



極低温SOIアンプ SOI-STJ4による STJ光 パルス応答読出し試験

武内勇司 (筑波大)

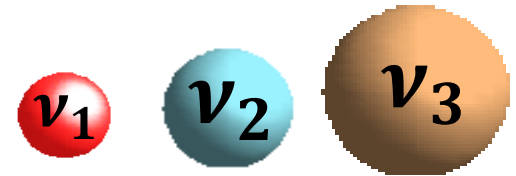
for the COBAND collaboration

Mar. 31, 2017

LAPIS meeting

COBAND (COsmic BAckground Neutrino DDecay)実験

□ ニュートリノ崩壊



□ 重さの違う3種類のニュートリノ

□ 重たいニュートリノは，軽いニュートリノへ光子を伴って崩壊(実験的に未確認)



□ ν_3 の崩壊の場合，光子は $E \sim 25 \text{ meV}$ ($\lambda \sim 50 \mu\text{m}$)

□ 宇宙背景ニュートリノ

□ ビッグバン直後に生成され現在に至るまで残り続けているニュートリノ(実験的に未確認)

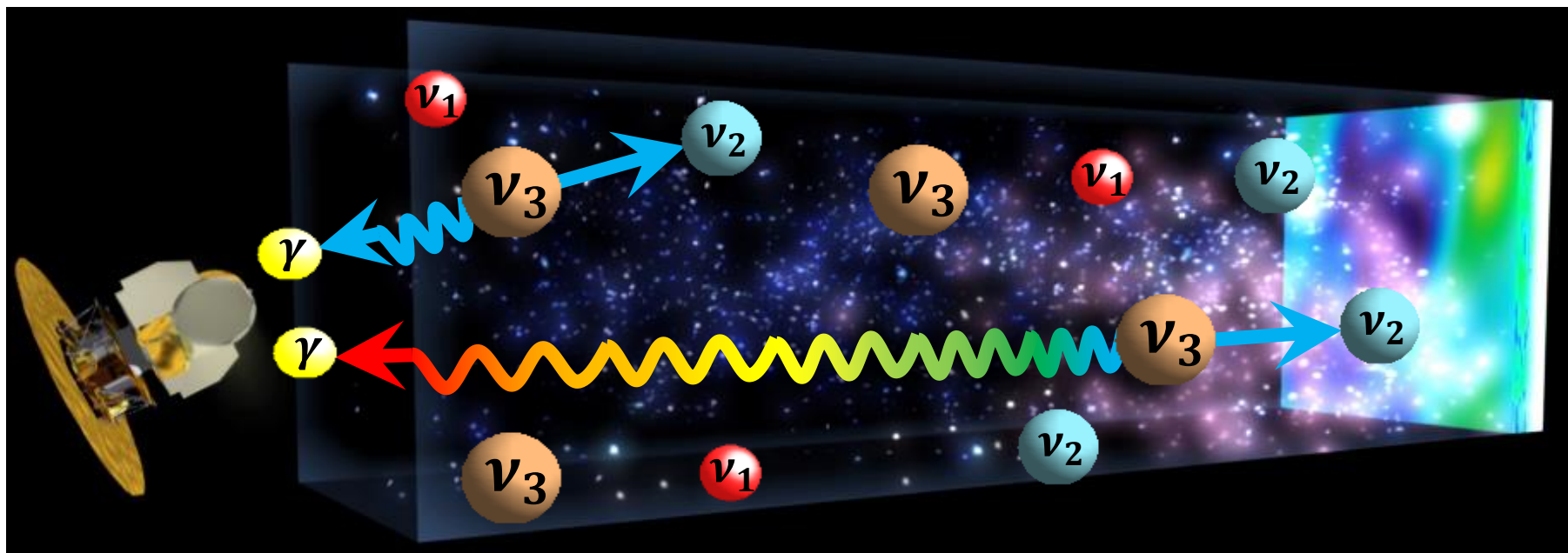
□ 宇宙全体に $110/\text{cm}^3$ の密度で存在

COBANDロケット実験

宇宙背景ニュートリノのニュートリノ崩壊の探索

波長約 $50\mu\text{m}$ (遠赤外線) の光として観測

- 観測ロケットを打ち上げ高度200~300kmで500秒の測定
- ニュートリノ崩壊の寿命が 10^{14} 年以下なら崩壊光子を観測可能な感度を目指す



COBAND実験において光検出器に要求される性能

1ピクセルあたり

- $100\mu\text{m} \times 100\mu\text{m}$ の有感領域
- $\lambda=40\mu\text{m} \sim 80\mu\text{m}$ の光子1個ずつを高い効率で検出
- Dark count レートは期待される(ほぼ黄道光からの)実光子レート約300Hz に対して無視できる程度であることが必要

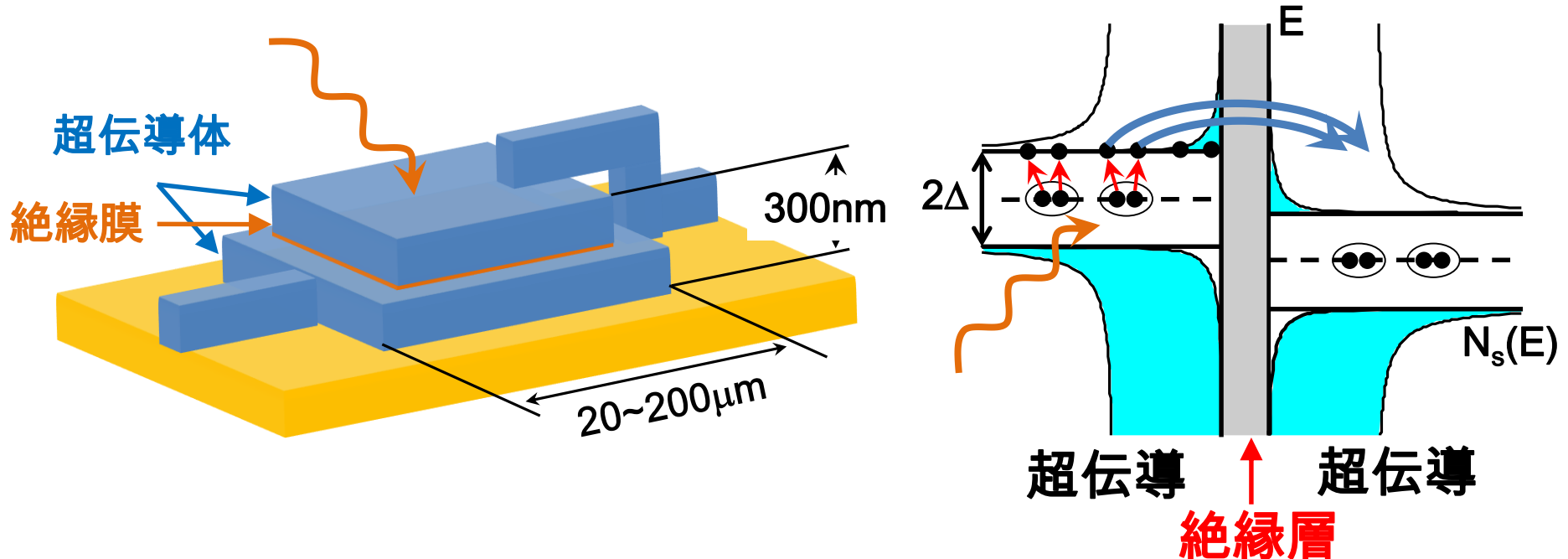
$$- \text{NEP} = \epsilon_{\gamma} \sqrt{2f_{\gamma}}$$

→ $\text{NEP} \sim 1 \times 10^{-19} \text{ W} / \sqrt{\text{Hz}}$ per 1pix に相当

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)



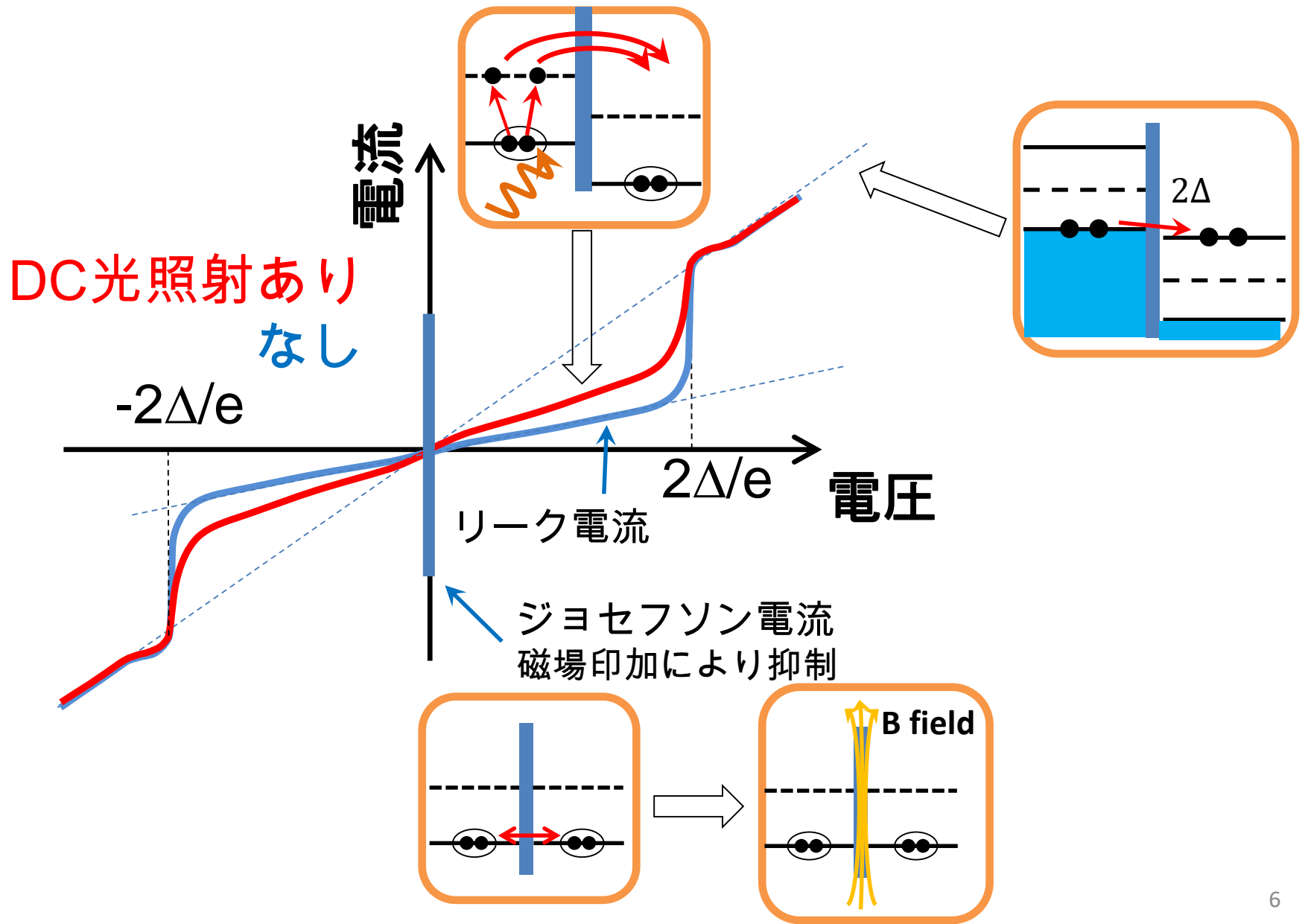
接合面を挟んで電位差($|V| < 2\Delta$)を印加

超伝導体に吸収された光子のエネルギーにより複数のクーパー対が解離(励起)し、生成された準粒子によって、エネルギーに比例したトンネル電流が発生。

Δ : 超伝導ギャップエネルギー

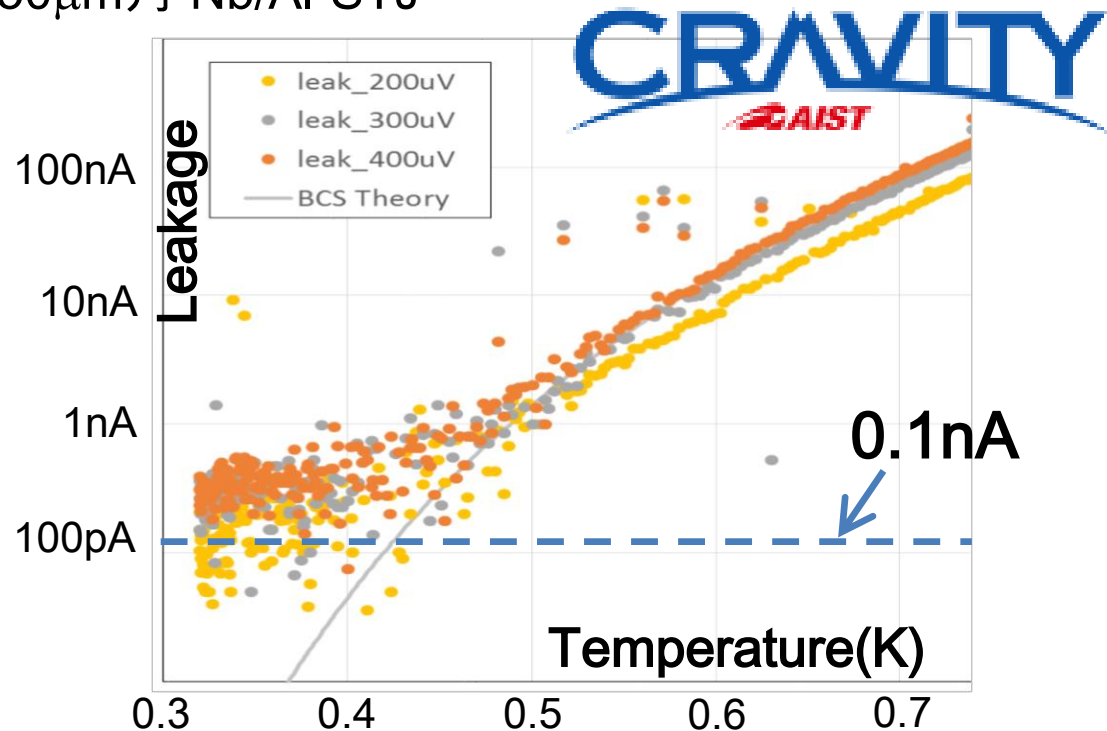
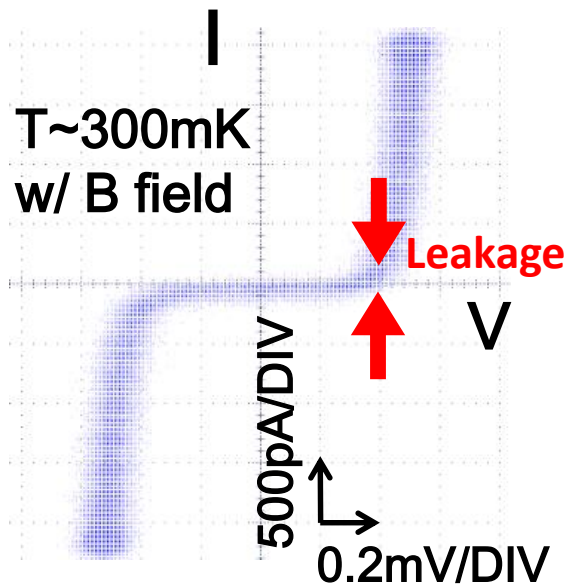
- 超伝導ギャップ(Δ)は遠赤外フォトンのエネルギーよりもずっと小さい($\Delta < 1\text{meV}$)
→ 原理的には、遠赤外域一光子を検出可能
- $1\mu\text{s}$ 程度の比較的高速なパルス応答(Nbの場合)
→ 光子計数することでS/Nの著しい向上が期待

STJ I-V 特性



CRVAVITY製Nb/Al-STJ

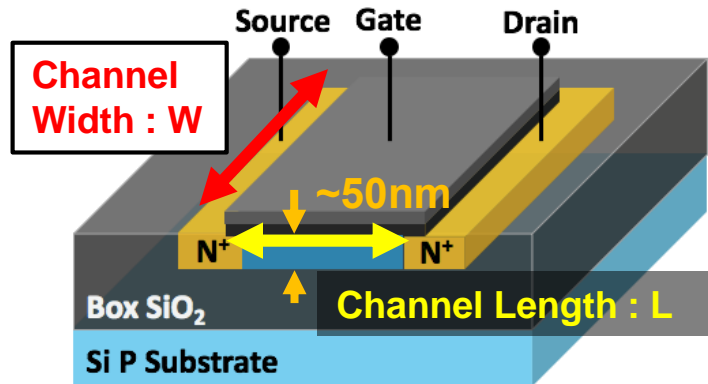
産総研CRAVITY で作製された50 μ m角 Nb/Al-STJ



- 50 μ m 角でリーク200pA@0.4V , 20 μ m 角ならリーク50pA@0.4V を達成
- $\Delta=0.6$ 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 , $N_{q.p.}=25\text{meV}/1.7\Delta\times 10\sim 250$
- 50pA のリーク電流をSTJ信号幅($\sim 1\mu$ s)で積分 : $50\text{pA}\times 1\mu\text{s}\sim 310e$
- 素子そのものは , 25meVの一光子検出の要件を満たす性能

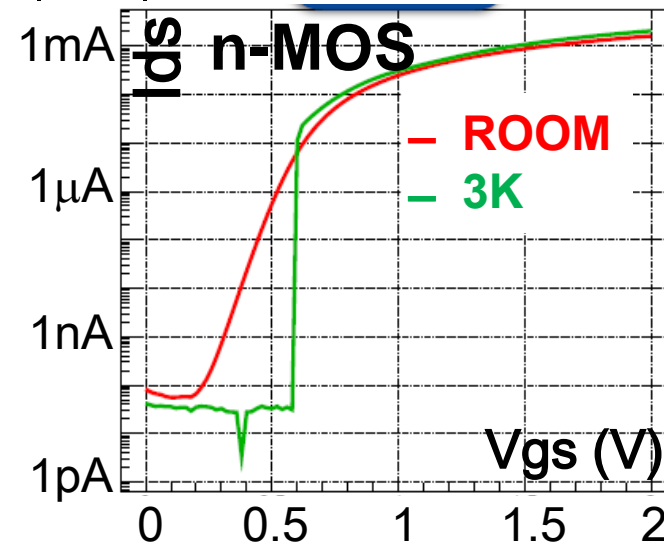
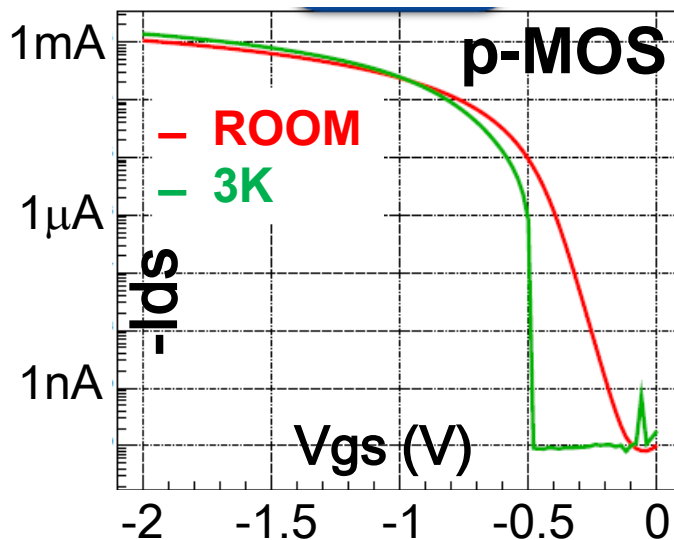
FD-SOI-MOSFET によるSTJ信号読み出し回路

FD-SOI : **F**ully **D**epleted – **S**ilicon **O**n **I**nsulator



- SiO₂絶縁膜上にMOSFETを形成
- チャネル層が非常に薄い

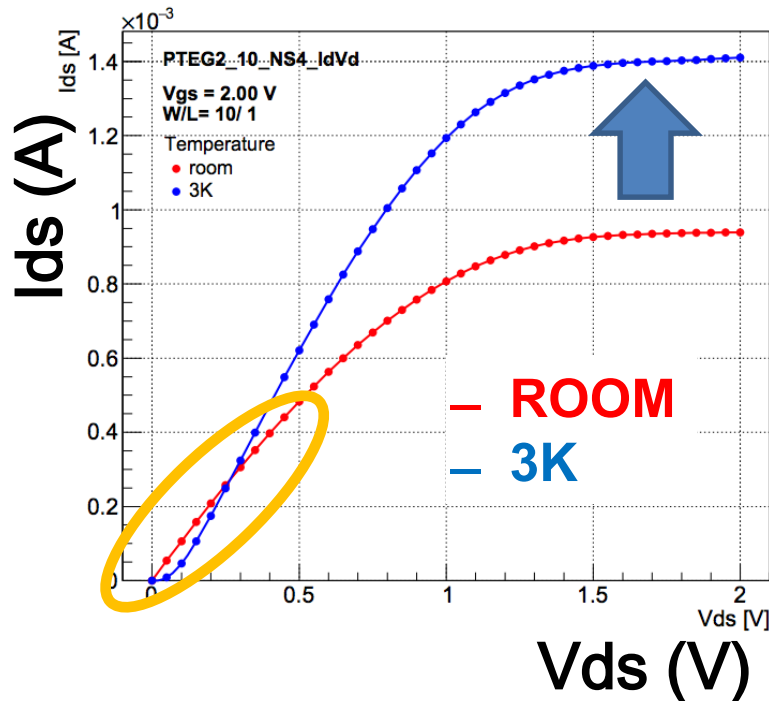
■ Id-V_g curve of W/L=10μm/0.4μm at |V_{ds}|=1.8V



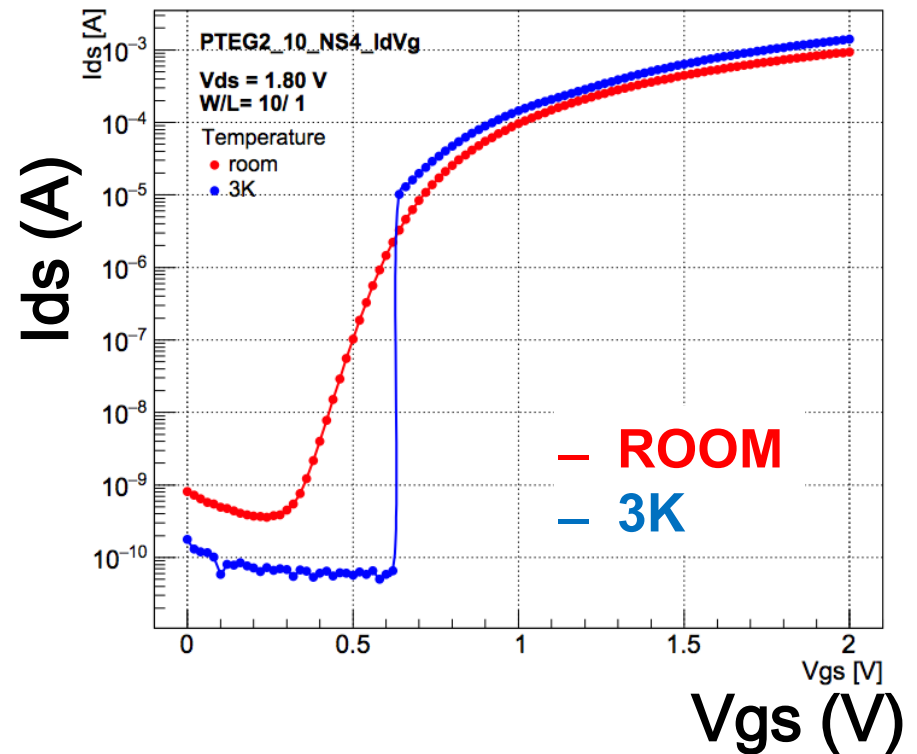
極低温($T < 3K$)でもp-MOS, n-MOS共にトランジスタとして動作

極低温でのFET特性変化

- n-ch ST2 W/L=10 μ m/1.0 μ m



- キャリア移動度上昇による飽和電流の増加
 - V_{ds} の低い領域で電流の立ち上がりが鈍る
- 回路モデル化が不可能

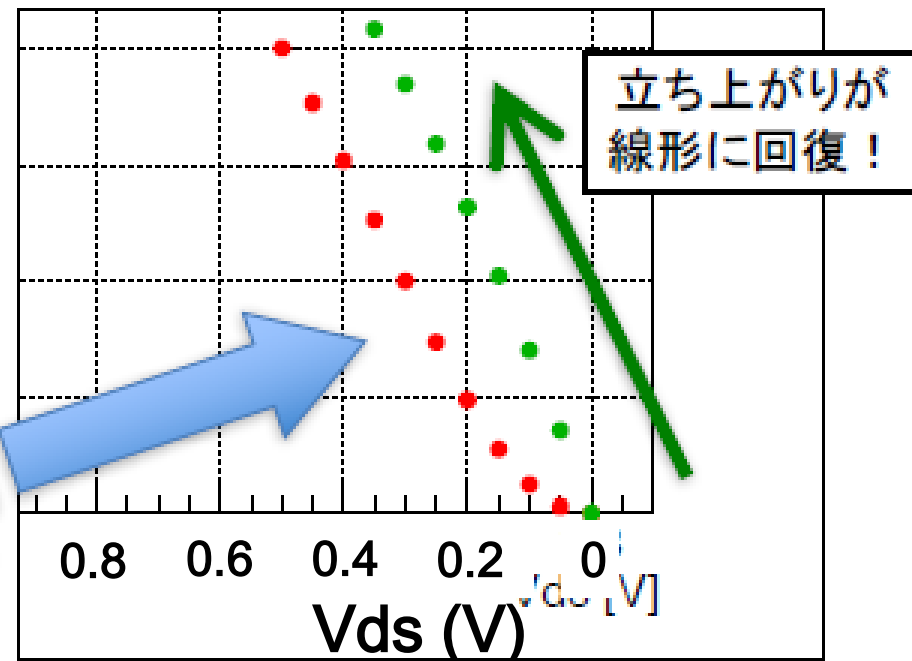
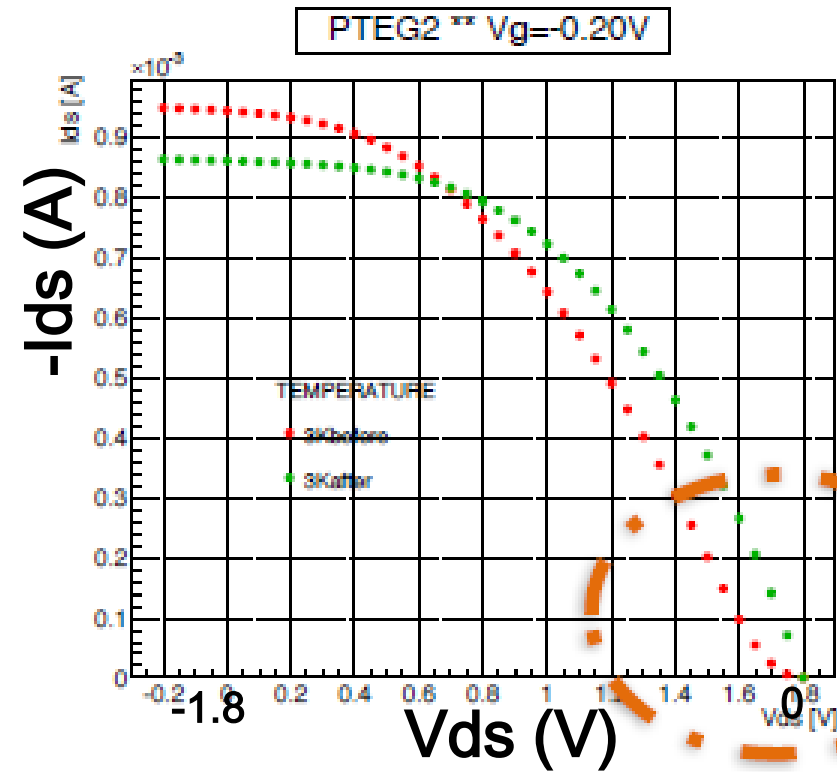


- 閾値電圧の移動
 - サブスレッショルド電流の抑制
- 超低消費電力化が可能か？

LDD濃度変更後

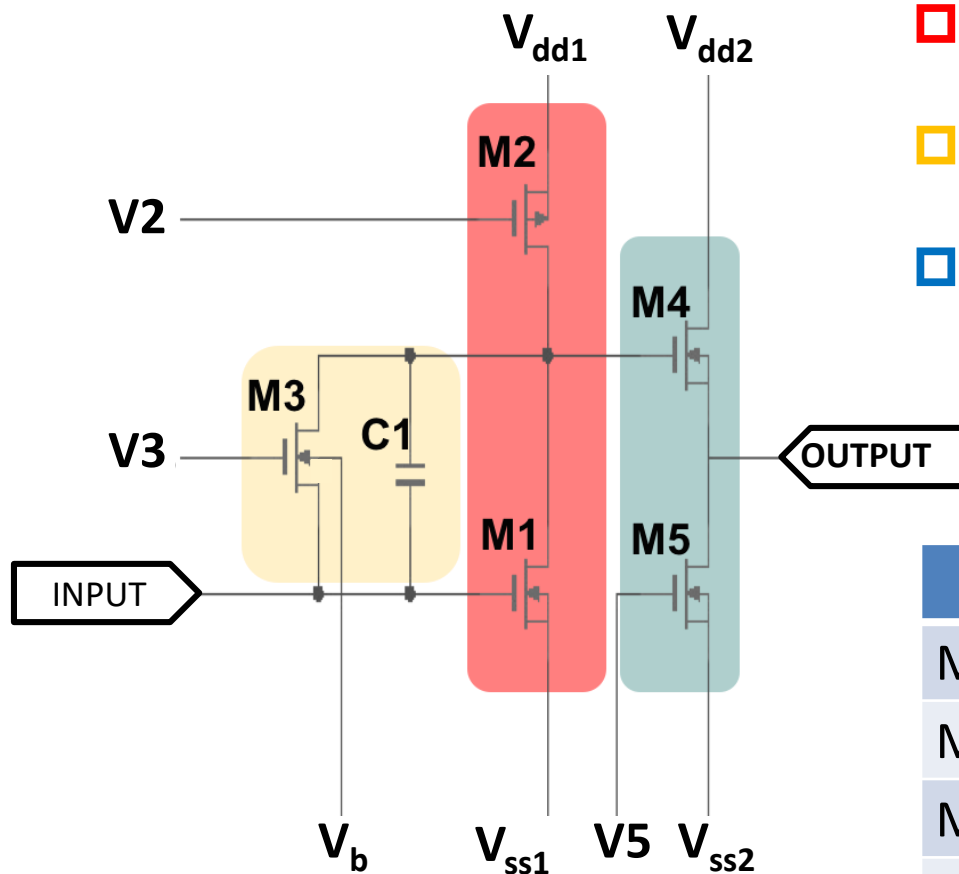
- LDD(Lightly doped drain)不純物濃度を増加することで、極低温においても I_d - V_d の立ち上がりが線形に回復
- p-ch ST2 W/L=10 μ m/1.0 μ m

- LDD不純物濃度が現行(@3K)
- LDD不純物濃度が改良(@3K)



今季SOI MPWランの LDD濃度対策済み TrTEG でI-V測定．
回路シミュレーション用のパラメータ抽出？

SOI prototype amplifier (SOI-STJ4)



□ ソース接地増幅

- 電流源としてp-MOS使用

□ フィードバック

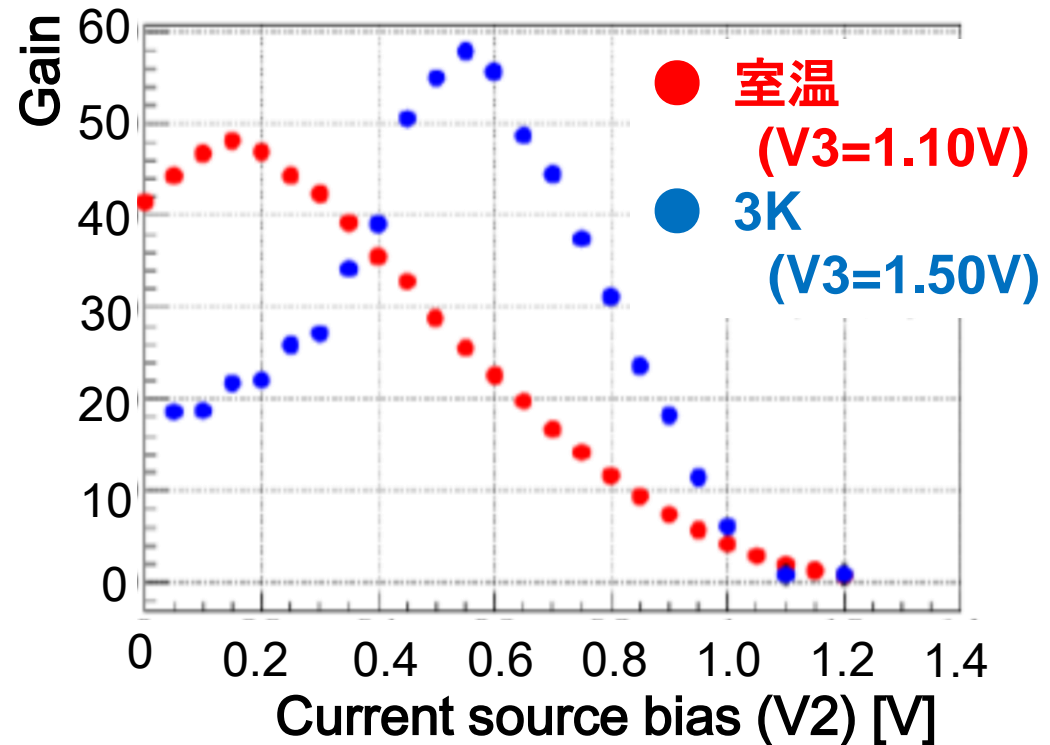
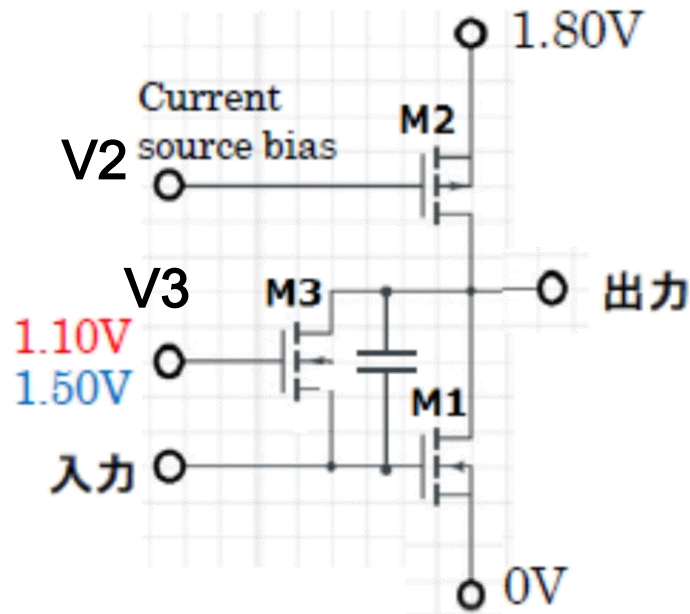
- 自己バイアス電圧印加

□ ソースフォロア

- 出力インピーダンス低減

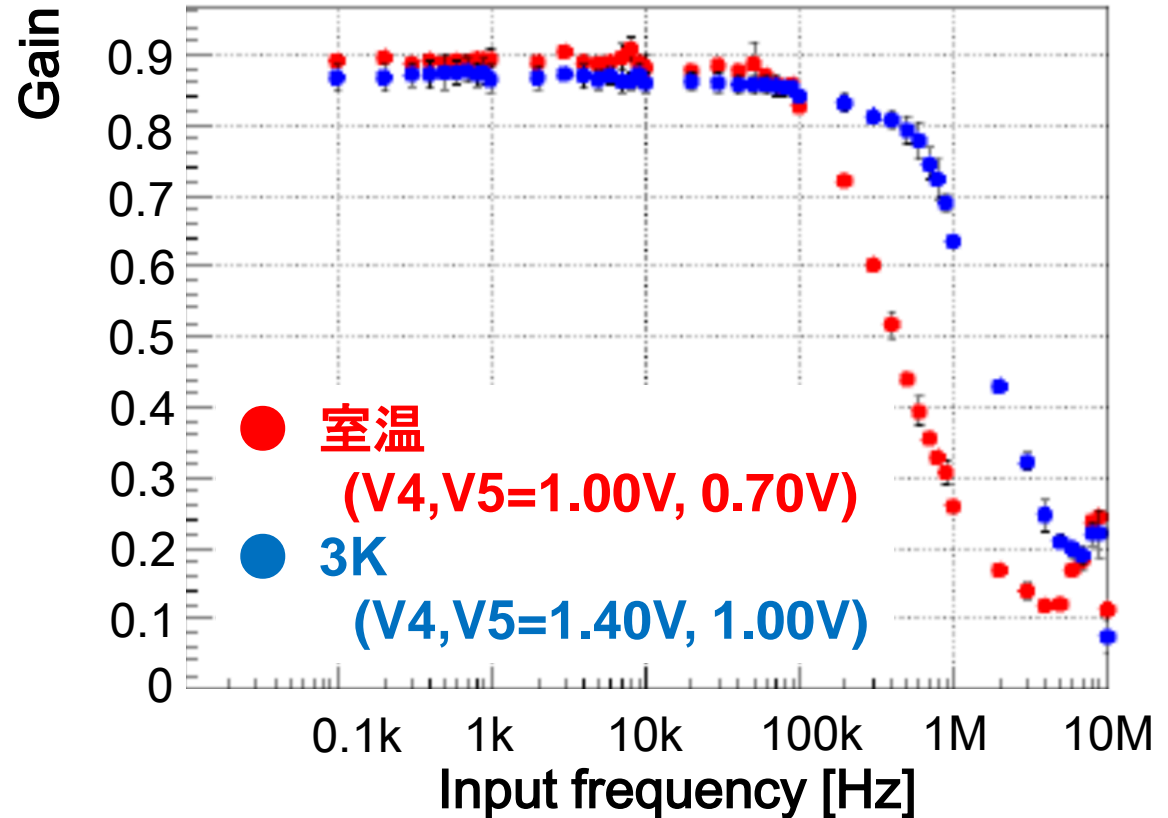
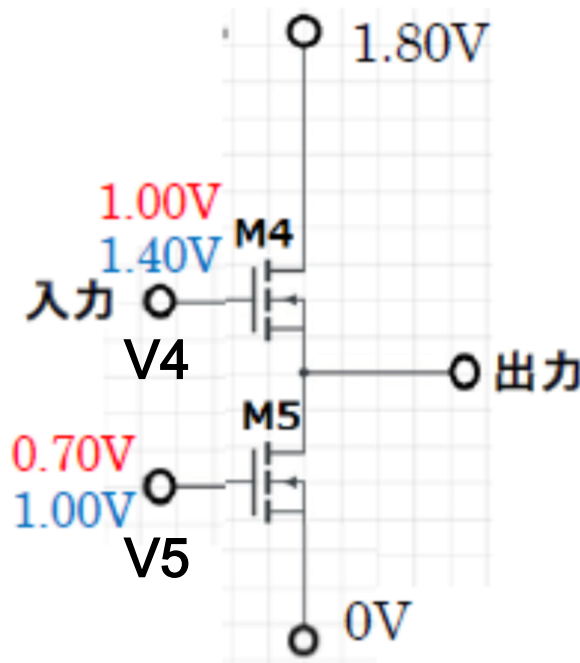
	Type	W [μm]	L [μm]
M1	Nch-source tie	40	1
M2	Pch-source tie	1	10
M3	Nch-body tie	1.6	10
M4	Nch-source tie	70	1
M5	Nch-source tie	60	1
C1	MIM cap.	100 fF	

増幅段ゲイン



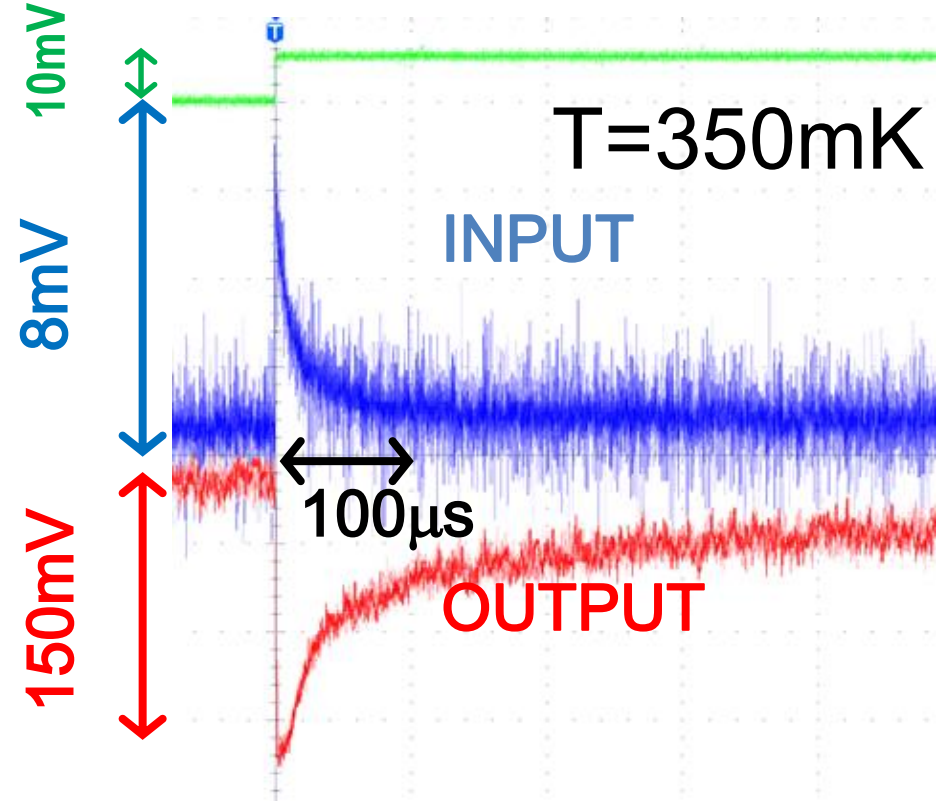
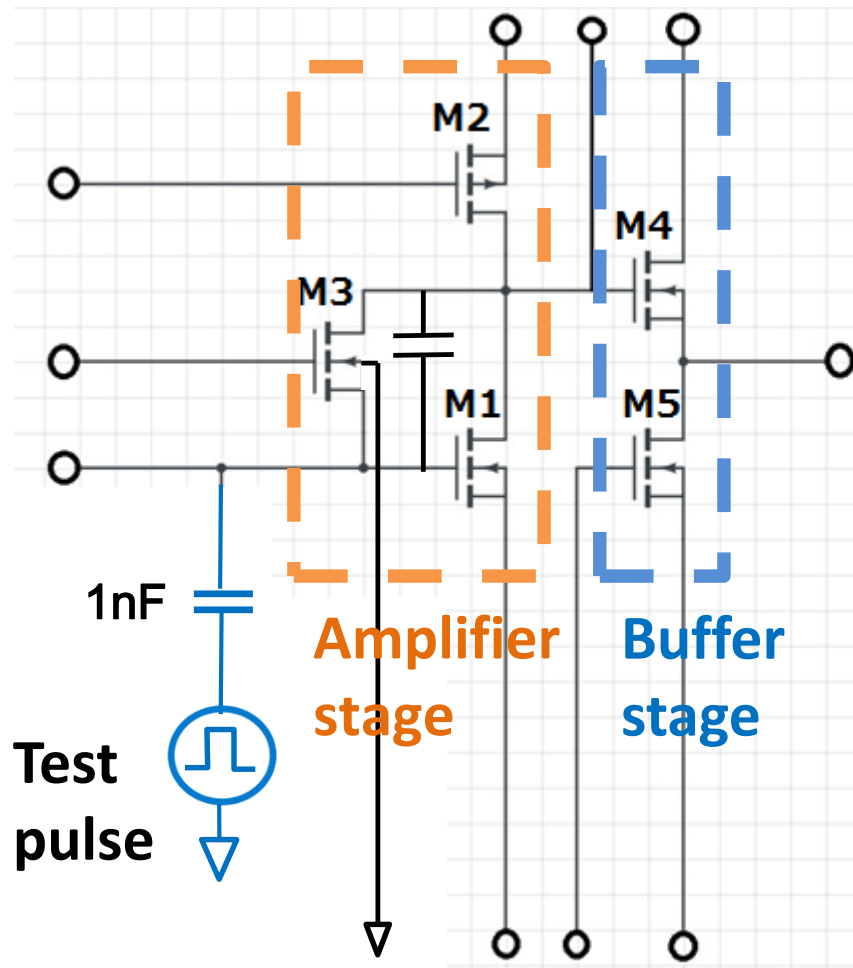
- 極低温時においてもバイアス電圧を調整することによってしきい値の変動を補償して、室温時と同じ増幅率を達成

バッファ一段出力周波数依存性



- 極低温時においてもバッファ一段に流す電流を増やすことによって冷凍機配線~0.5nFの容量負荷に対して0.5MHz程度までの出力周波数帯域を確保

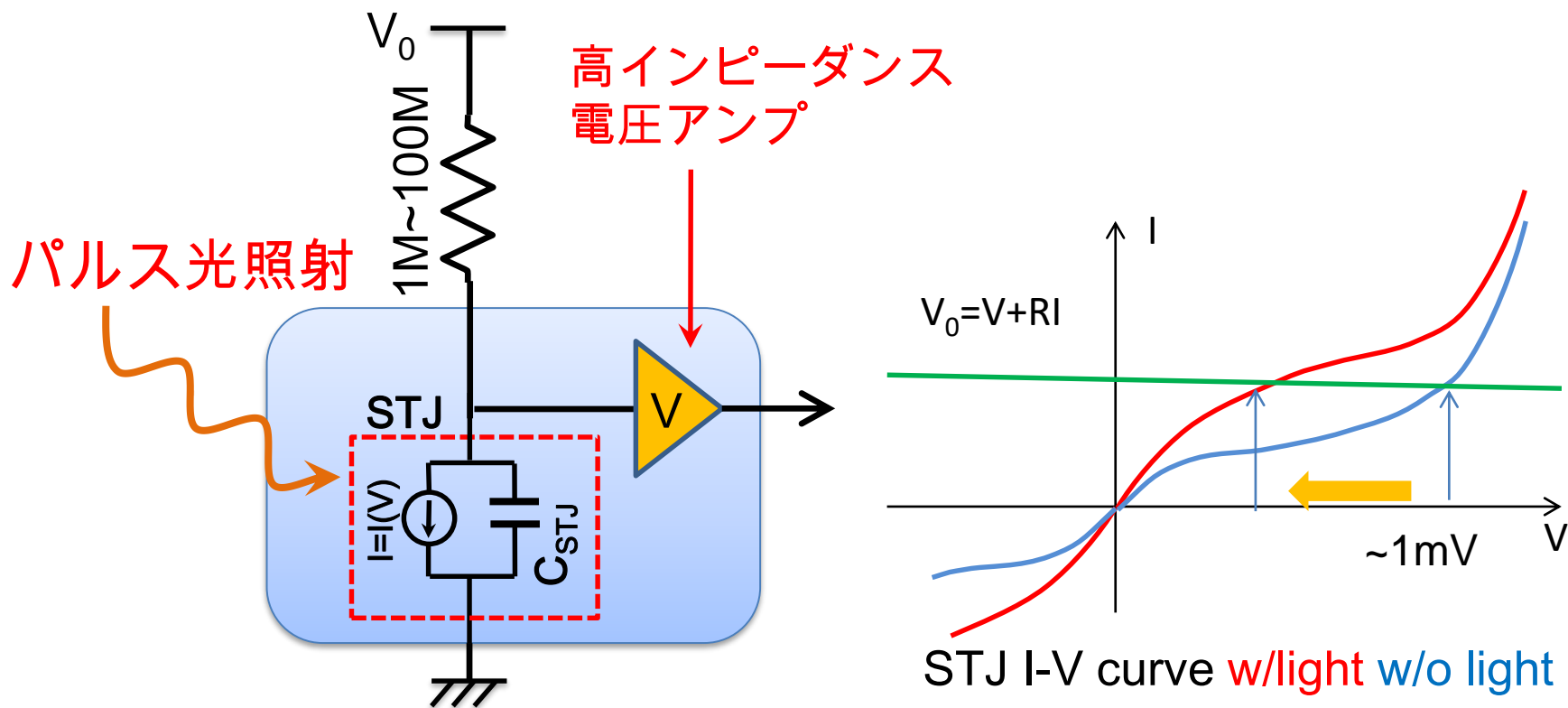
SOI-STJ4パルス応答試験



- T=350mK にてC=1nFのキャパシタンスを用い，テスト入力
- 電力消費量：~100μW

入力信号時定数: 20~30μs → アンプ入力インピーダンス: 20~30kΩ

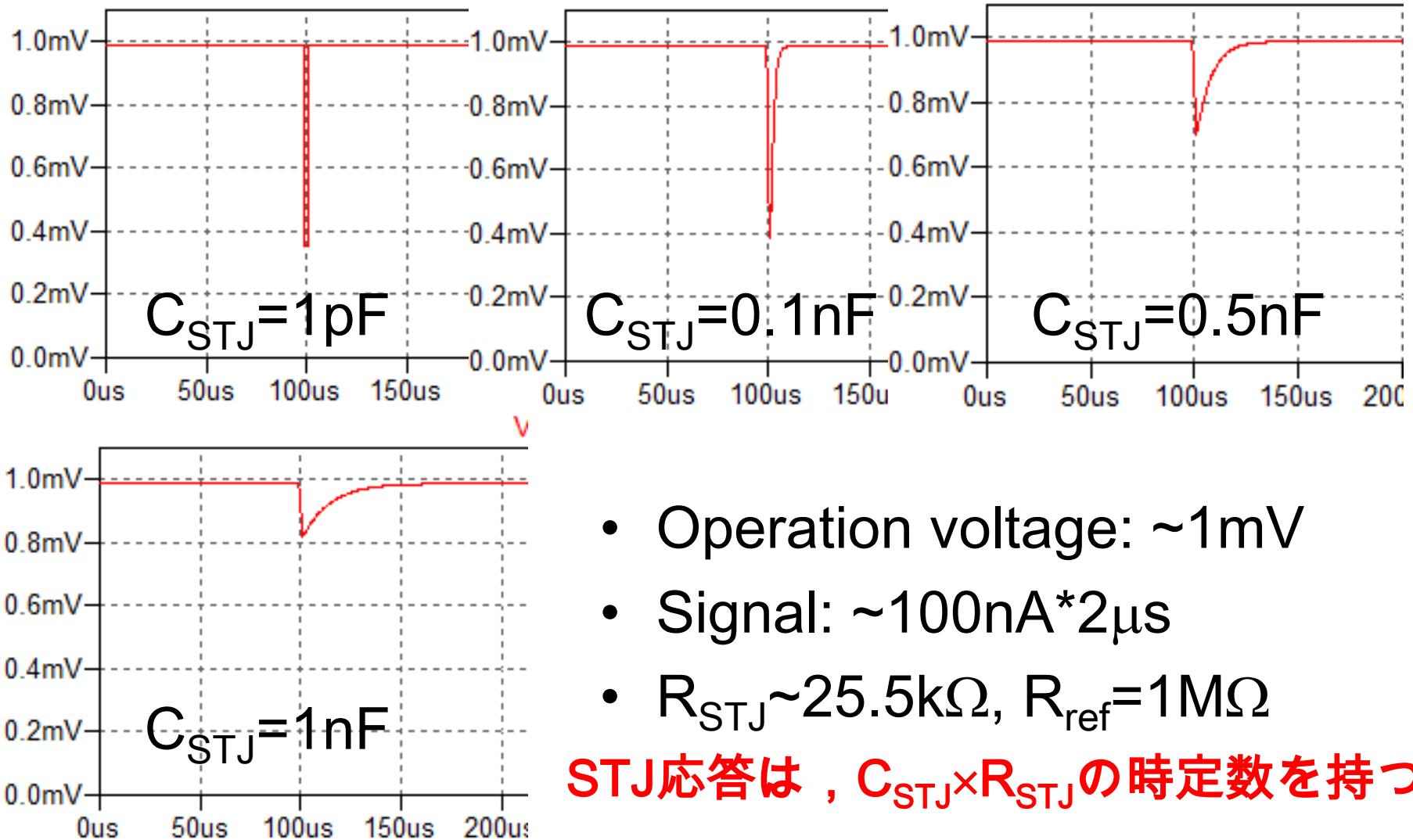
STJ 光パルス信号読み出し(定電流モード)



- 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
- 光応答信号は, STJの電圧降下として見える

STJのキャパシタンスが問題

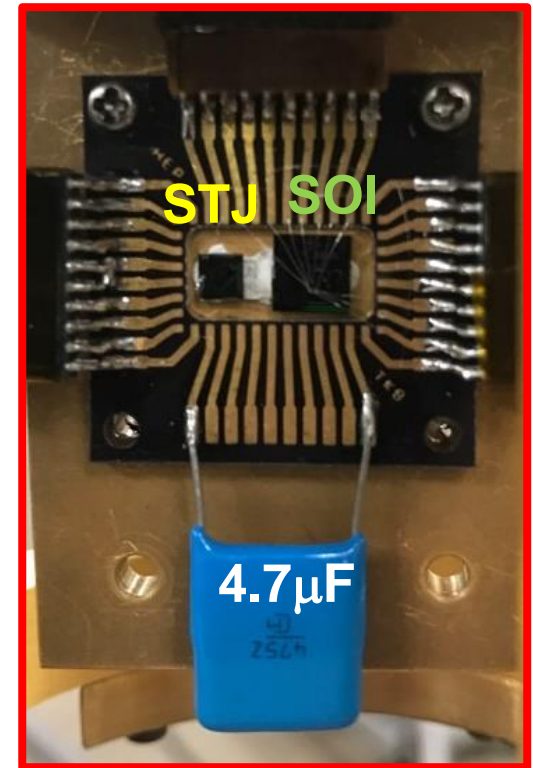
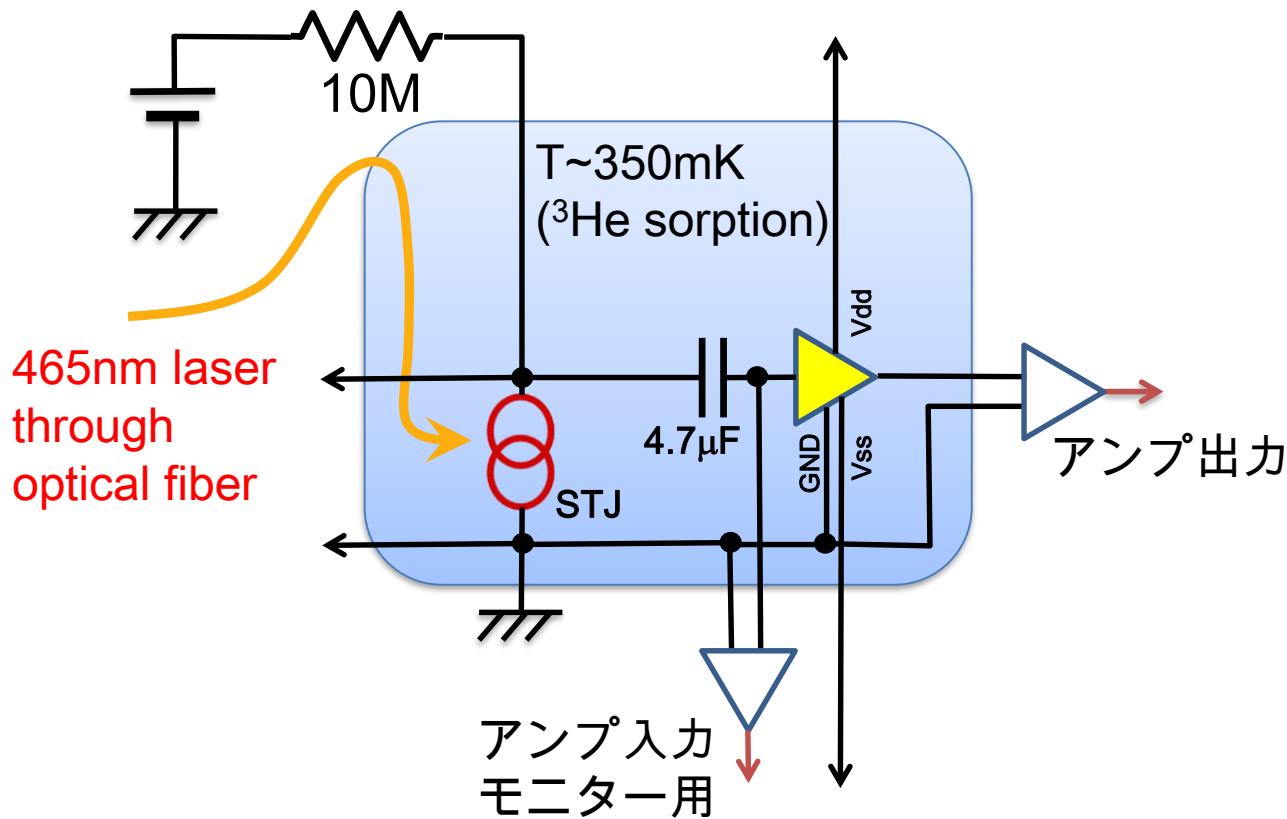
STJ定電流モード読出しのシミュレーション



- Operation voltage: $\sim 1\text{mV}$
- Signal: $\sim 100\text{nA} \times 2\mu\text{s}$
- $R_{STJ} \sim 25.5\text{k}\Omega$, $R_{ref} = 1\text{M}\Omega$

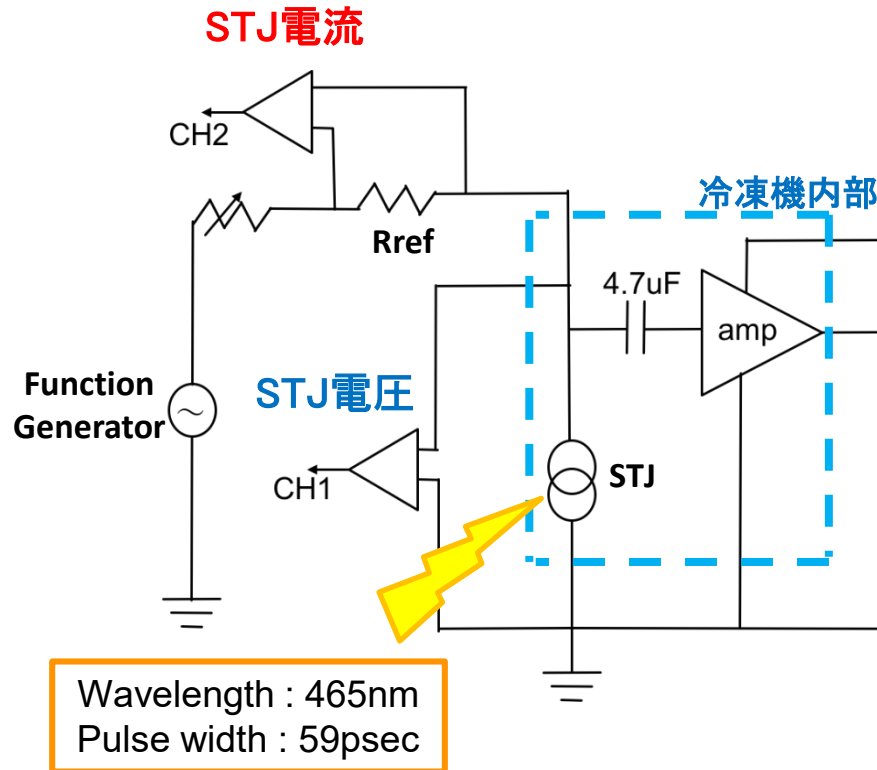
STJ応答は, $C_{STJ} \times R_{STJ}$ の時定数を持つ

STJのパルス光応答のSOI-STJ4回路経由読み出し

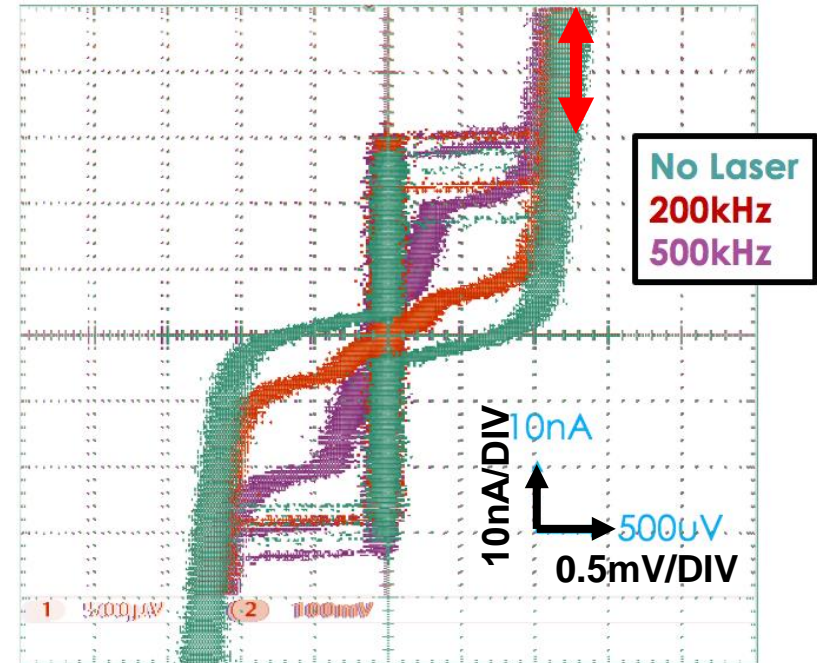


- 20 μm 角 Nb/Al-STJのchipとSOI-STJ4アンプのchip(同じ極低温ステージ上)をセラミックコンデンサーを介して接続
- アンプ入力のインピーダンスは, 数十k Ω 程度
 - STJ信号読出しはほぼ定電流モード読出しに近い
 - STJのバイアス線の浮遊容量1nF程度: 1 μs の信号に対して160 Ω

Nb/Al-STJ I-V特性の光応答

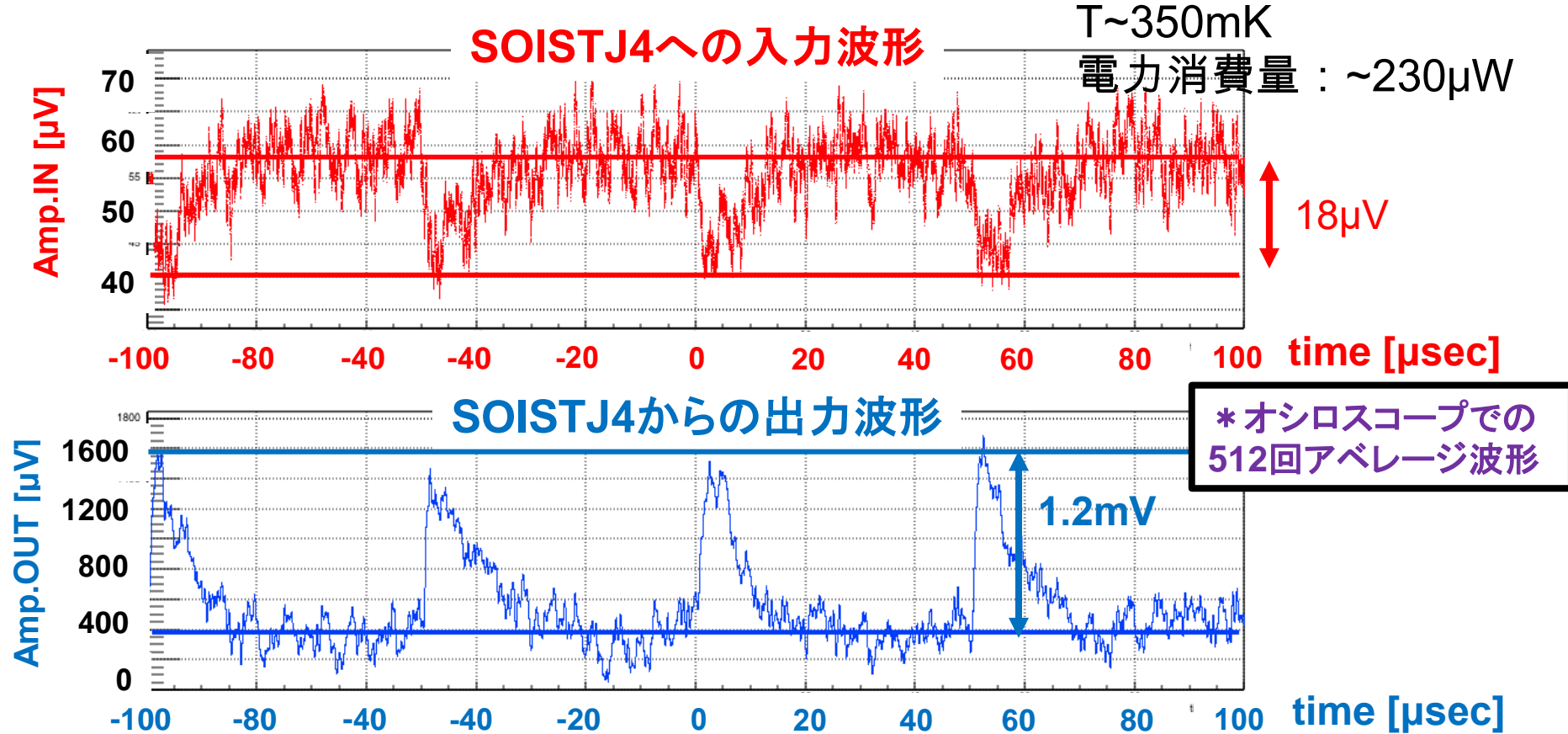


B=75.5 Gauss



超伝導ソレノイドの不調のため，JCが完全には消し切れていない．
STJの定電流モード読出の動作電流として， $I_{STJ}=40\text{nA}$ に設定．

STJ光パルス応答のSOI-STJ4への入力と出力



- 20kHzの波長465nmレーザーパルス照射に対する20μ角Nb/Al-STJの応答をSOI-STJ4増幅回路へ入力
- SOI回路での信号増幅(~60倍の波高増幅)を観測

まとめ

- COBAND(宇宙背景ニュートリノ崩壊探索)ロケット実験のための遠赤外光検出器($\lambda=50\mu\text{m}$)を開発中
- SOIに技術を用いた極低温アンプによる超伝導体接合素子光パルス信号読出し回路を開発中
 - SOIアンプの極低温(300mK)での動作を確認 .
 - 実際のSTJの光パルス信号を同一極低温ステージ上でSOIアンプにより増幅して読み出すことに成功(SOI-STJ4) .
 - ノイズ評価に向けた測定➡これから

本講演のSOIアンプの設計は , VDECのサポートを受けて行われています .

* VLSI Design and Education Center(VDEC), the U. Tokyo in collaboration with Synopsys, Inc., Cadence Design Systems, Inc., and Mentor Graphics, Inc.

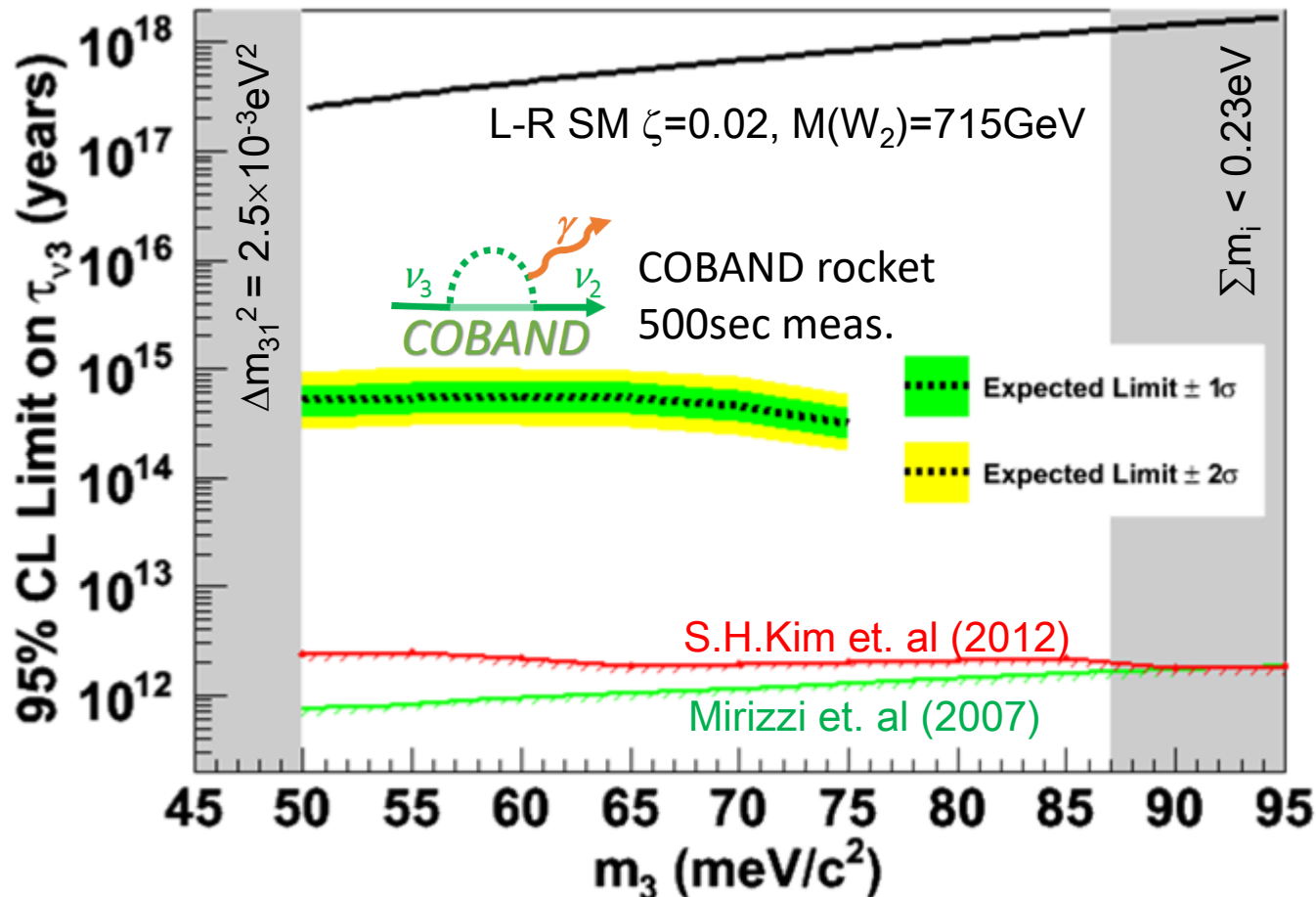
Backup

COBAND Collaboration Members (As of Mar. 2017)

Shin-Hong Kim, Yuji Takeuchi, Kenichi Takemasa, Kazuki Nagata, Kota Kasahara, Shunsuke Yagi, Rena Wakasa, Yoichi Otsuka (Univ. of Tsukuba), Hirokazu Ikeda, Takehiko Wada, Koichi Nagase (JAXA/ISAS), Shuji Matsuura (Kwansei gakuin Univ), Yasuo Arai, Ikuo Kurachi, Masashi Hazumi (KEK), Takuo Yoshida, Chisa Asano, Takahiro Nakamura, Makoto Sakai (Univ. of Fukui), Satoshi Mima, Kenji Kiuchi (RIKEN), H.Ishino, A.Kibayashi (Okayama Univ.), Yukihiro Kato (Kindai University), Go Fujii, Shigetomo Shiki, Masahiro Ukibe, Masataka Ohkubo (AIST), Shoji Kawahito (Shizuoka Univ.), Erik Ramberg, Paul Rubinov, Dmitri Sergatskov (Fermilab), Soo-Bong Kim (Seoul National University)

ニュートリノ寿命下限測定, および COBANDロケット実験感度

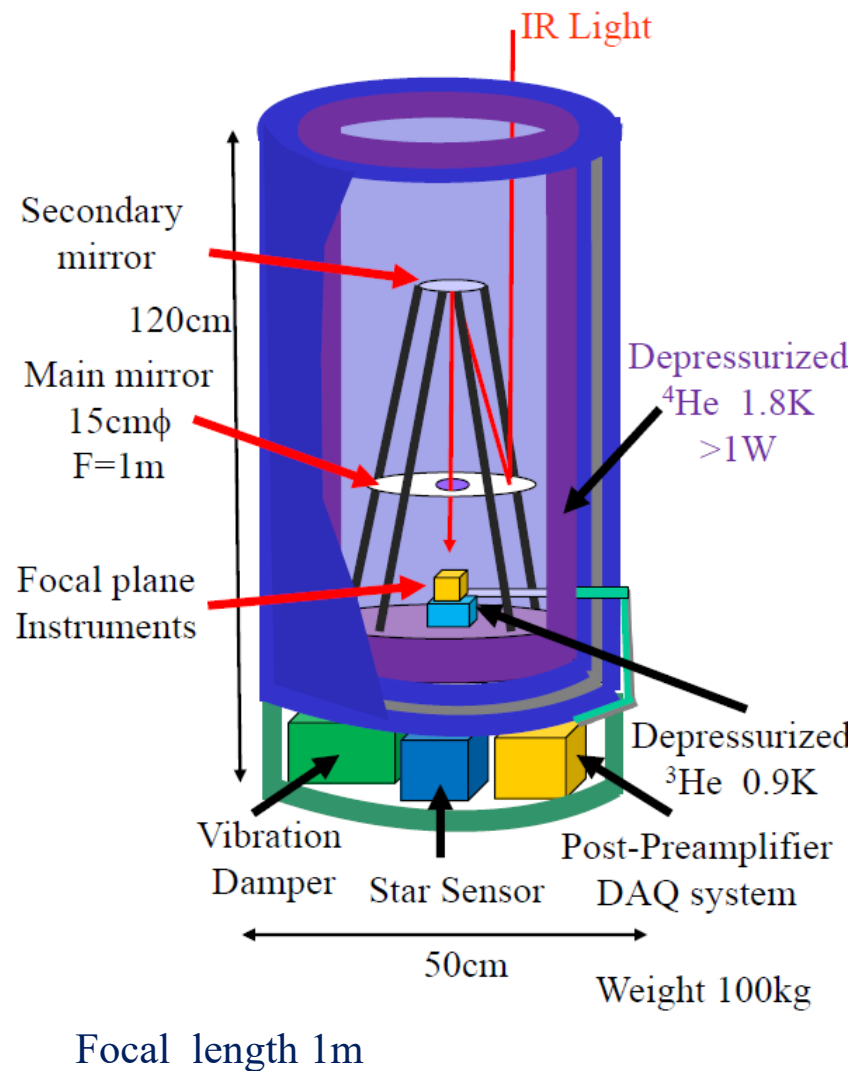
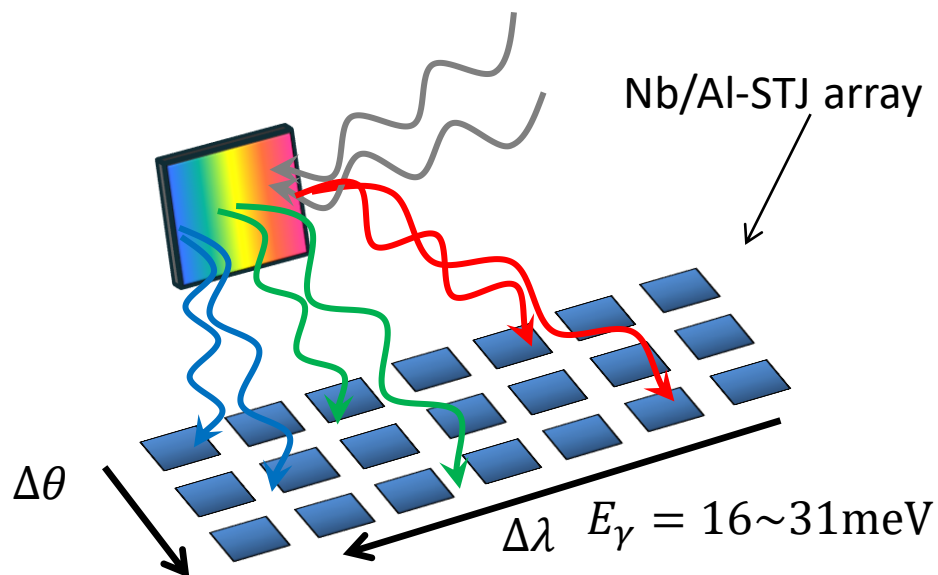
- 観測ロケット実験で500秒の測定
- 直径15cm, 焦点距離1mの主鏡, 焦点位置に分光器($\lambda=40\mu\text{m}\sim 80\mu\text{m}$)
- $100\mu\text{m}\times 100\mu\text{m}\times 8\text{pix}\times 50\text{列}$ (λ 方向)の各光検出器ピクセルで光子計数



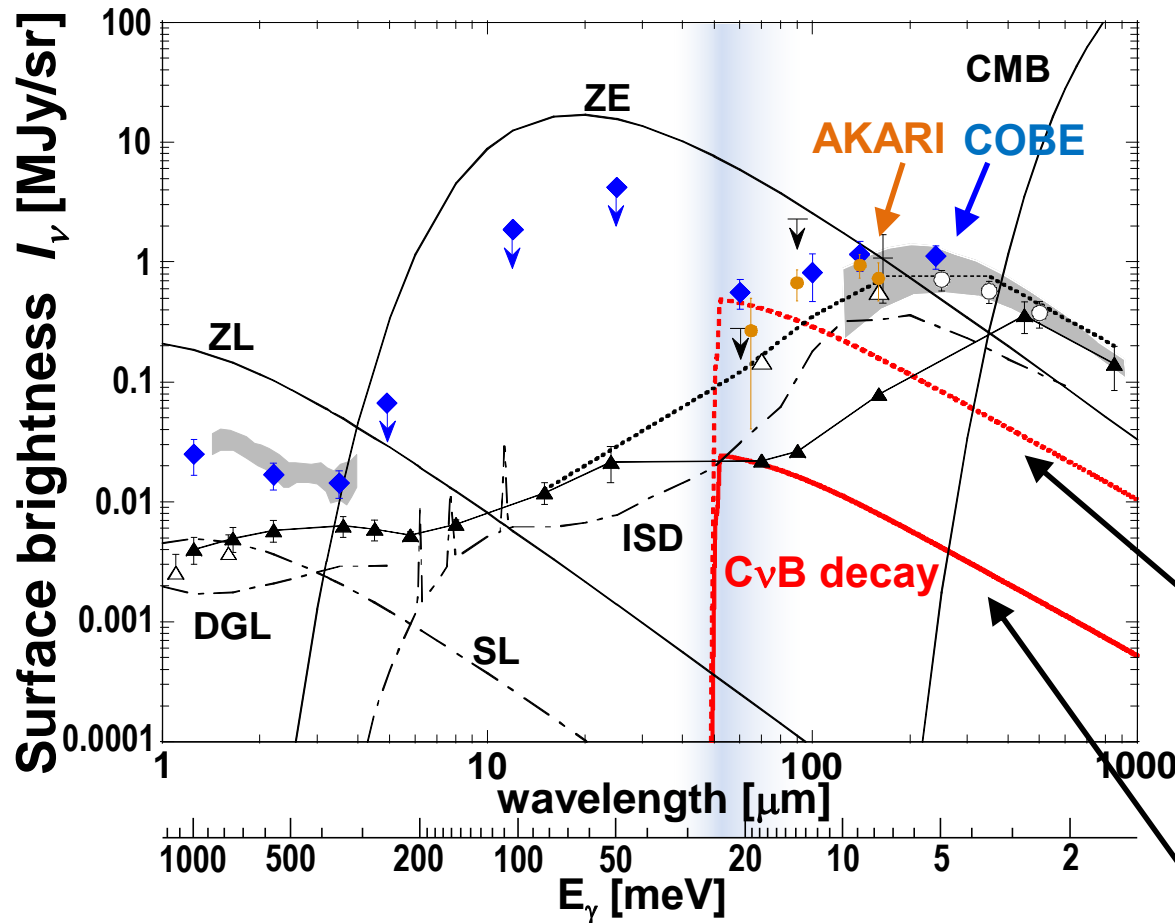
JAXA Rocket Experiment for Neutrino Decay Search

JAXAのロケット実験

- ロケットで高度200km~300kmまで上昇．約5分の観測
- $\lambda = 40 - 80\mu\text{m}$ (16-31meV)の範囲で連続スペクトラムを測定(回折格子で50分割)，空間方向にも8分割
 - $\Delta\lambda = 0.8\mu\text{m}$
 - $100\mu\text{m} \times 100\mu\text{m} \times 50 \times 8$ pixels



CνB radiative decay and Backgrounds



Zodiacal Emission

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

Cosmic Infrared Background (CIB)

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

CνB decay

$$\tau = 5 \times 10^{12} \text{ yrs}$$

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

Excluded (S.H.Kim 2012)

Expected E_γ spectrum

for $m_3 = 50 \text{ meV}$

$$\tau = 1 \times 10^{14} \text{ yrs}$$

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

at $\lambda = 50 \mu\text{m}$

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

SOI-STJ4 光パルス応答シミュレーション

シミュレーション条件

- STJに並列に1nFの容量
- 1M Ω のバイアス抵抗
- 出力側は、1M Ω 終端, および0.5nFの容量負荷

