

COBAND実験のためのSTJ遠赤外単一光子検出器 開発現状

R&D Status of STJ far-infrared single photon detector for COBAND



2021年11月26日

TCHoU 構成員会議・成果報告&交流会

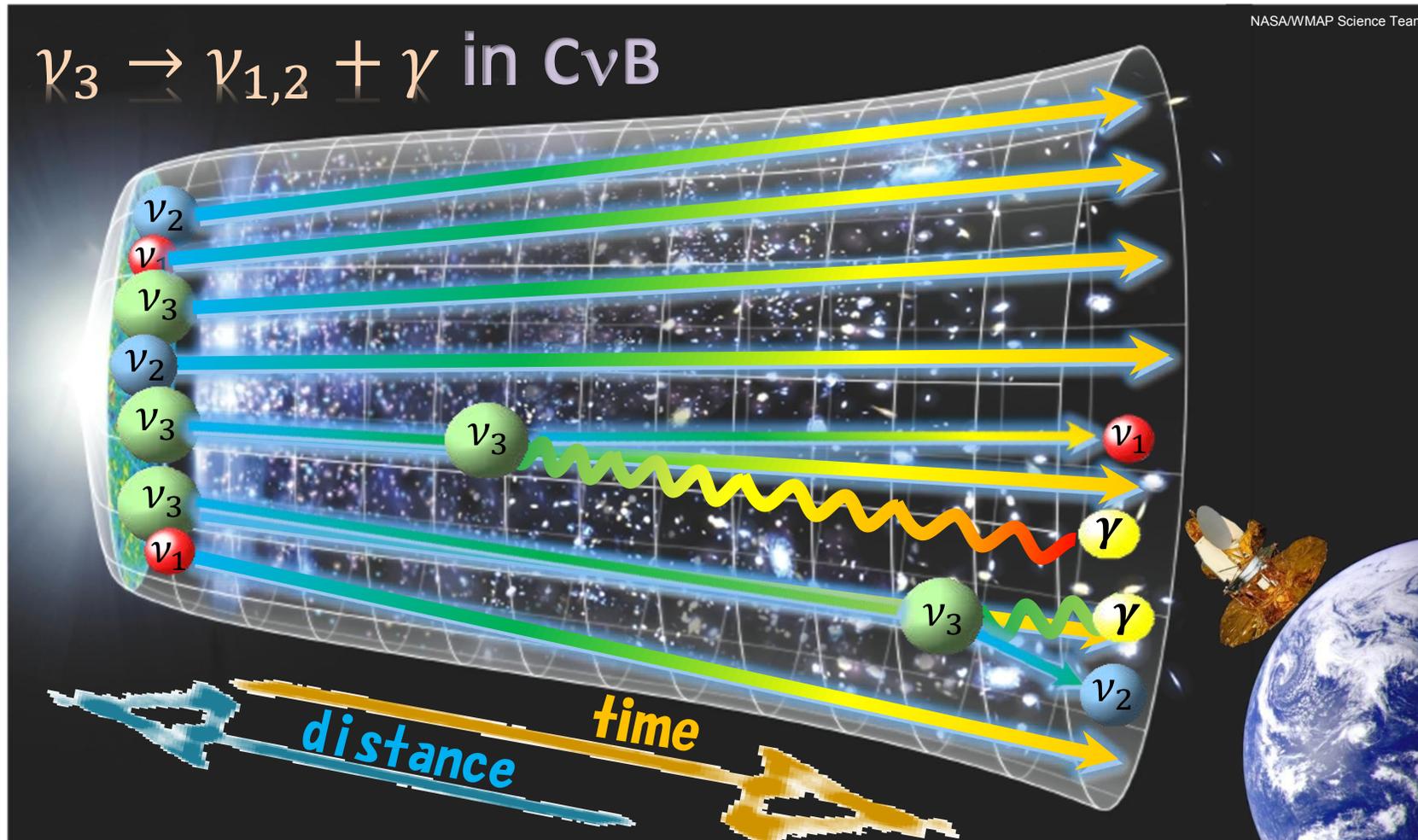
武内 勇司

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!!!

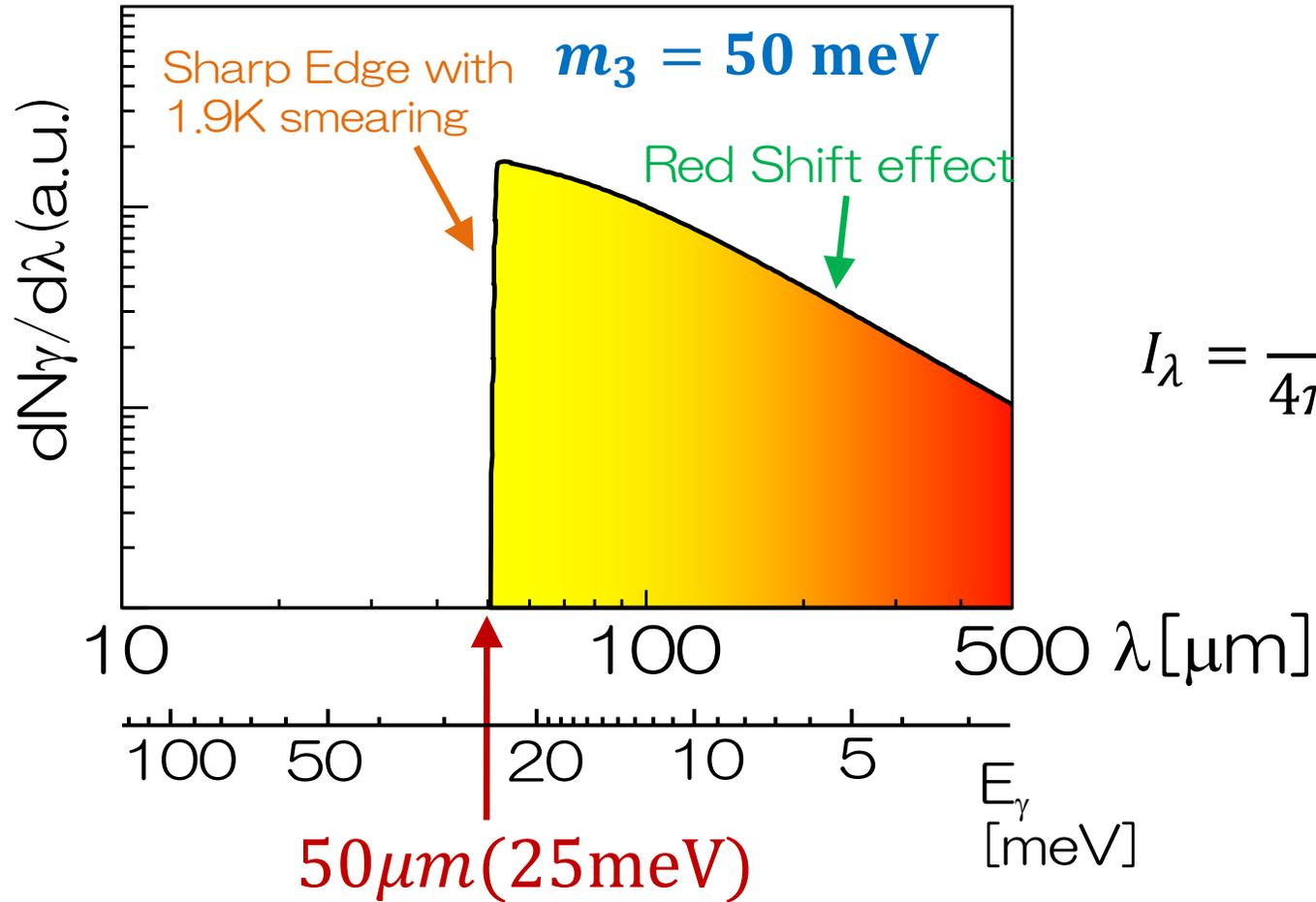
→ 宇宙背景ニュートリノの直接検出!!!

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

→ ダークエネルギーの時間発展

期待される宇宙背景ニュートリノの崩壊光の波長分布

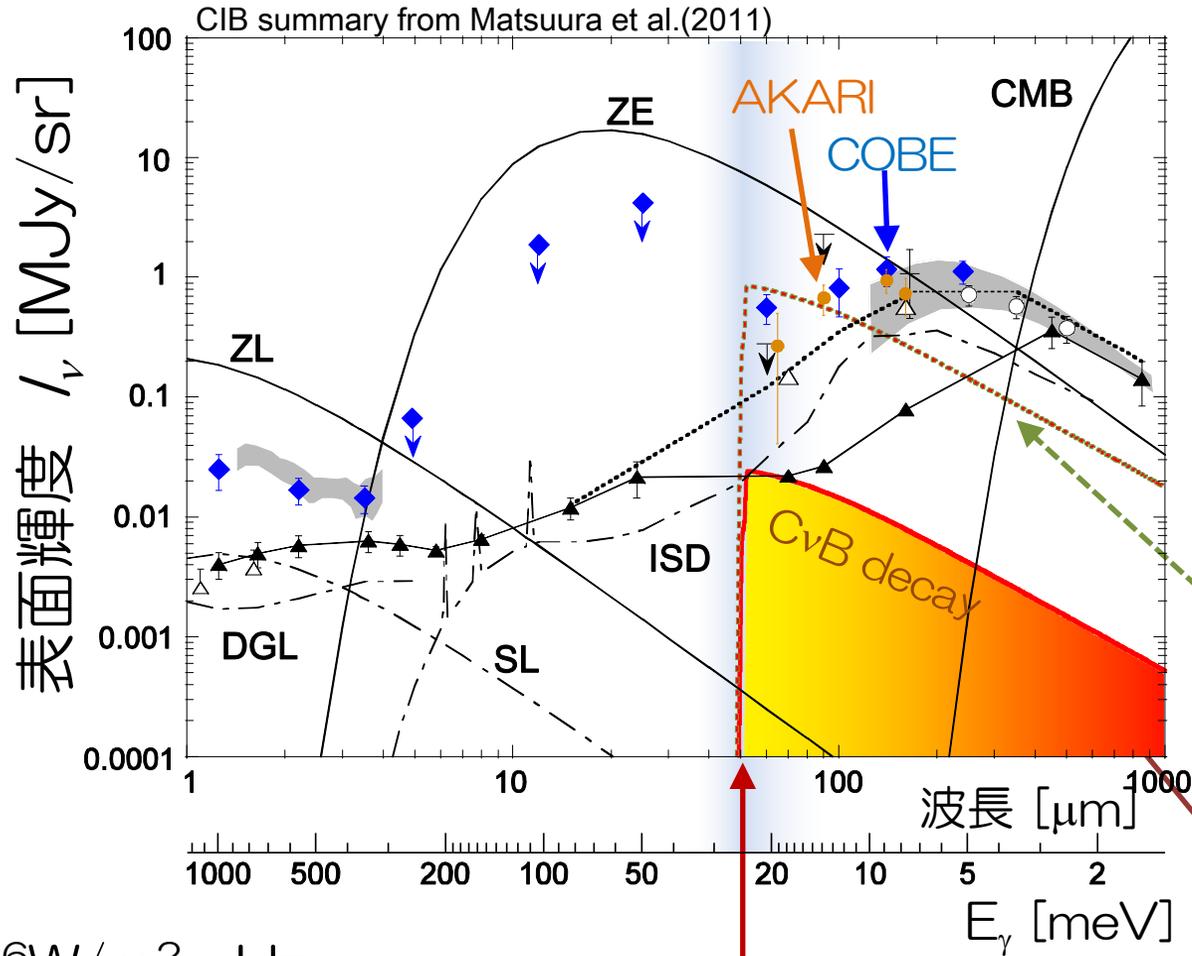
λ_γ distribution in $\nu_3 \rightarrow \nu_2 + \gamma$



$$I_\lambda = \frac{1}{4\pi\tau_\nu} \rho_{\nu,0} \frac{hc}{\lambda^2} \frac{c}{H_0} \left[\Omega_{m,0} \left(\frac{\lambda}{\lambda_s} \right)^3 + \Omega_{\Lambda,0} \right]^{-\frac{1}{2}}$$

鋭いエッジを持った分布は、ある質量を持った粒子の二体崩壊によるもの
 → ニュートリノ崩壊の決定的証拠といえる

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)

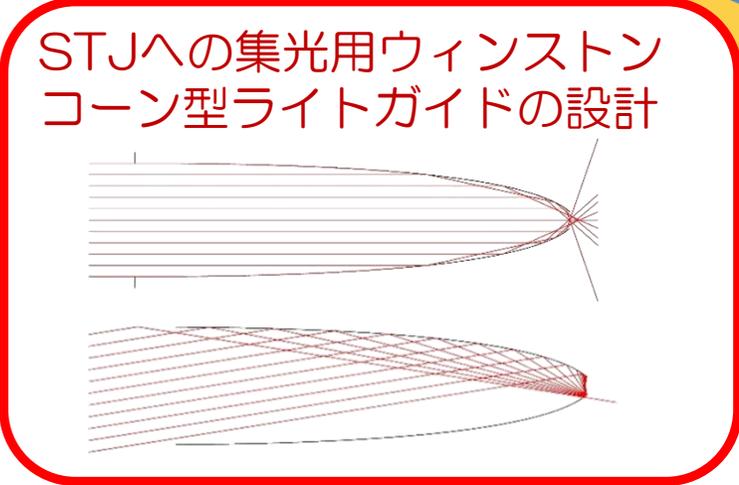
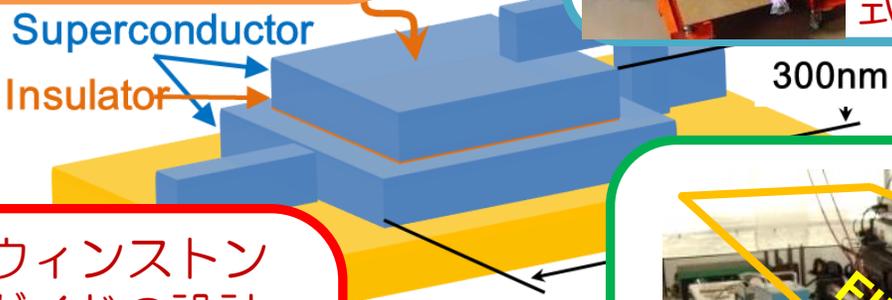
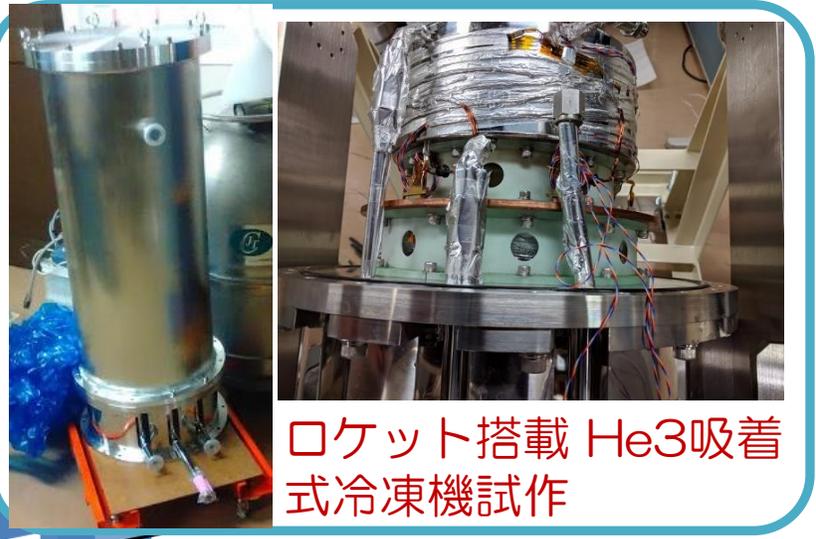
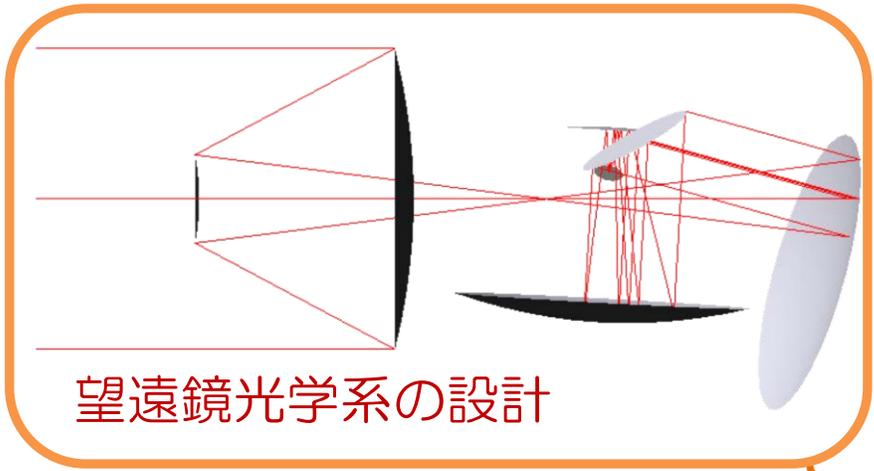
$\tau = 3 \times 10^{12} \text{ 年}$

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

$\tau = 1 \times 10^{14} \text{ 年}$

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

COBAND ロケット実験へ向けて



JAXA 観測ロケット S-520

COBAND (COsmic BAcground 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.



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

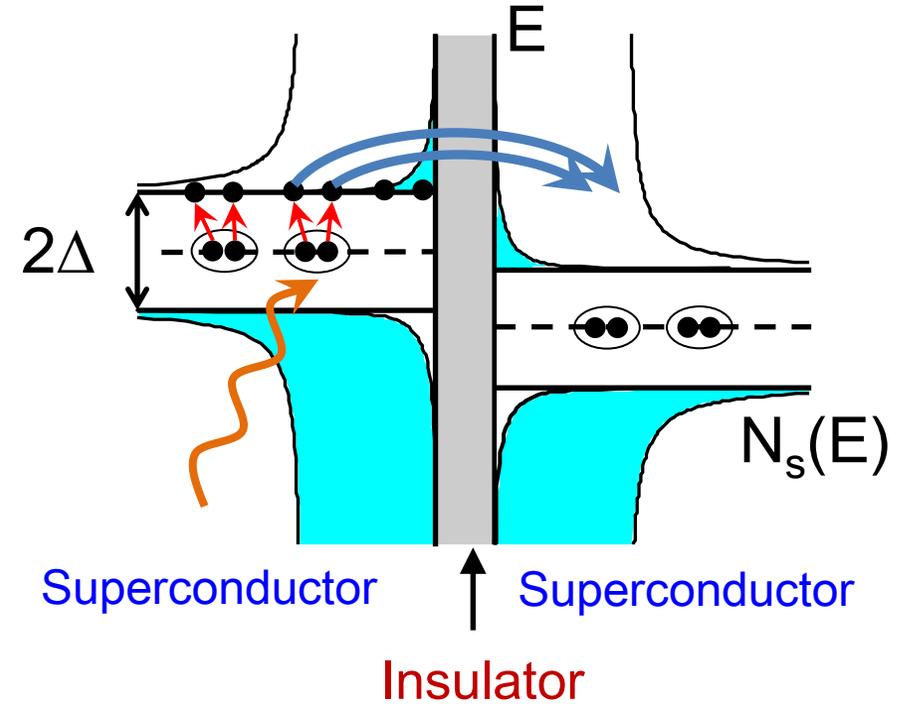
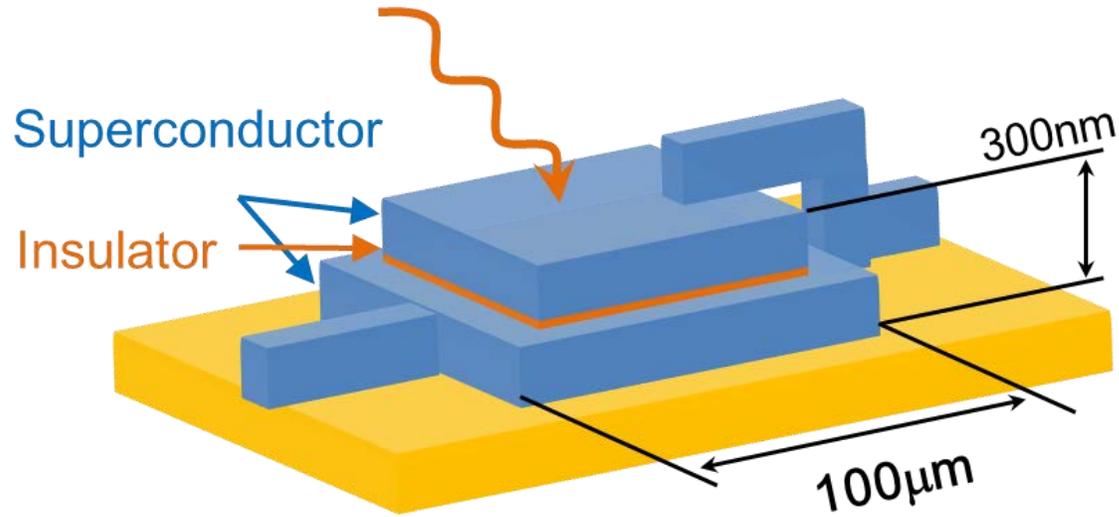
- Dark count rate が到達可能な光強度測定の感度を定める



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

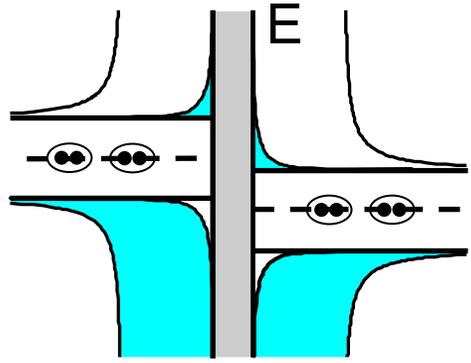
Superconducting Tunnel Junction (STJ) Detector

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

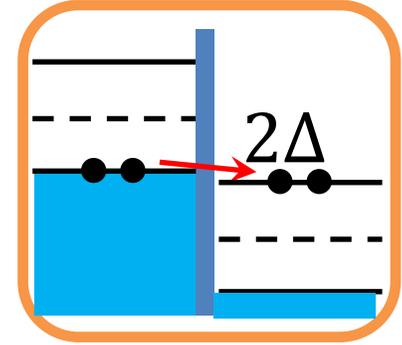
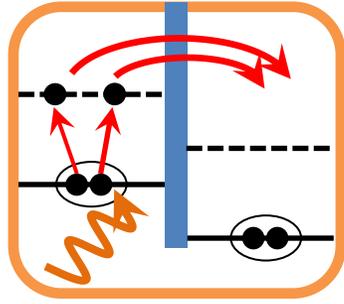
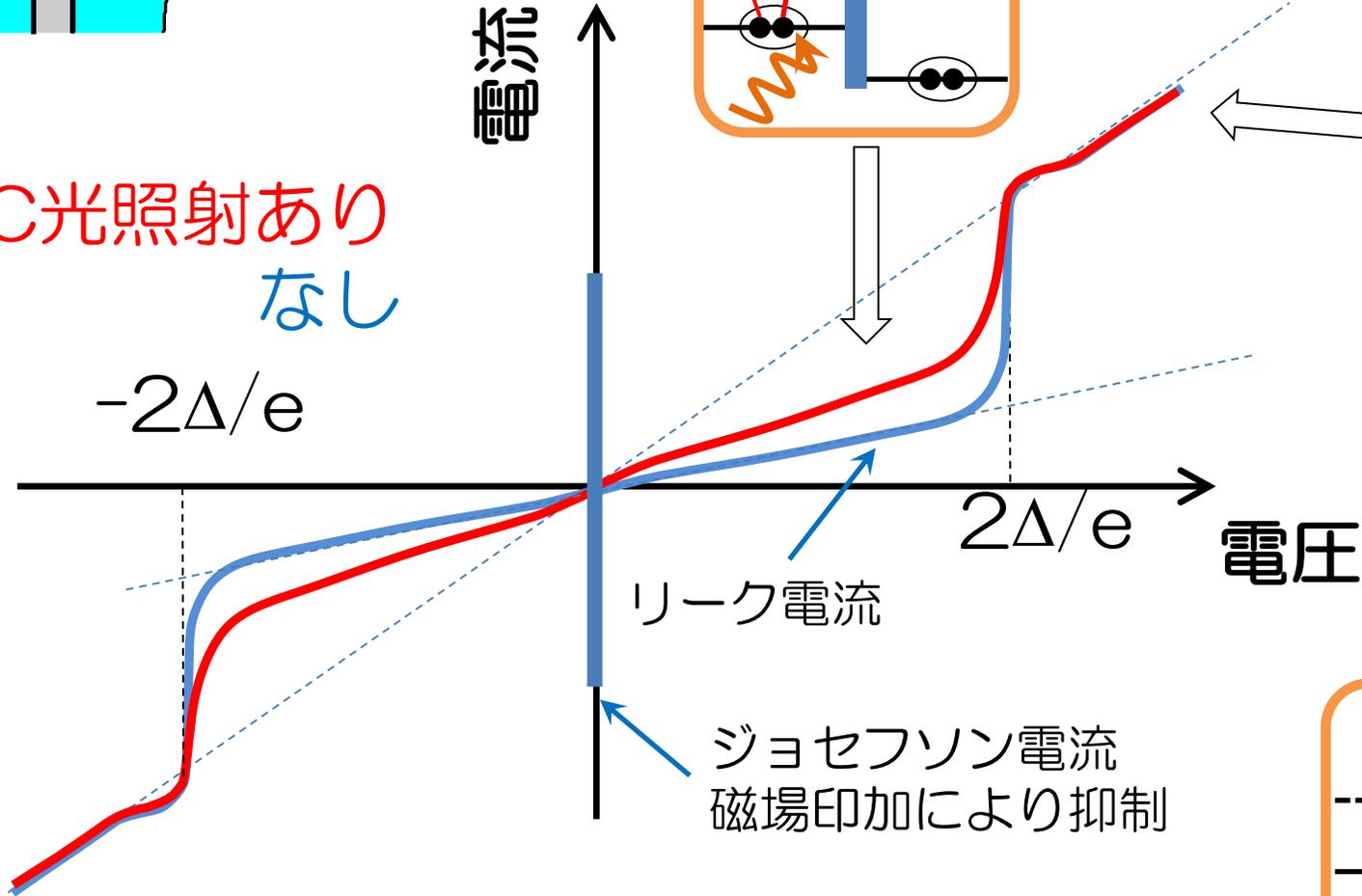


- 遠赤外光 (25meV) よりも小さな超伝導ギャップエネルギー (Δ)
→ 遠赤外光の一光子検出が可能
- 比較的高速な応答 ($\sim\mu\text{s}$) → 光子計数に有利

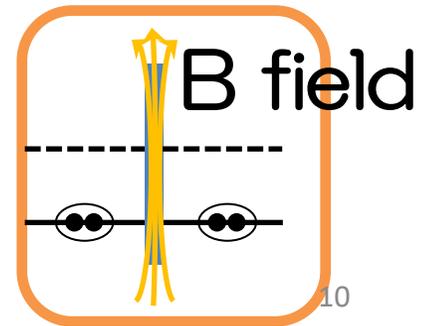
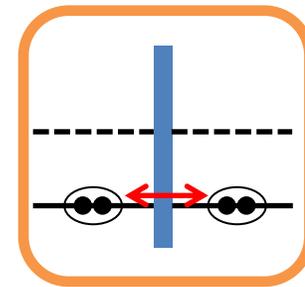
STJ I-V 特性



DC光照射あり
なし

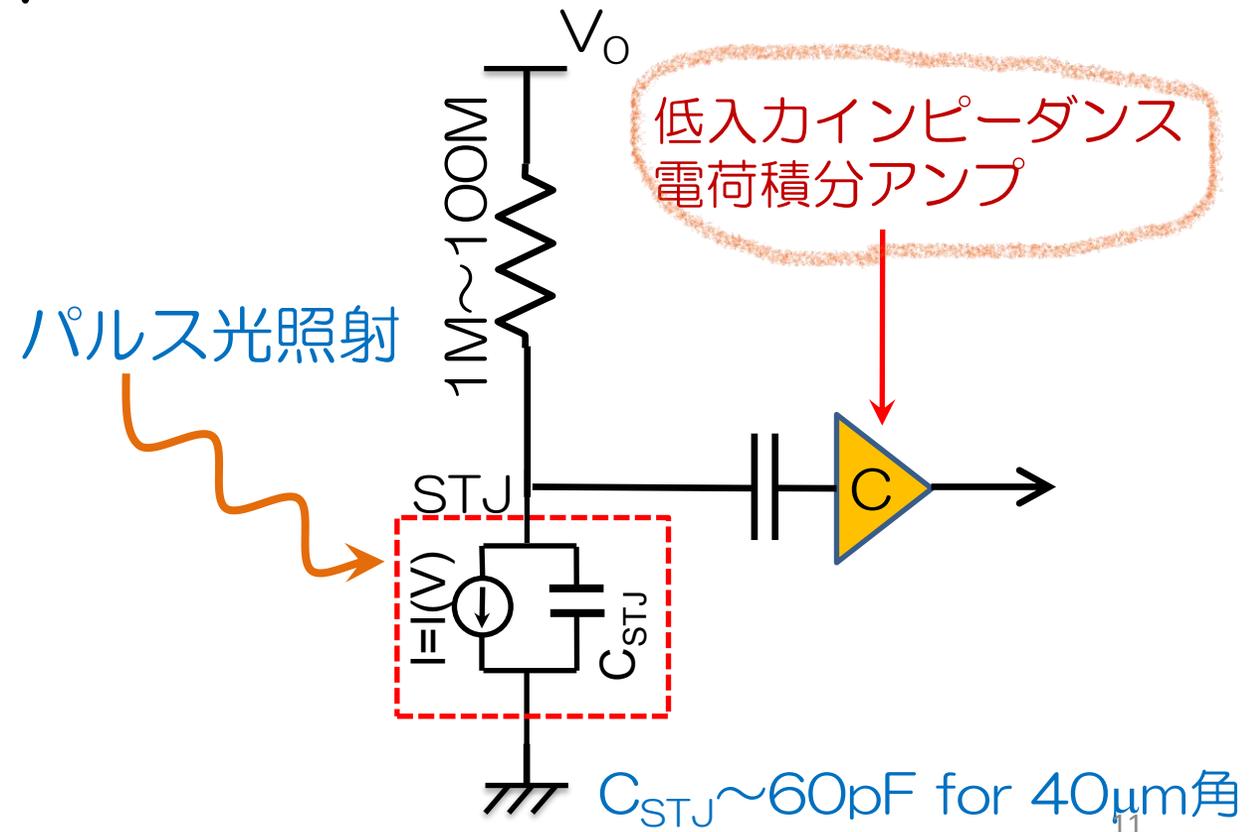
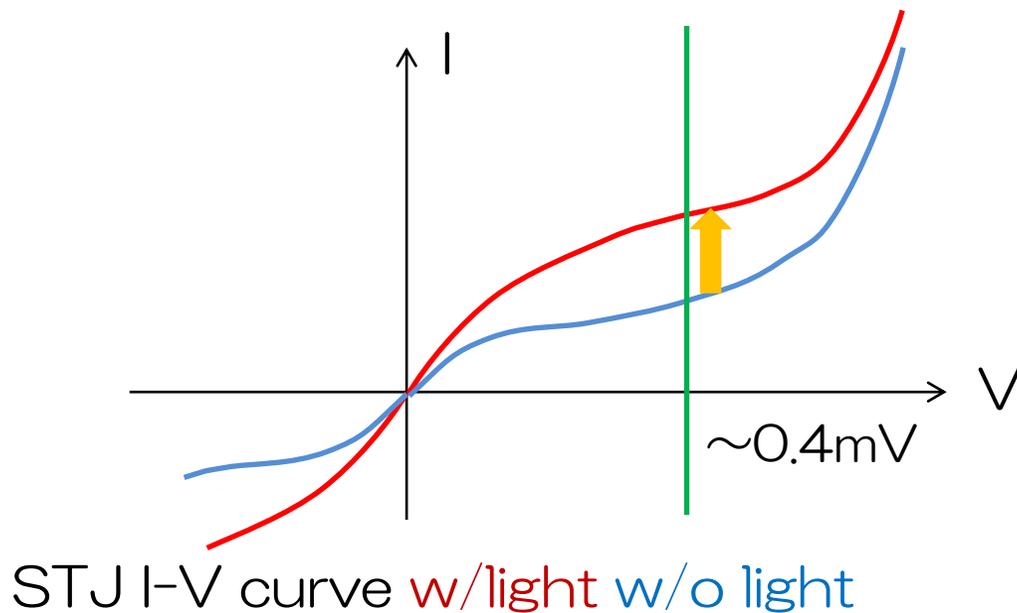


ジョセフソン電流
磁場印加により抑制



STJ 光パルス信号読み出し(定電圧動作)

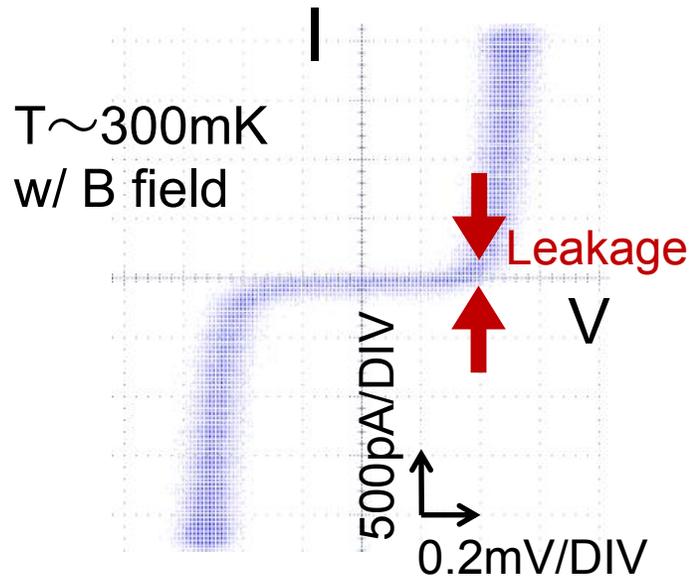
- STJは比較的大きな静電容量を持つ
 - 40 μm 角 STJ で $\sim 60\text{pF}$
 - 早い信号成分は C_{STJ} へ逃げる (例えば $f=1\text{MHz}$ に対して 60pF は $Z\sim 2.7\text{k}\Omega$)
- 低入力インピーダンスアンプでSTJ上端電極をAC的に接地して STJを定電圧 ($|V| < 2\Delta/e$) でオペレート: Nb/Al-STJ の場合 $\Delta\sim 0.6\text{meV}$
 - STJで発生する電荷を読み出す



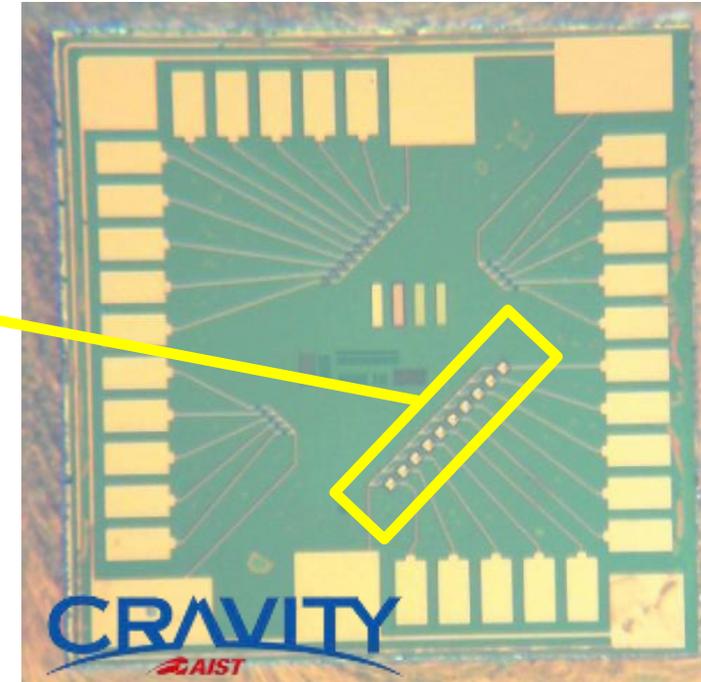
CRVAVITY製Nb/Al-STJ

産総研CRAVITY で作製された50 μm 角 Nb/Al-STJ

2.9 \times 2.9 mm^2 STJ chip



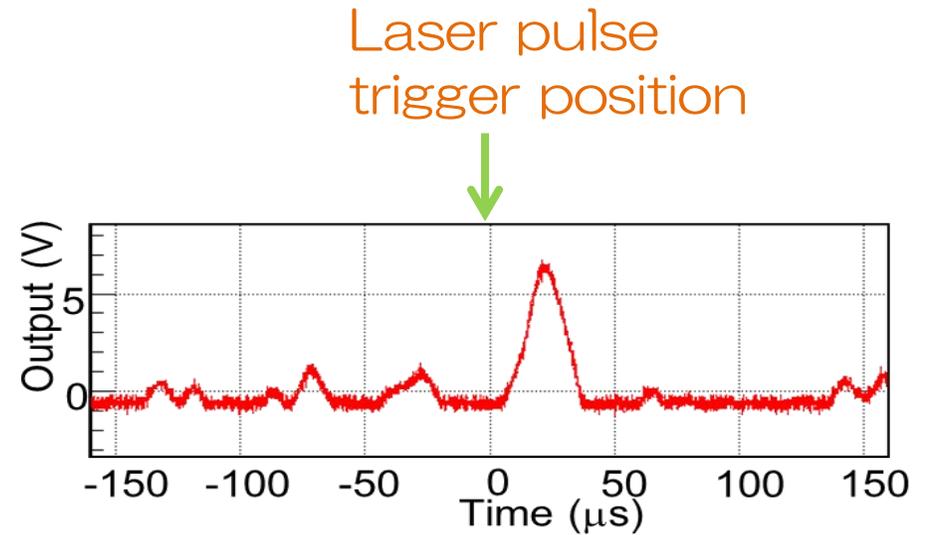
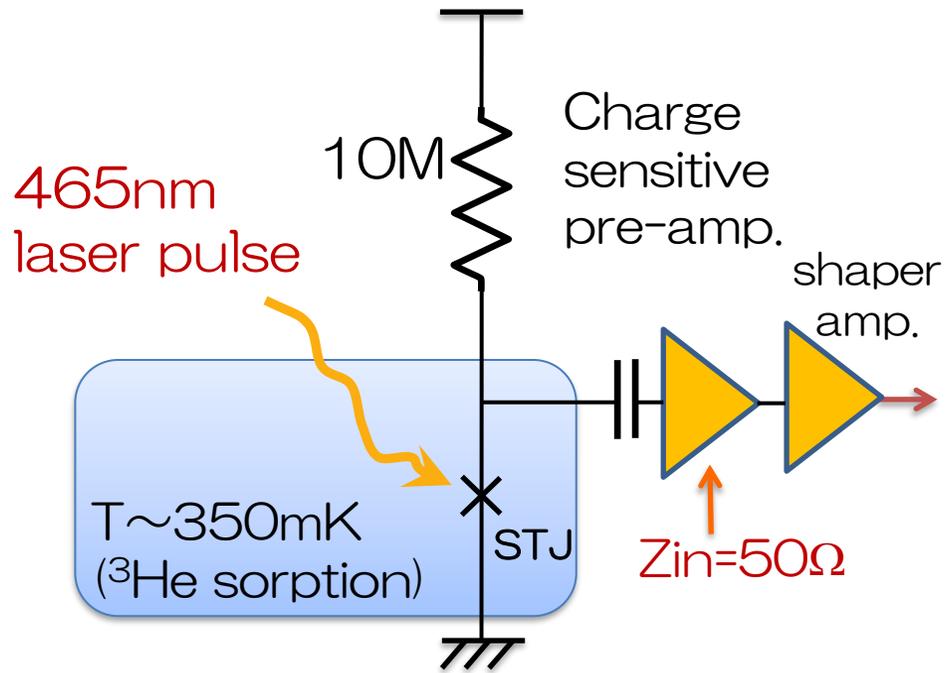
50 μm 角 STJ の
10素子配列



- 50 μm 角でリーク200pA@0.4V, 20 μm 角ならリーク50pA@0.4mV 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

STJ信号の電荷積分型アンプ（室温）での読み出し

- Illuminate 465nm laser pulse on $100 \times 100 \mu\text{m}^2$ Nb/Al-STJ
- STJ is read with low Z_{in} amp. STJ is in constant voltage mode.

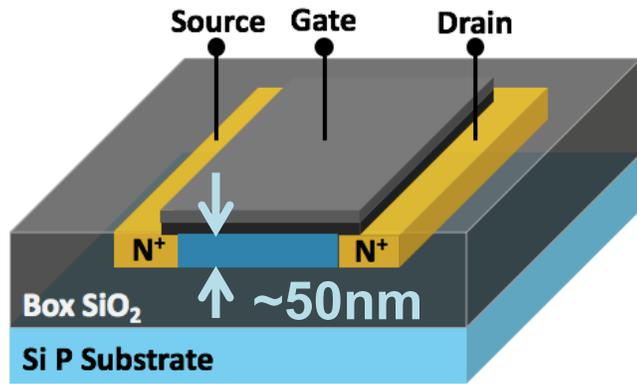


Detected ~ 4 photons per pulse

Observed response to several VIS photons. However, to achieve FIR single photon detection, need ultra-low noise readout

→ Employ cryogenic amplifier close to STJ

FD-SOI-MOSFET at cryogenic temperature

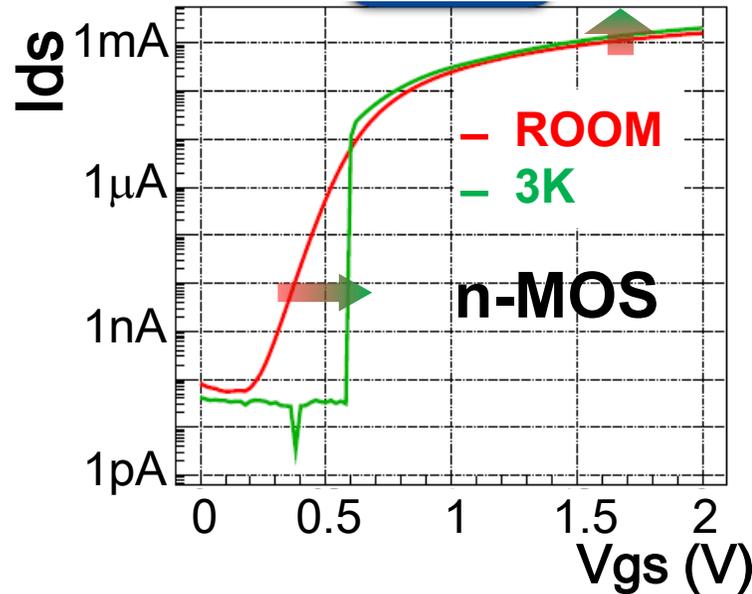
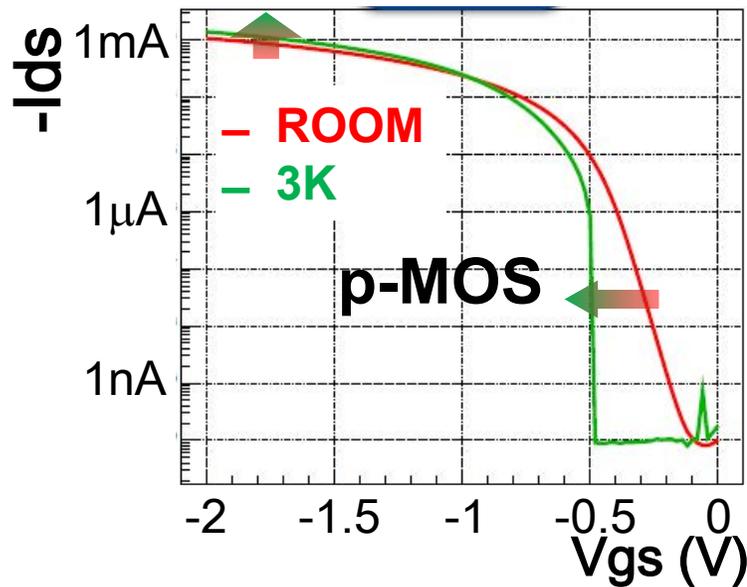


FD-SOI : Fully Depleted - Silicon On Insulator

- ❑ Very thin channel layer in MOSFET on SiO₂
- ❑ 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 $|V_{ds}|=1.8\text{V}$



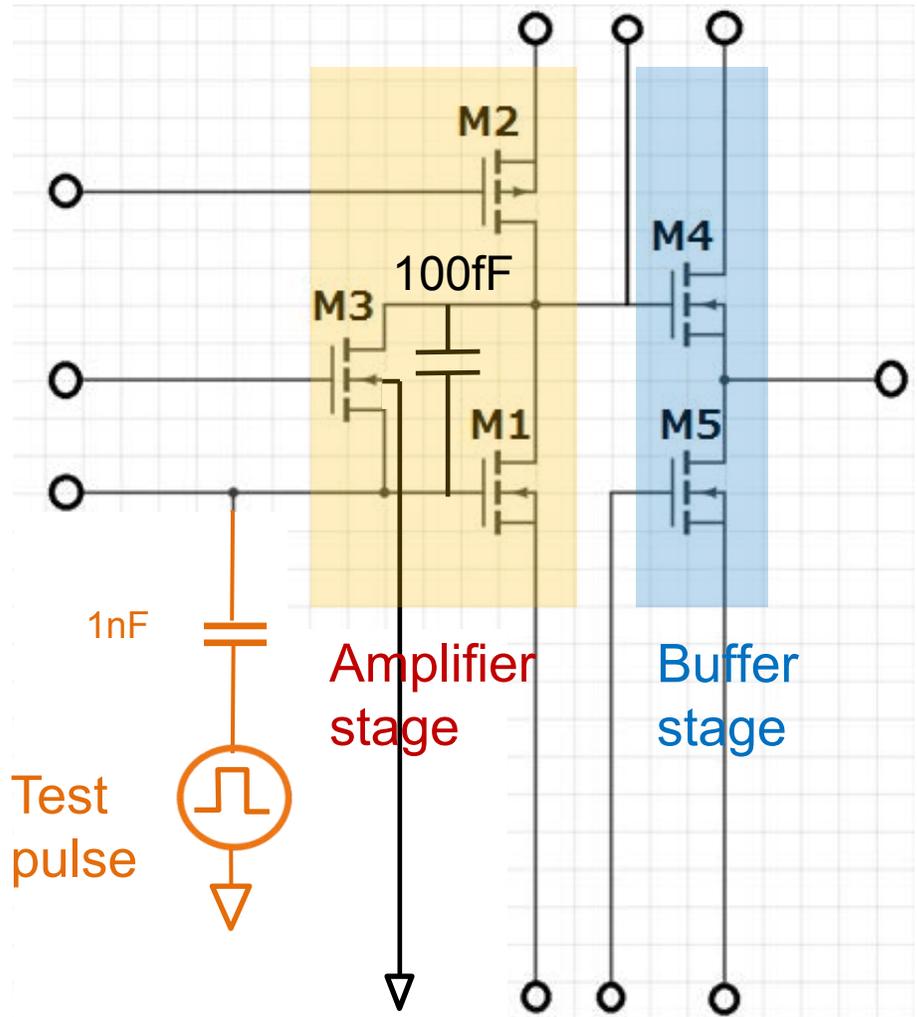
V_{th} の移動 : $\Delta V_{th} \sim 0.2\text{V}$

飽和領域電流の増加 : 1.5倍

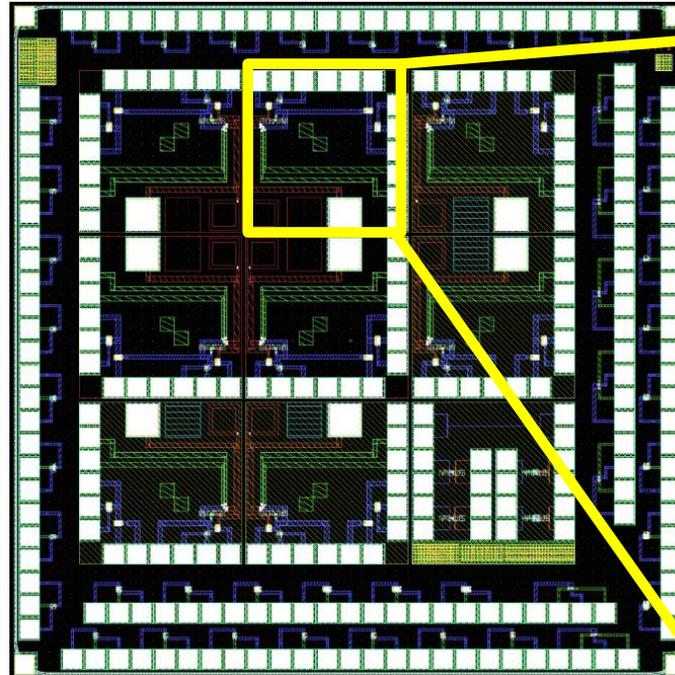
サブスレッシュヨルドスイング
60mV/桁 \rightarrow 20mV/桁

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

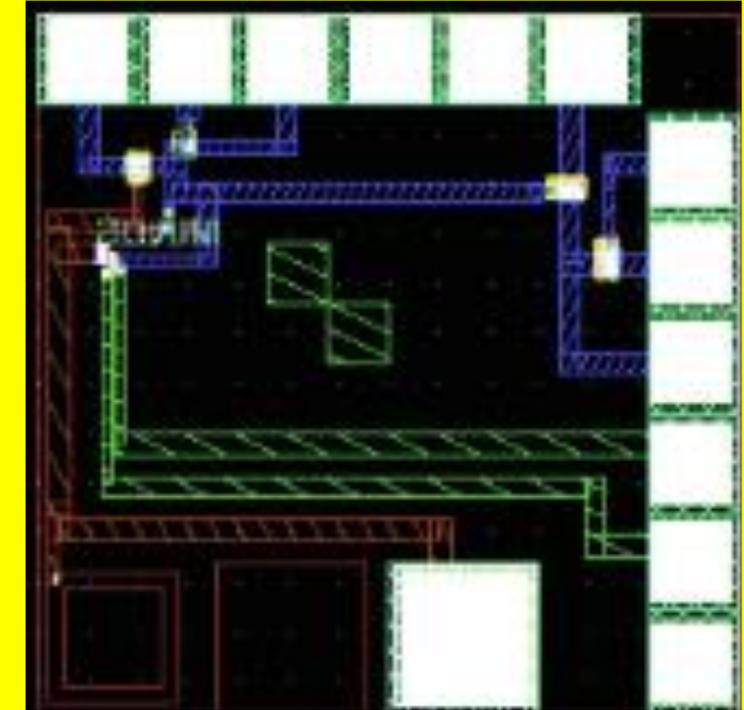
SOI prototype amplifier for demonstration test



2.9×2.9mm² SOI chip



SOI-STJ4 circuit

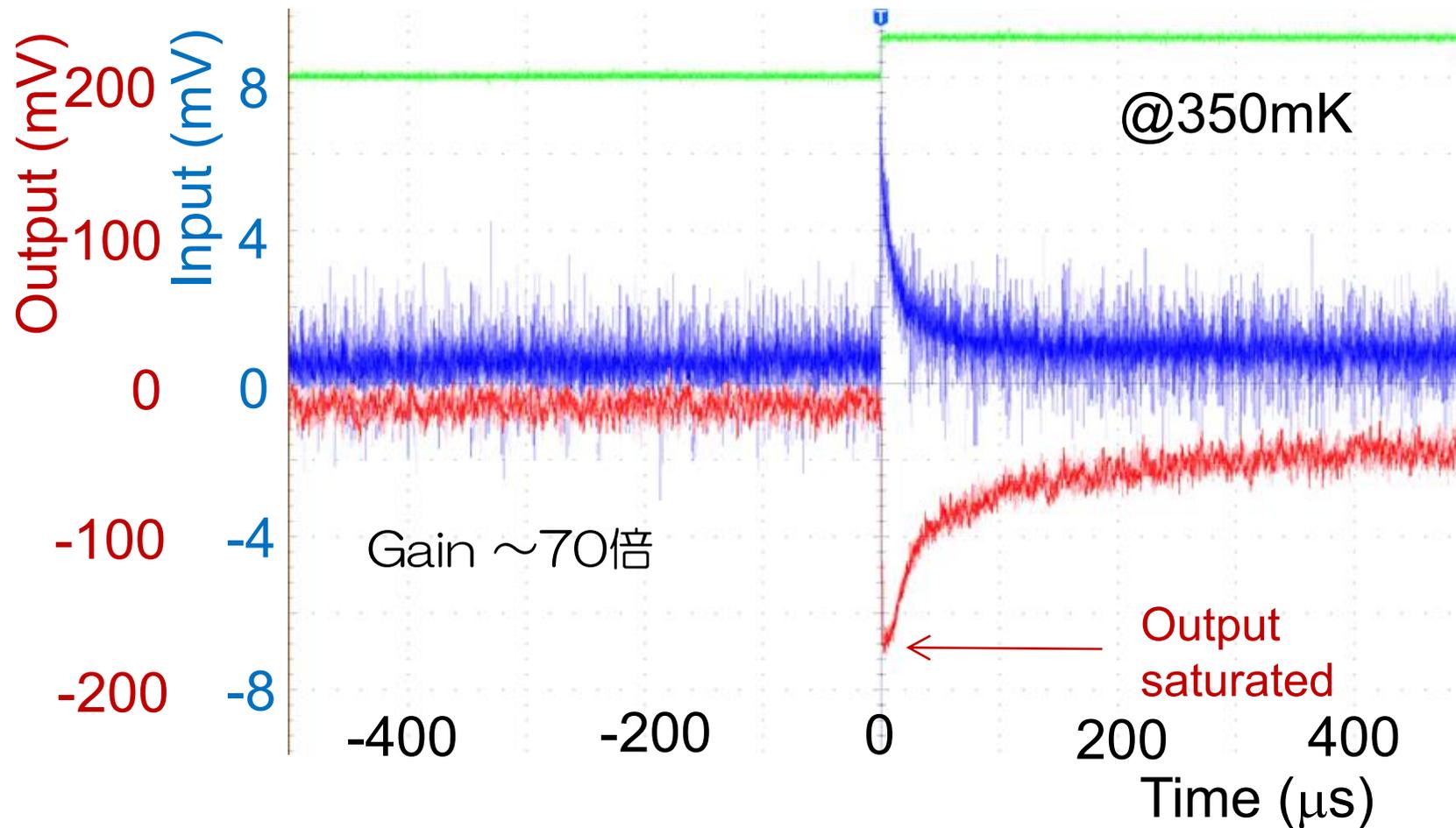


- ソース接地増幅段
- ◆ p-MOS電流源負荷
- ソースフォロアのバッファーステージ
- 消費電力：～100μW

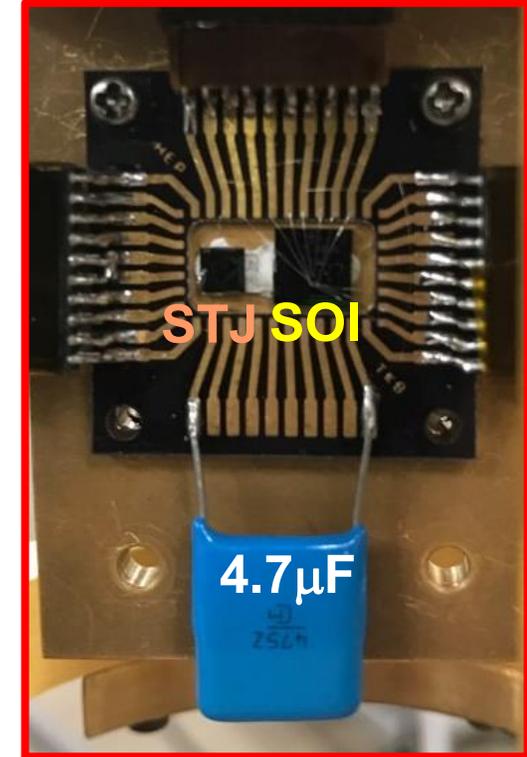
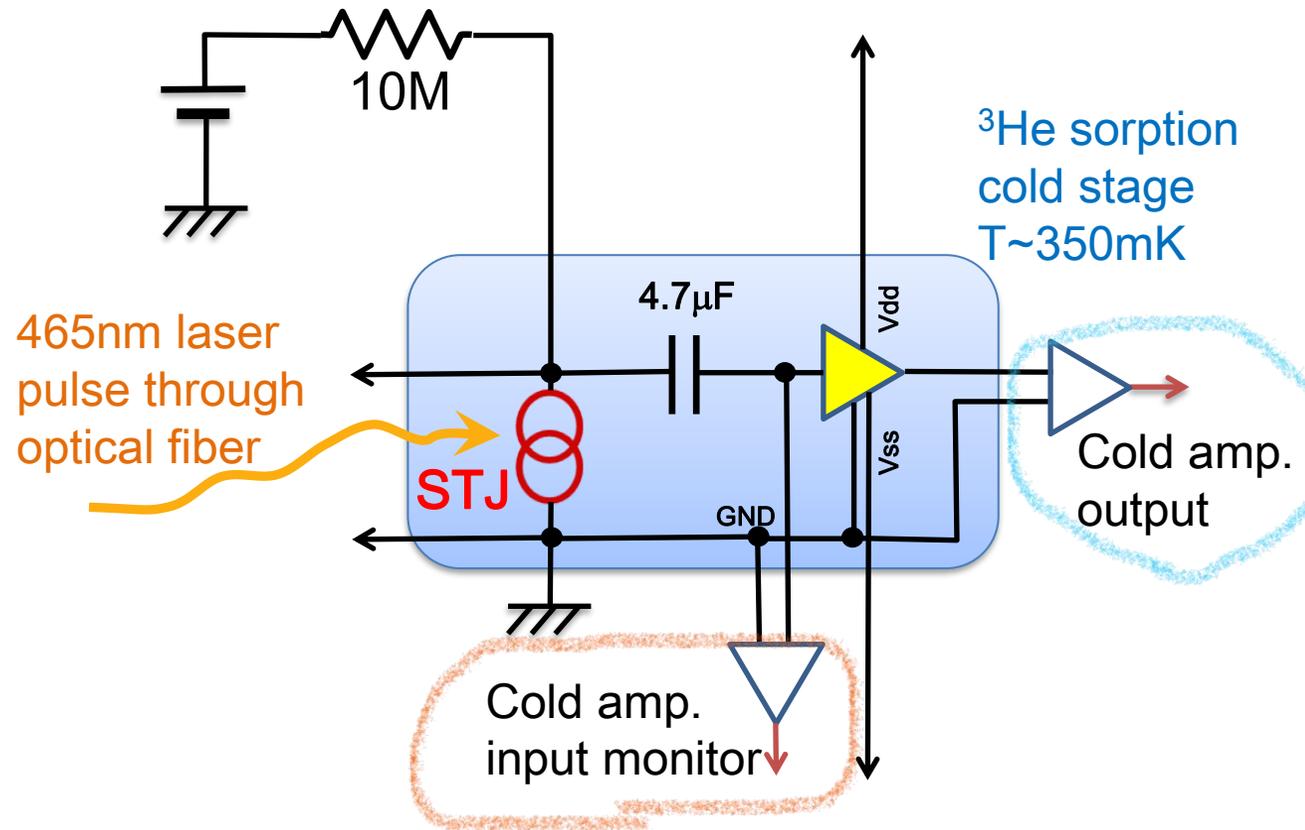
Layout design is supported through the activities of VDEC, and SOI fabrication is done at LAPIS semiconductor in a MPW run

Test pulse injection to SOI-STJ4

350mKにて, 10mV 矩形波を1nF のキャパシタンスを通して入射

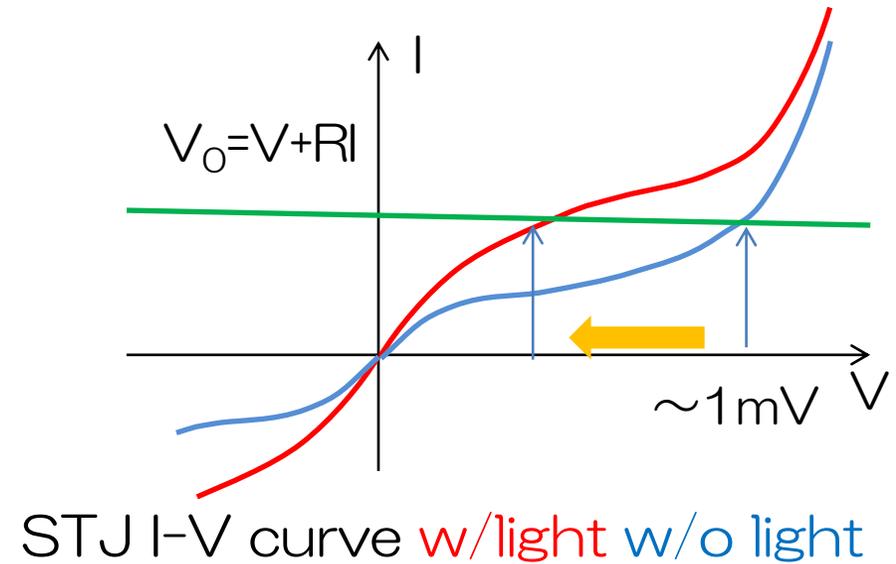
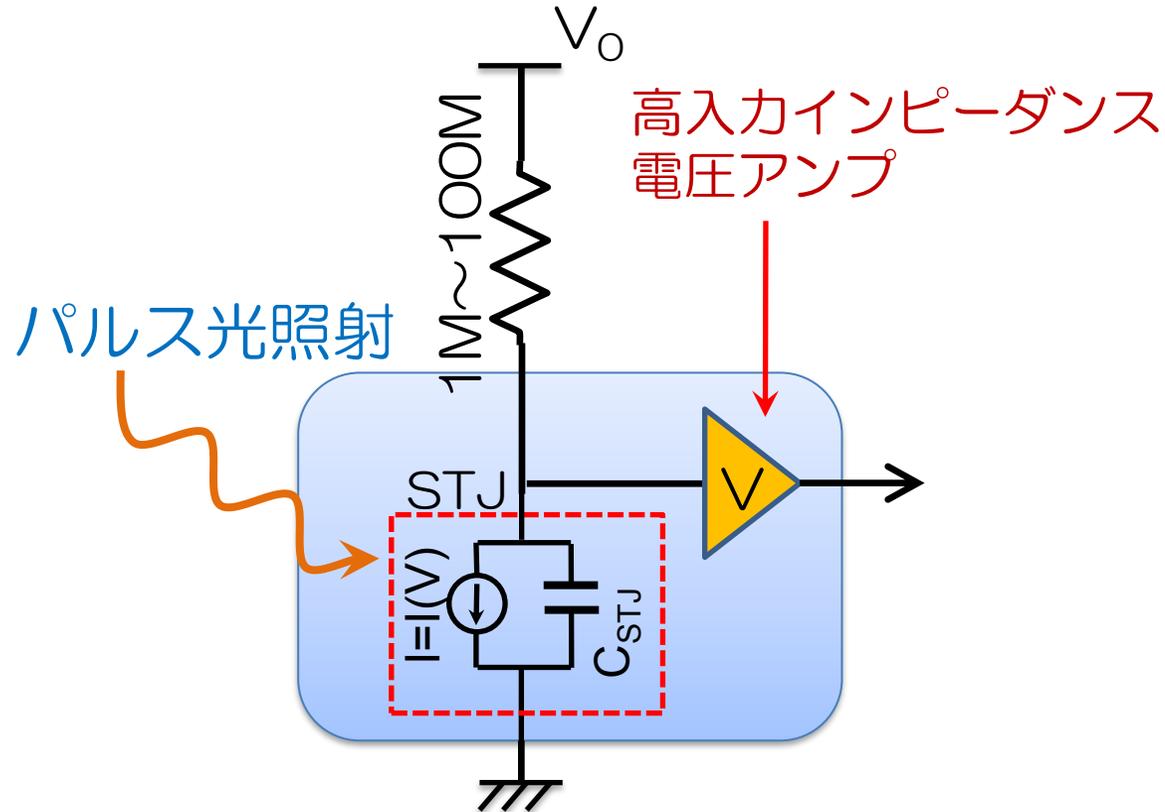


STJ response to laser pulse amplified by Cold amplifier



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

電圧アンプによるSTJ 光パルス信号読み出し(定電流モード)



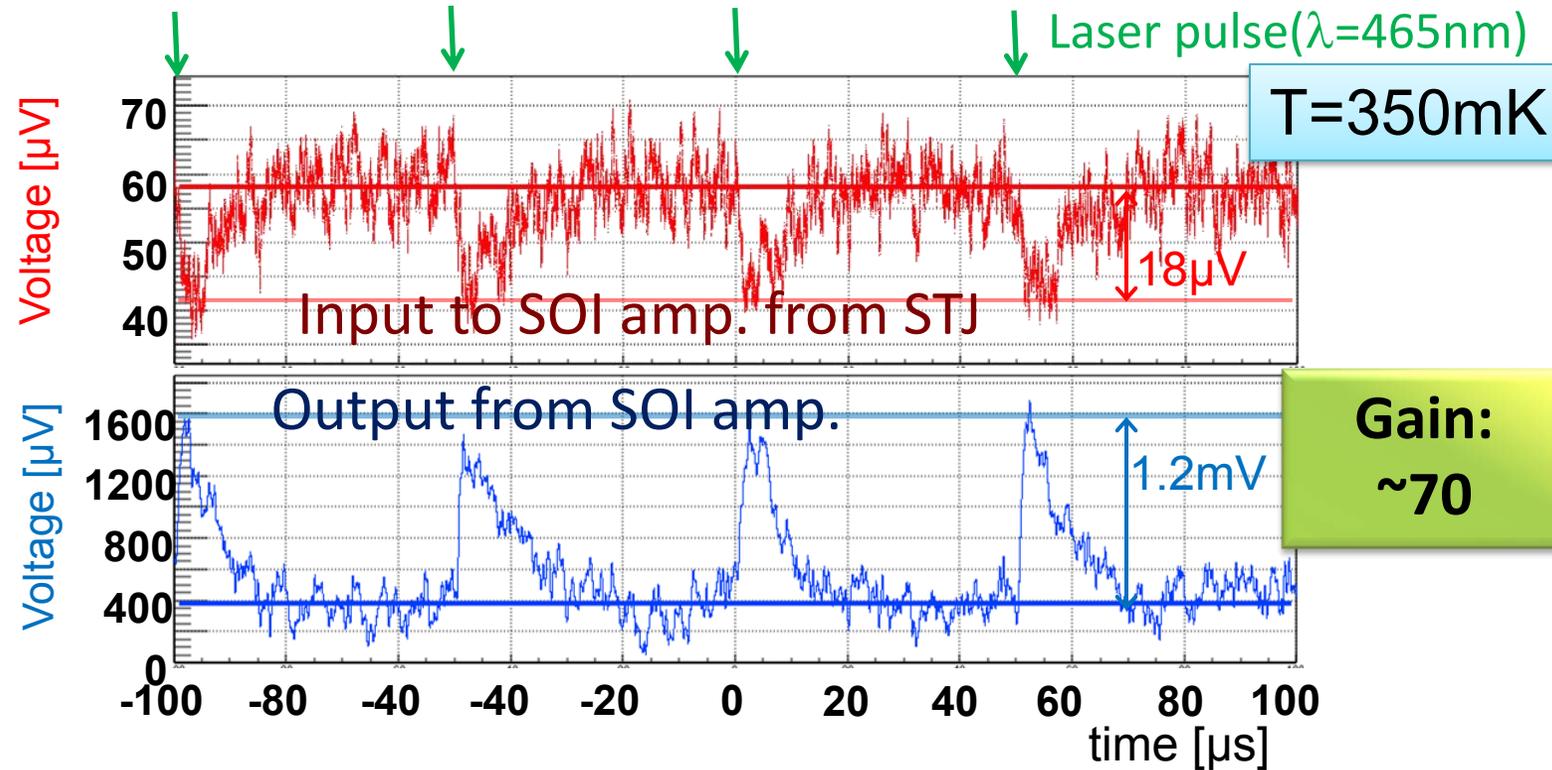
- STJに比べて大きな抵抗を直列接続
 - STJから見るとほぼ電流源
 - 冷凍機の外から容易にSTJへ定電流バイアスを印加可能
- 光応答信号は、STJの電圧降下として見える
 - 高入力インピーダンス電圧アンプで読み出し

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 $\sim 0.1\text{nF}$

STJ response to laser pulse amplified by Cold amplifier

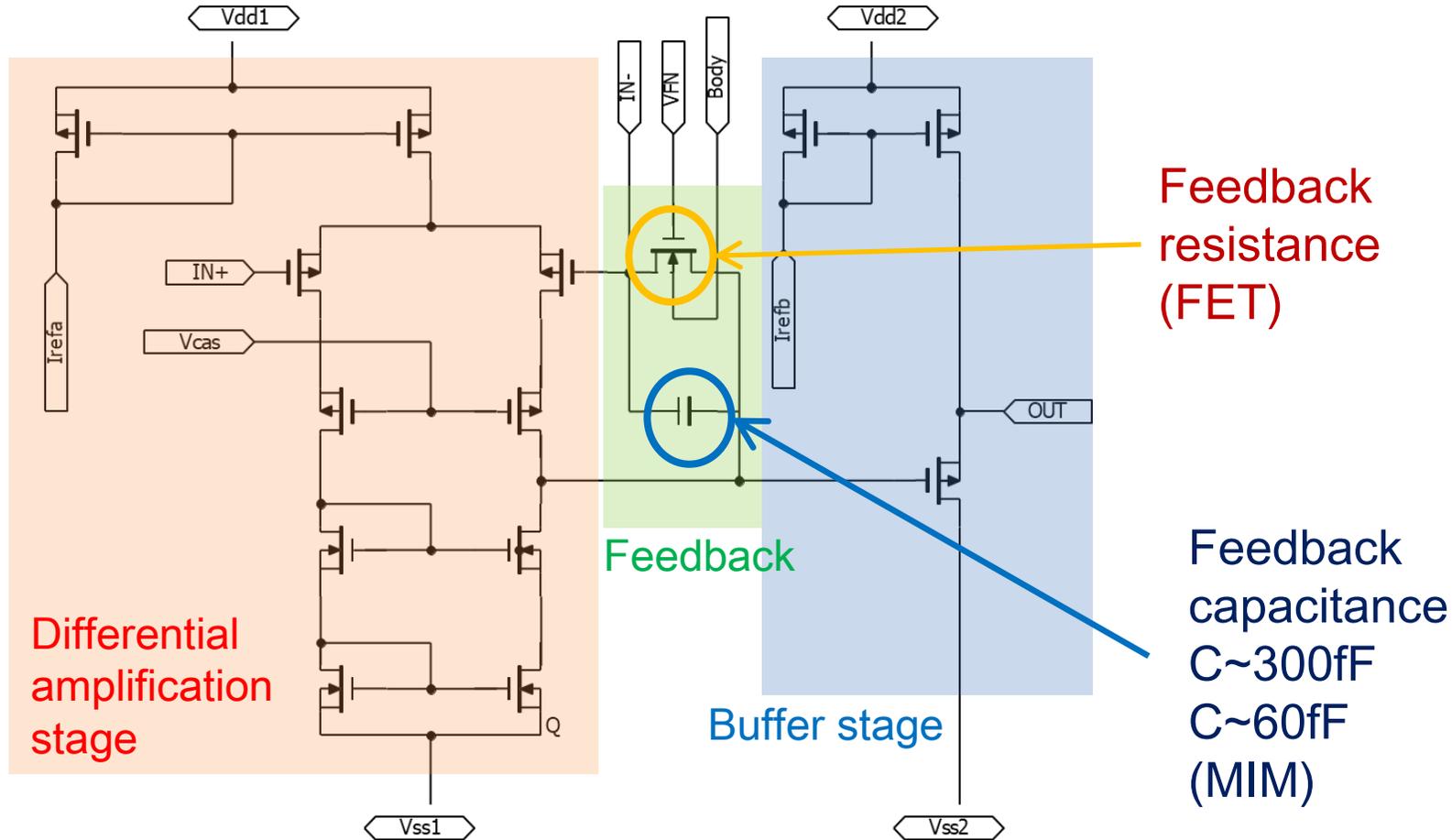


Amplification of STJ signal by cryogenic SOI amplifier situated close to STJ at $T = 350\text{mK}$ is demonstrated.

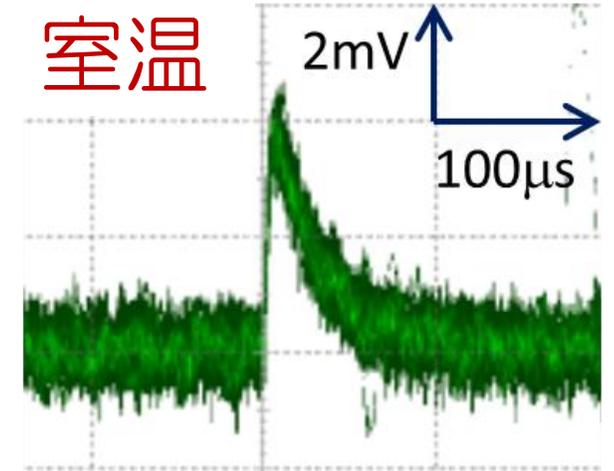
SOI 電荷積分型アンプの試作

差動増幅回路にキャパシタンスと抵抗(FET)による負帰還回路を加えて電荷積分型アンプを構成

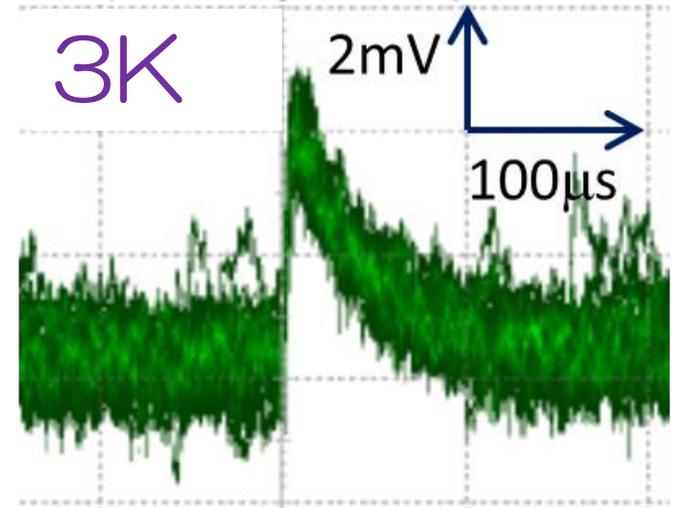
テスト入力電荷 0.49fC



室温



3K



室温と3Kでほぼ同じ動作が確認された

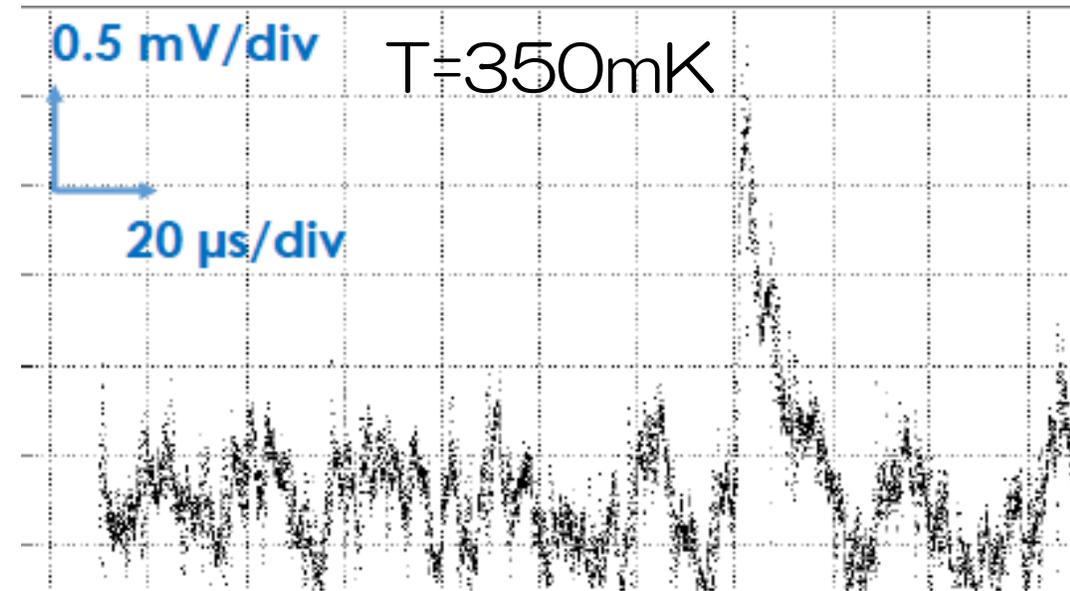
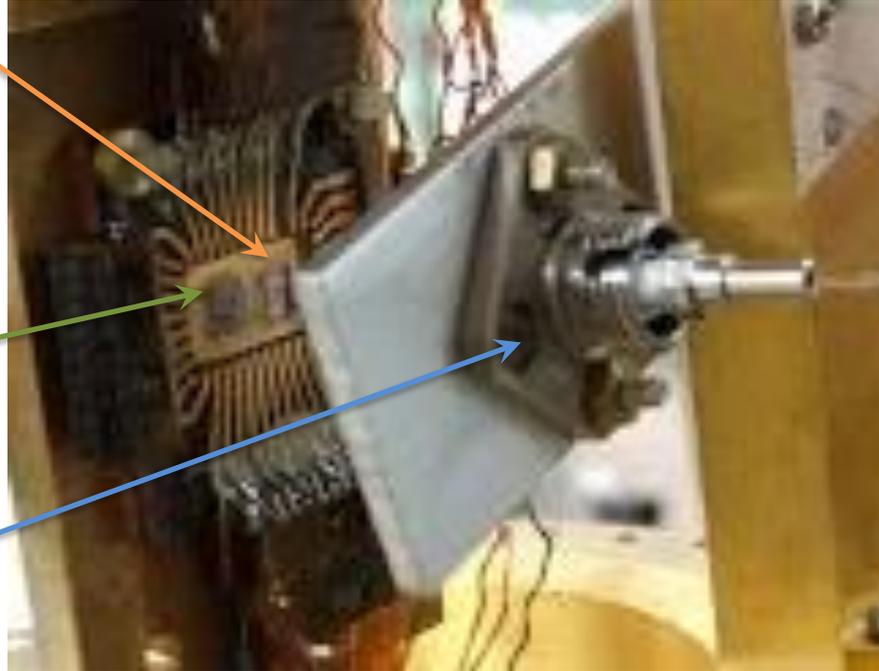
電荷積分型増幅器によるSTJ光応答信号の増幅

STJチップ

産総研CRAVITY製

SOIチップ

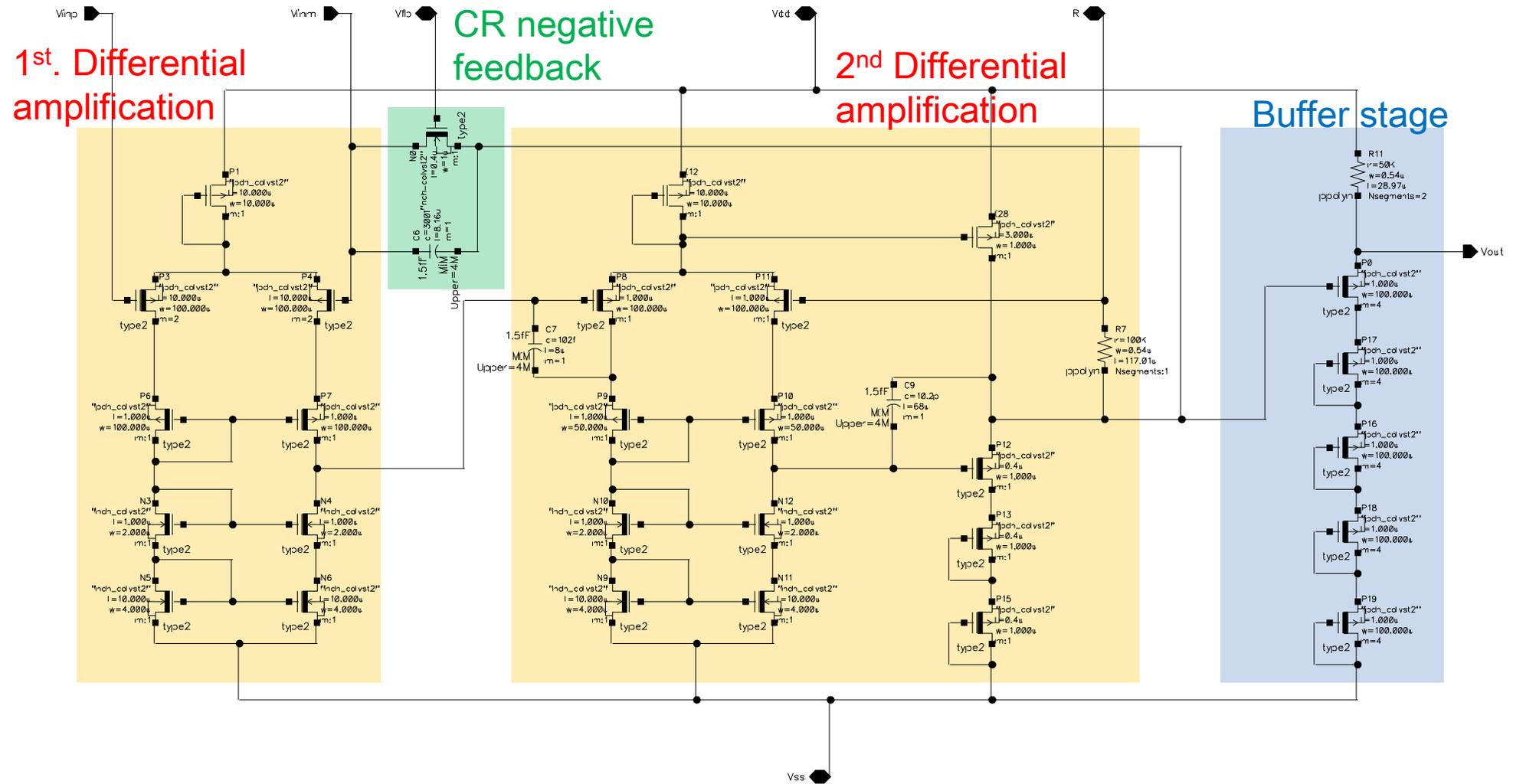
光ファイバ



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、STJの応答速度を数 μs として設定した $10\mu\text{s}$ の積分時間に対し、開ループゲインの周波数帯域が十分ではなかったため、STJからの電荷が十分に収集できていなかった。
- 周波数帯域を更に高周波まで確保する必要がある。

周波数帯域を改善した電荷積分型増幅器の設計

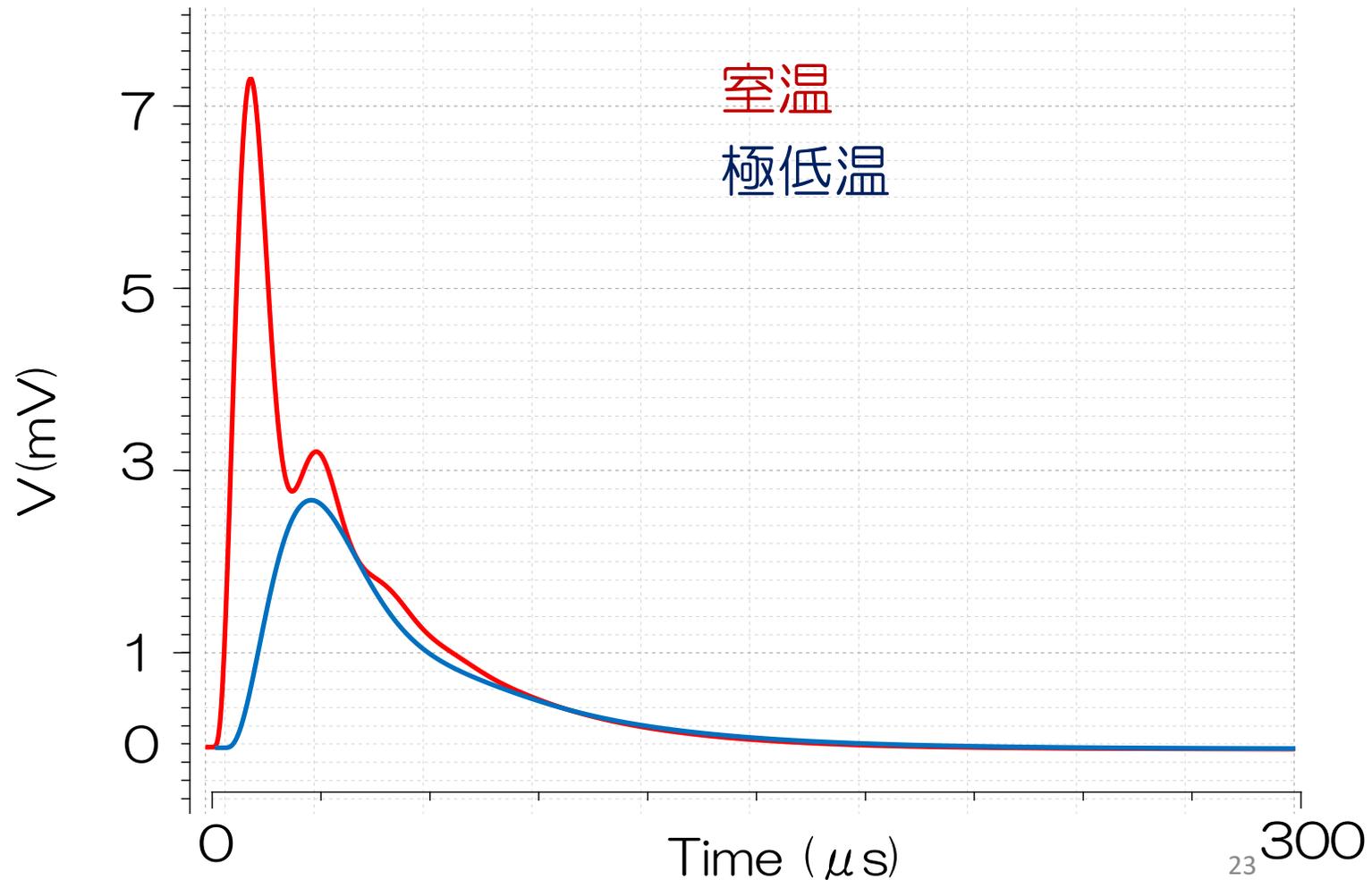


op-amp のカスケード接続による帯域幅の増強

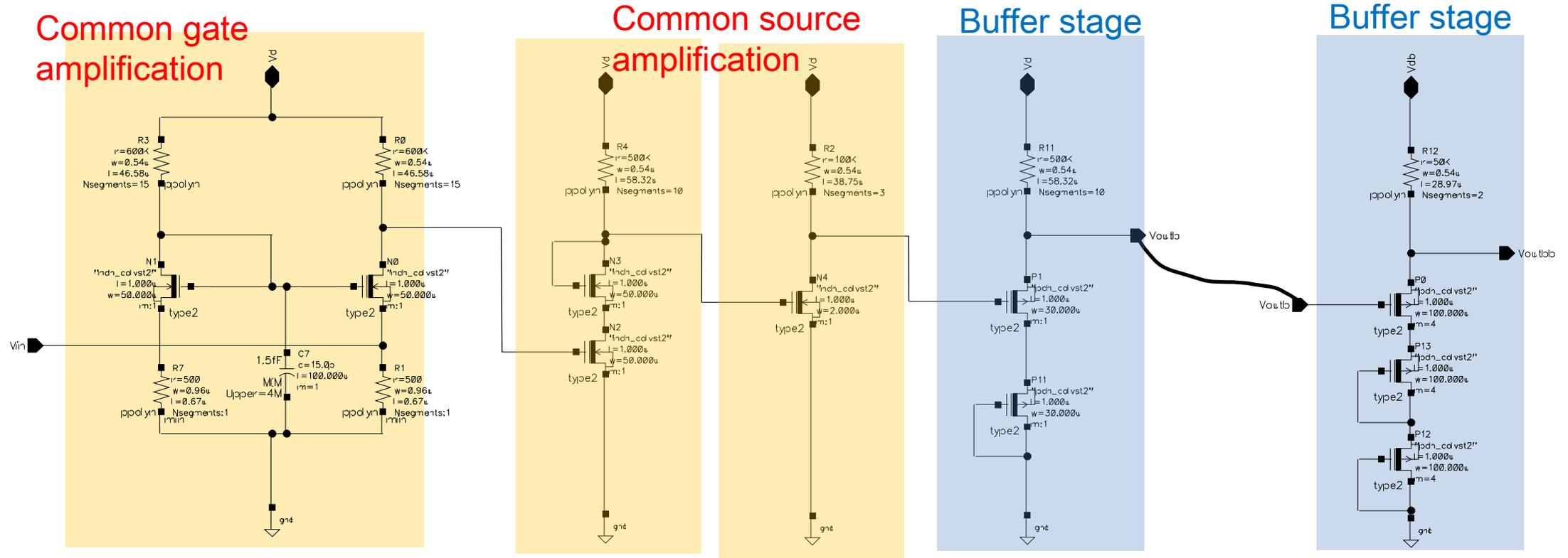
周波数帯域を改善した電荷積分型増幅器のシミュレーション

H-Spice シミュレーション結果

- 極低温では, V_{th} の0.2V増加, 飽和電流1.5倍, ポリシリコン抵抗8%増を仮定
- STJからの入力電荷 $1\text{nA} \times 2\ \mu\text{s} = 2\text{fC}$ ($\sim 1.3\text{eV}$ の単一光子入力を仮定)
- 入力負荷 $100\text{k}\Omega$, 1nF
- 出力負荷容量 $1\text{M}\Omega$, 0.5nF



低入力抵抗電流検出増幅器の設計

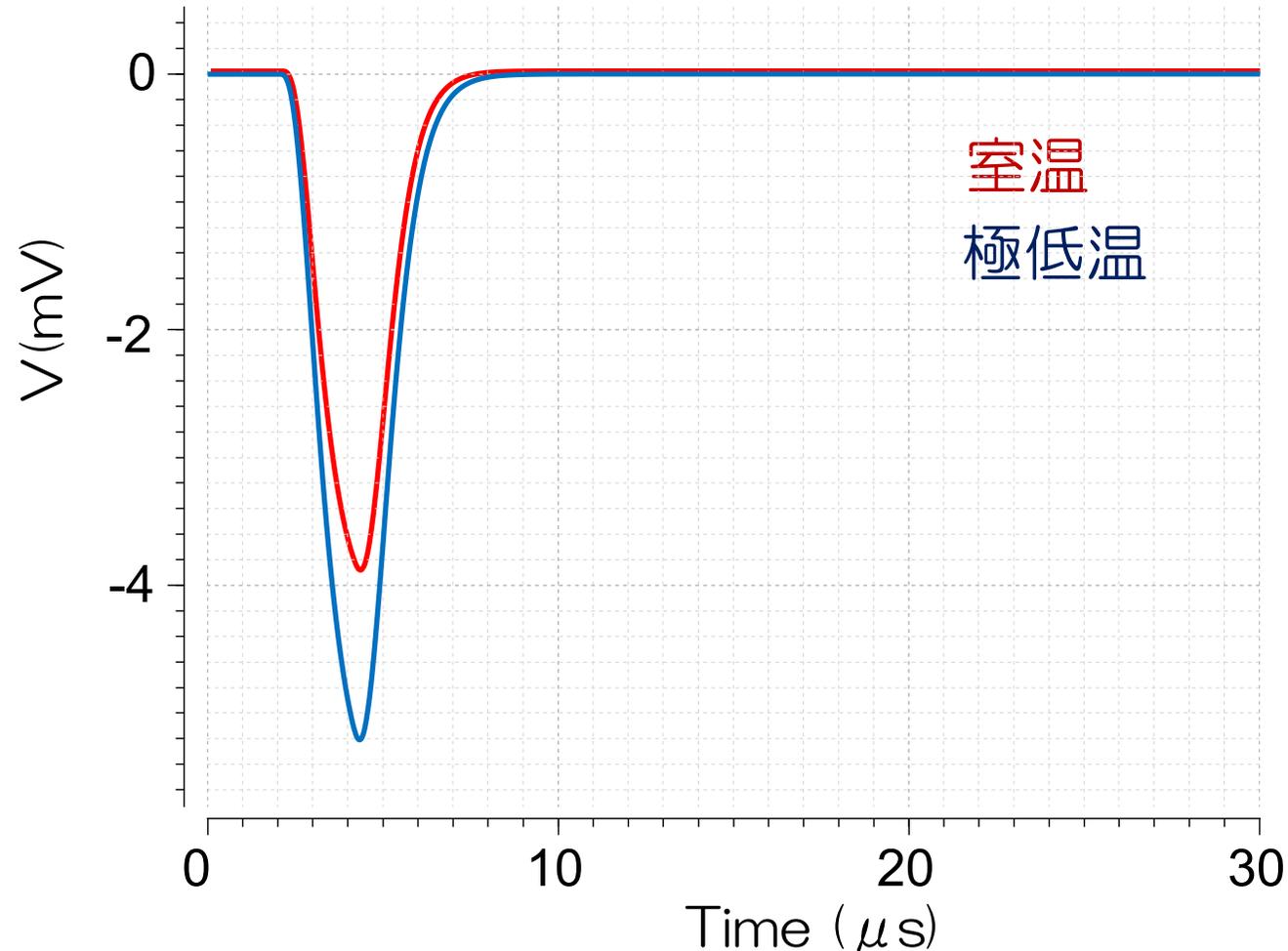


500Ωのシャント抵抗でSTJからの信号電流を受けて、3段の電圧増幅出力

低入力抵抗電流検出増幅器のシミュレーション

H-Spice シミュレーション結果

- 極低温では, V_{th} の0.2V増加, 飽和電流1.5倍, ポリシリコン抵抗8%増を仮定
- STJからの入力電荷 $1\text{nA} \times 2\mu\text{s} = 2\text{fC}$ ($\sim 1.3\text{eV}$ の単一光子入力を仮定)
- 入力負荷 $100\text{k}\Omega$, 1nF
- 出力負荷容量 $1\text{M}\Omega$, 0.5nF



まとめ

- COBAND実験の光検出器となる 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を STJ 信号の極低温増幅器を実現する手段としての実証を進めている。
- STJ信号読出し用SOI極低温増幅回路は、実用段階に向けての設計段階へと向けて大きく前進した。