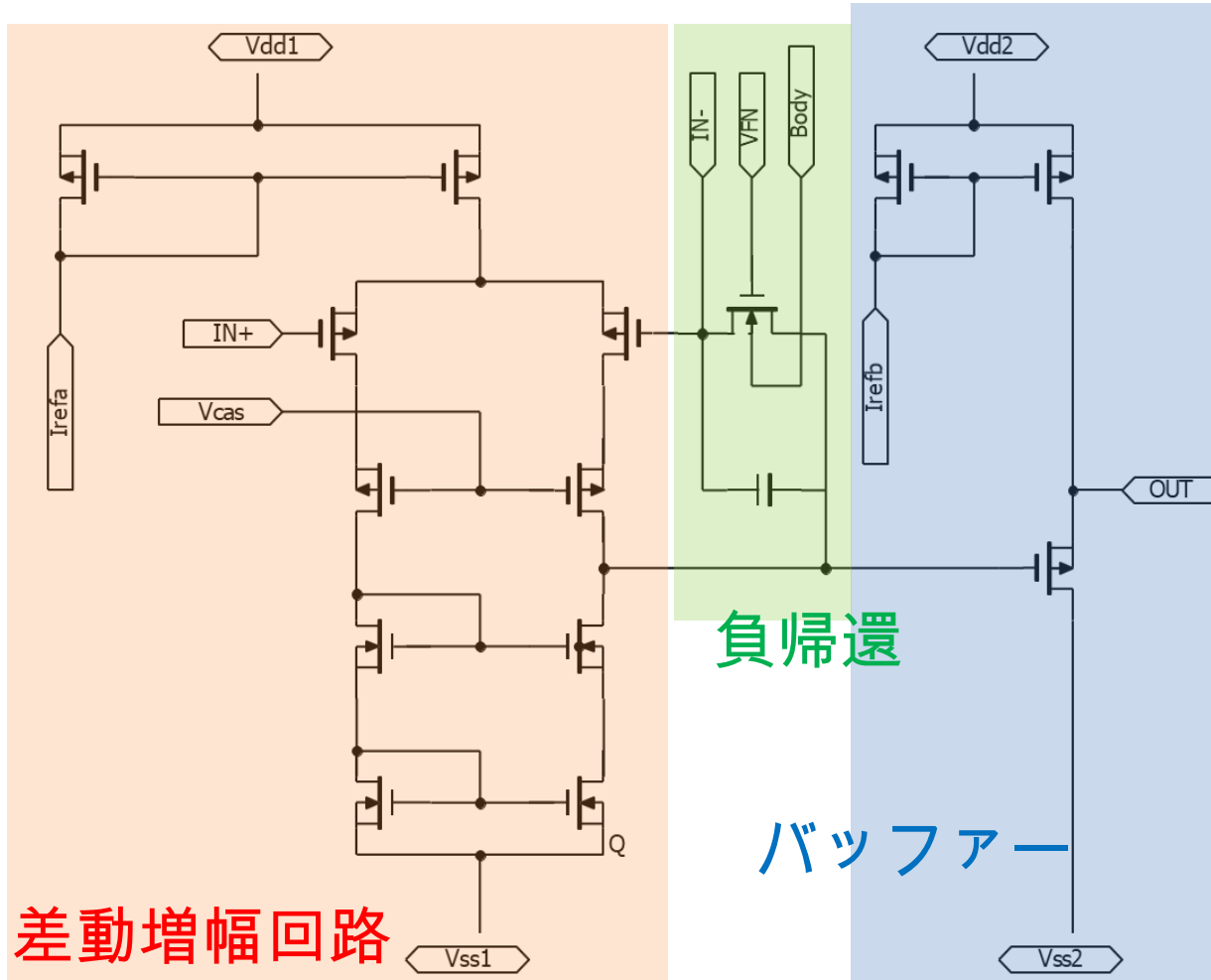
STJ応答は、 $C_{STJ} \times R_{STJ}$ の時定数を持ち、時定数に応じて波高は低くなる。

STJ 光パルス信号読み出し(定電圧モード)



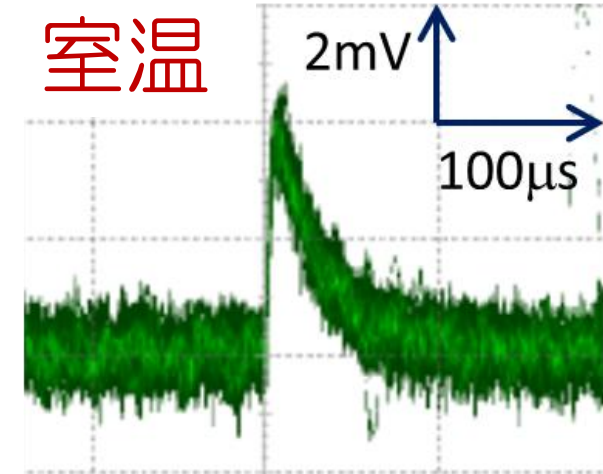
- STJは比較的大きな静電容量を持つ
 - $50\mu\text{m}$ 角 STJ で $\sim 0.1\text{nF}$
- 低入力インピーダンスアンプでAC的に接地して STJを定電圧でオペレート
 - STJで発生する電荷を読み出す

SOI prototype charge sensitive amplifier

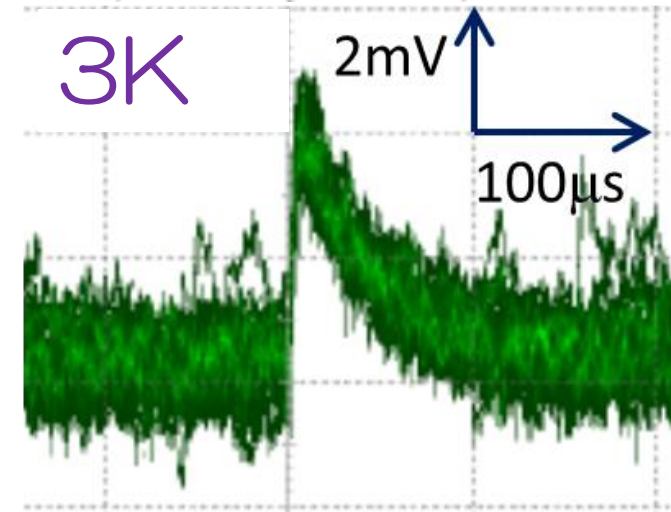


テスト入力電荷 0.49fC

室温



3K



室温と3Kでほぼ同じ動作が確認された

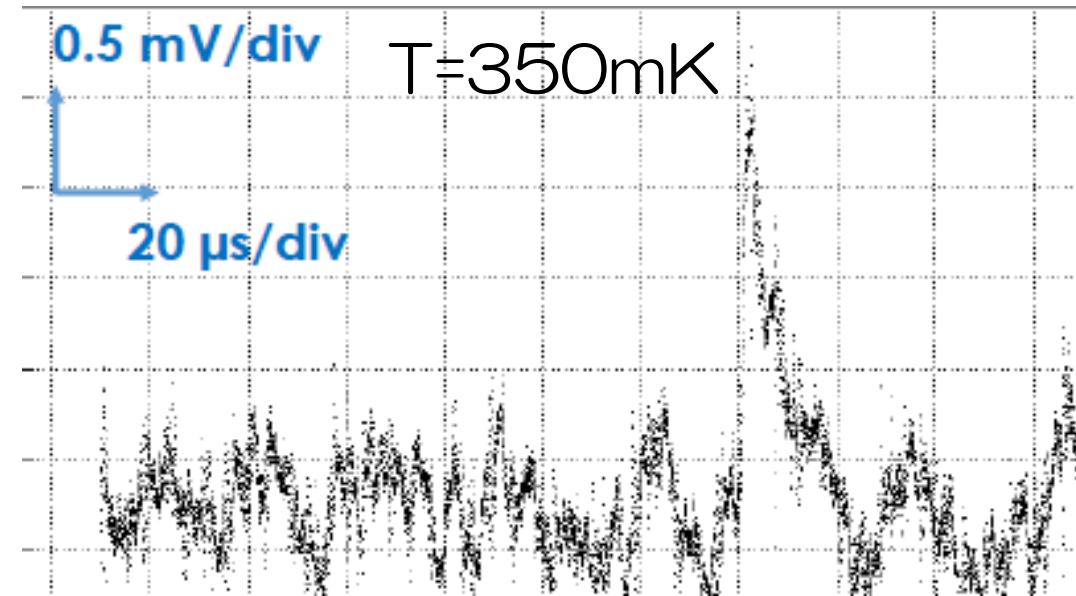
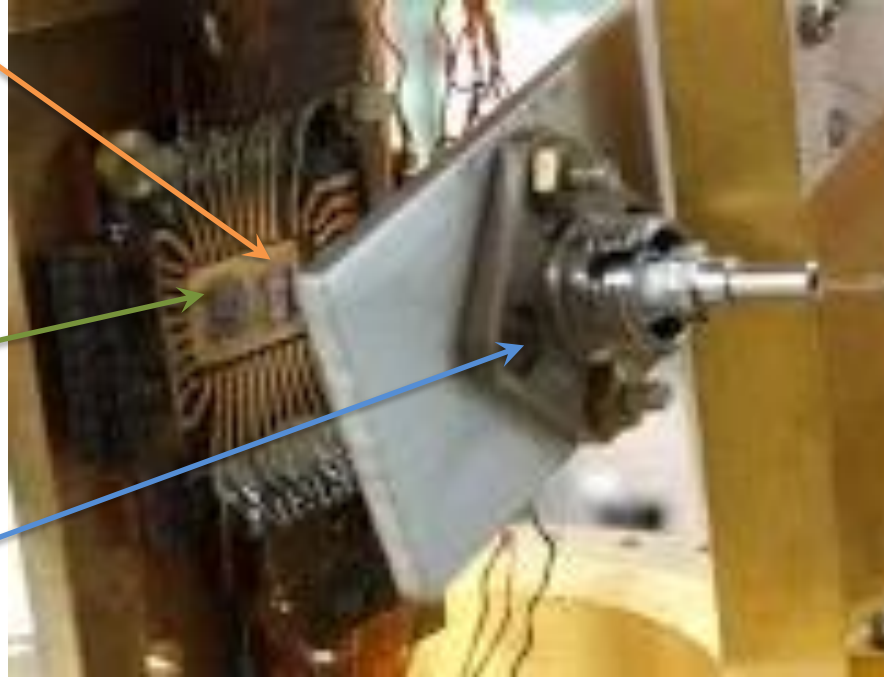
電荷積分型増幅器によるSTJ光応答信号の増幅

STJチップ

産総研CRAVITY製

SOIチップ

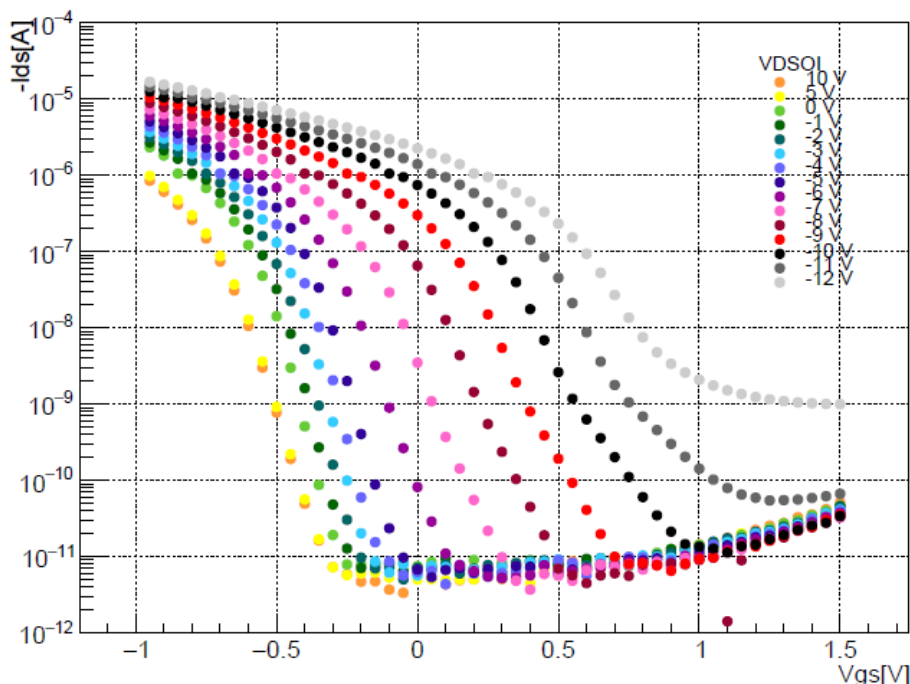
光ファイバ



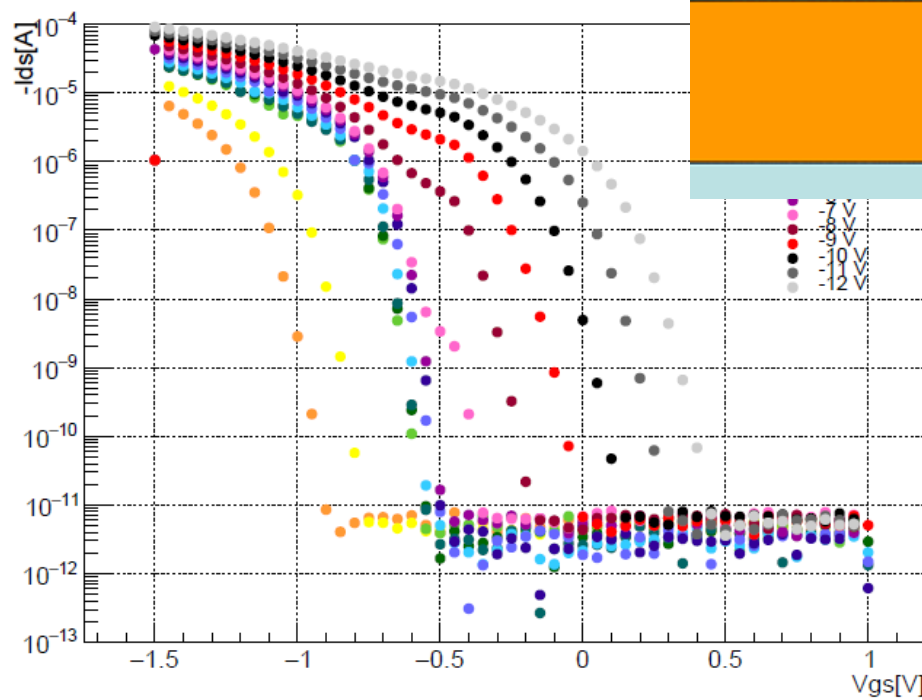
超伝導体センサー(STJ)からの光応答信号(波長465nm/パルス光)を極低温下で電荷積分型増幅器による増幅に成功

- 但し、開ループゲインが設計値より小さかったため、入力インピーダンスが高く、STJからの電荷は十分に増幅できていなかった。

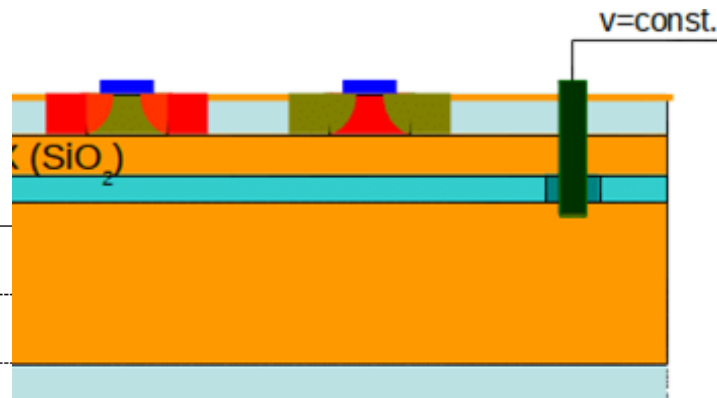
極低温におけるD-SOIによるFETの閾値電圧制御



室温での pMOS-FET



3Kでの pMOS-FET



- 極低温における閾値電圧のシフトを補償可能
- $V=0$ のドレイン電流の急峻な立ち上がり
(室温のSubthreshold swing の理論限界値[60mV/桁]を超える)
→ 超低消費電力実現の可能性

まとめ

- 光検出器となる STJ素子は要求値を満たすものが産総研CRAVITYにて作製可能であるが、この潜在性を十分に引き出すためには極低温増幅器の開発が不可欠。
- SOI 技術を用いた極低温回路は STJ 信号の極低温増幅器を実現する手段として実証され、実用に向けての設計開発を進めている。
- SOI 極低温回路は、室温から極低温までカバーし、さらに極低温において急峻な電流の立ち上がりなどの特徴を用いた幅広い応用への潜在性を秘めている。