



# SOI-STJ開発現状

武内勇司 (筑波大)

Mar. 13, 2017

SCD review @ KEK 2-Go-kan Bldg.

# COBAND (COsmic BAckground Neutrino Decay)



□ Heavier neutrinos in mass-eigenstate ( $\nu_2, \nu_3$ ) are not stable

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

✓ However, the lifetime is expected to be much longer than the age of the universe

➔ We search for neutrino decay using Cosmic Background Neutrino (CvB) as the neutrino source

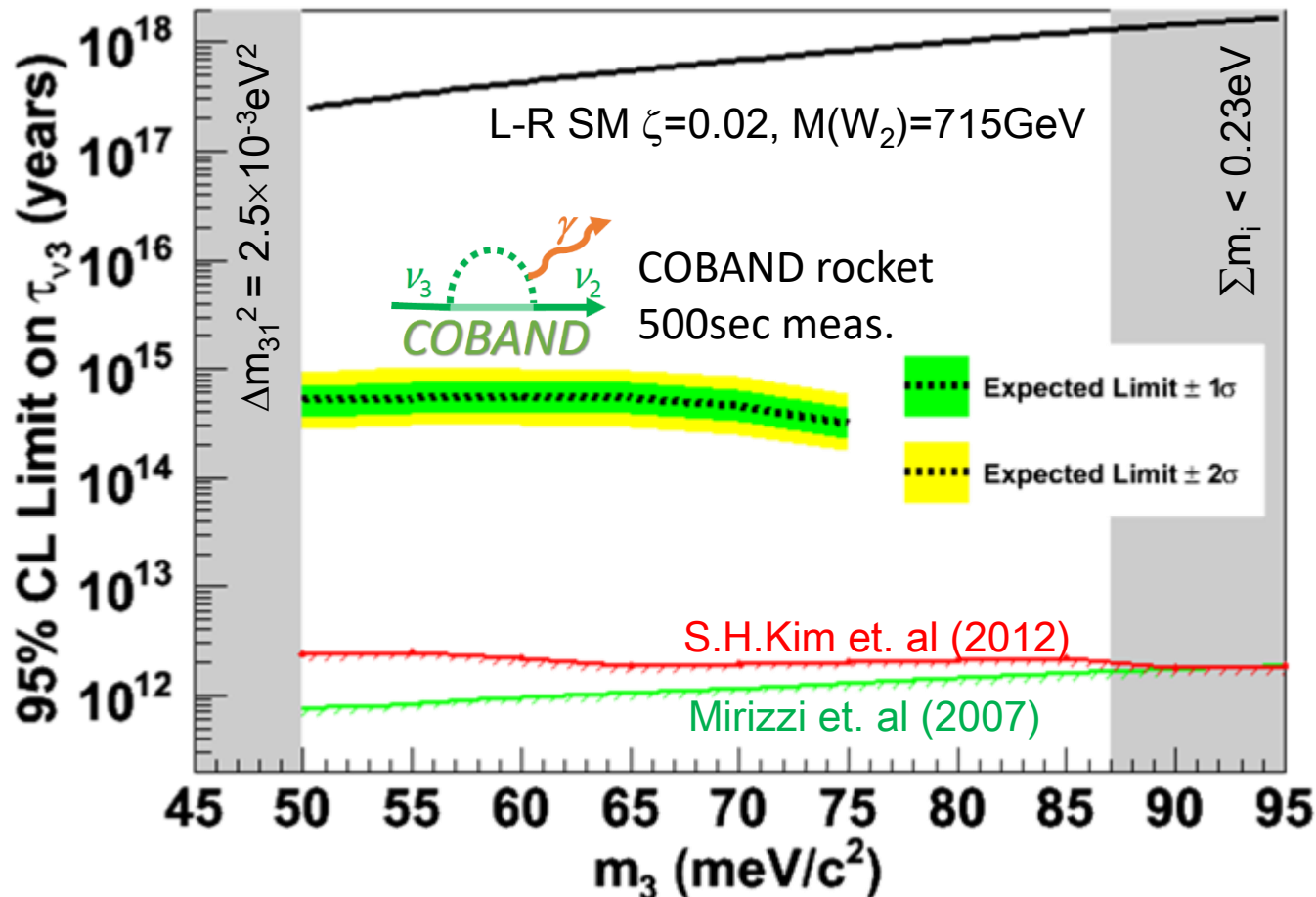
$$\rho(\nu_3 + \bar{\nu}_3) \sim 110/\text{cm}^3$$

二体崩壊  $E_\gamma = (m_3^2 - m_{1,2}^2)/(2m_3)$

■  $m(\nu_3)=50\text{meV}$  とすると  $E_\gamma=25\text{meV}$  ( $\lambda=50\mu\text{m}$ )

# 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( $\lambda=40\mu\text{m}\sim 80\mu\text{m}$ )
- $100\mu\text{m}\times 100\mu\text{m}\times 8\text{pix}\times 50\text{列}$ ( $\lambda$ 方向)の各光検出器ピクセルで光子計数



# 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

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

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

# COBAND Collaboration Members (As of Mar. 2017)

転出

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)

4月から  
テニュアトラック助教

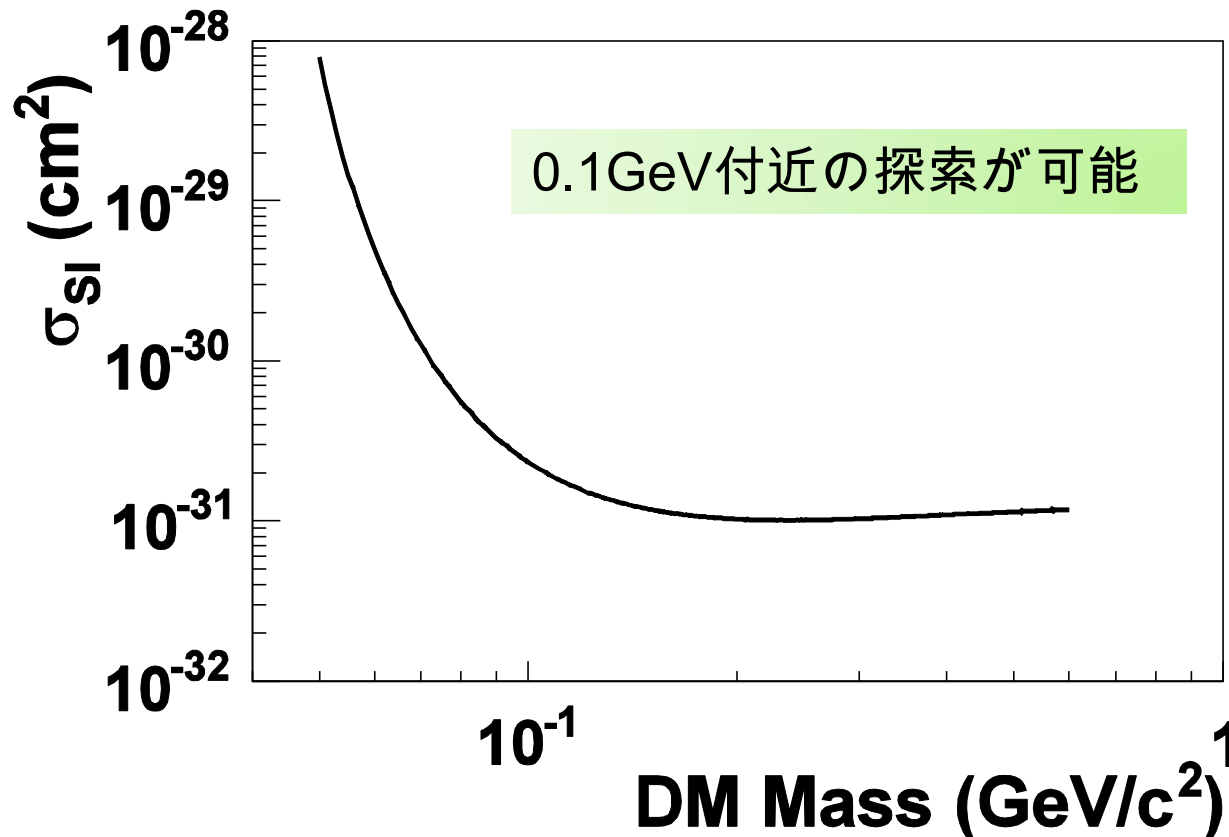
4月から筑波大D1

## ニュートリノ崩壊光探索実験

- 日本学術会議が策定している「マスタープラン2017」に「宇宙背景ニュートリノ崩壊探索」(計画番号56 学術領域番号23-2)として採択
- 科研費新学術領域研究(ニュートリノフロンティアの融合と進化)計画研究「宇宙背景ニュートリノの崩壊探索に用いる超伝導赤外線検出器の開発」(金, H25～H29)
- 挑戦的萌芽研究「半導体SOI回路と超伝導検出器STJの融合による革新的高感度検出器の開発」(武内, H28～H30)

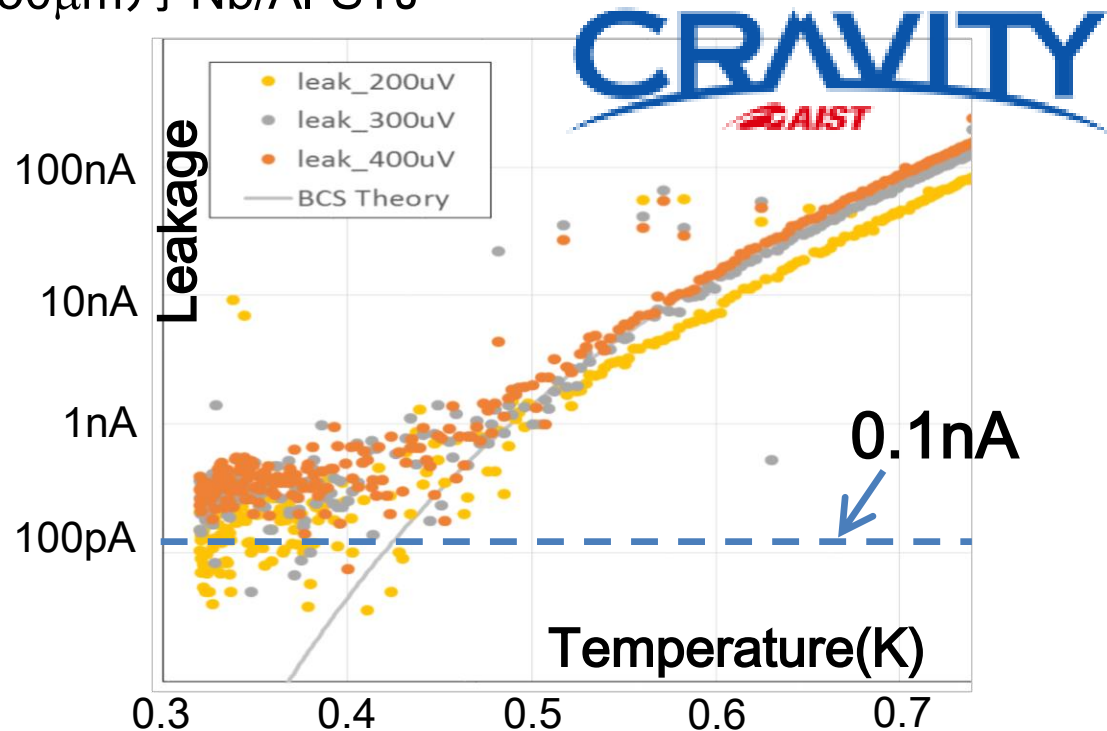
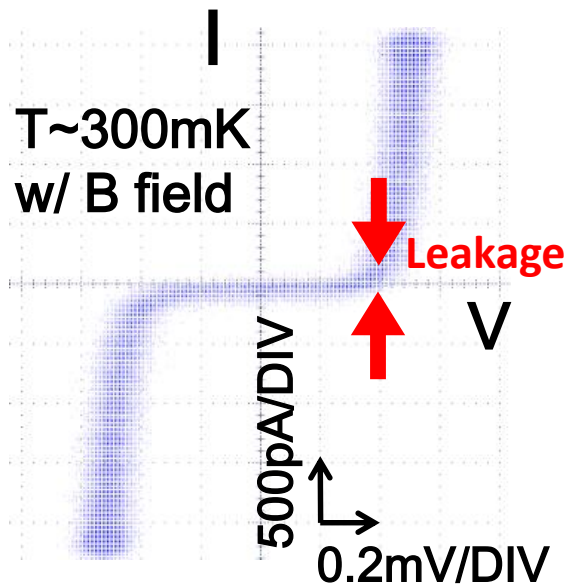
# 25meV 一光子検出可能なSTJのその他の応用 Sub-GeV Dark Matter Search

- Target:  $^{93}\text{Nb}$  (92.9u)  $100\mu\text{m} \times 100\mu\text{m} \times 1\mu\text{m} \times 10$
- Measurement time: 10000 sec ( $\sim 2.8$ hours)
- 350meV の閾値に対して, ダークカウントが無視できると仮定



# CRVAVITY製Nb/Al-STJ

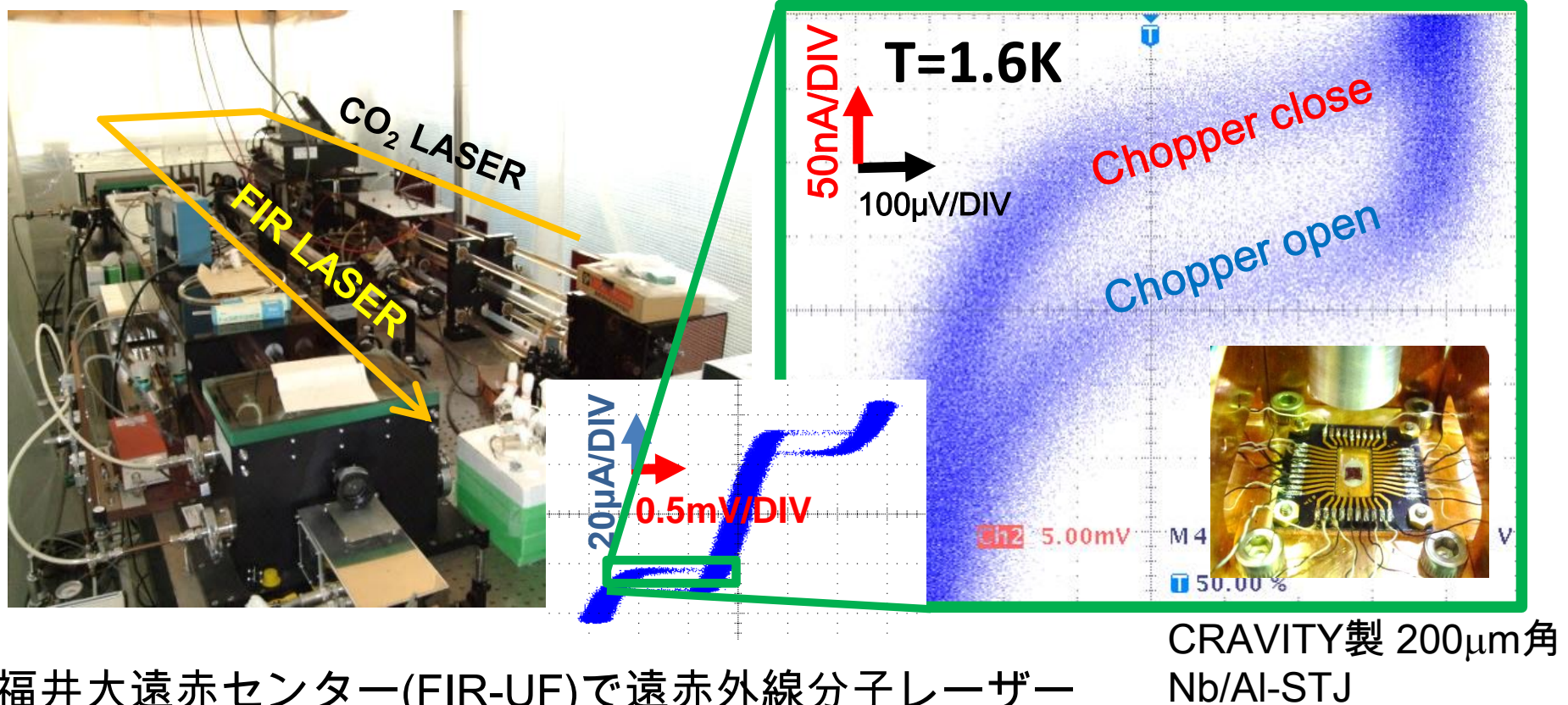
産総研CRAVITY で作製された50 $\mu$ m角 Nb/Al-STJ



- 50 $\mu$ m 角でリーク200pA@0.4V , 20 $\mu$ m 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 ,  $N_{q.p.}=25\text{meV}/1.7\Delta\times 10\sim 250$
- 50pA のリーク電流をSTJ信号幅( $\sim 1\mu\text{s}$ )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



# Nb/Al-STJ 遠赤外レーザー応答試験(2016.3)

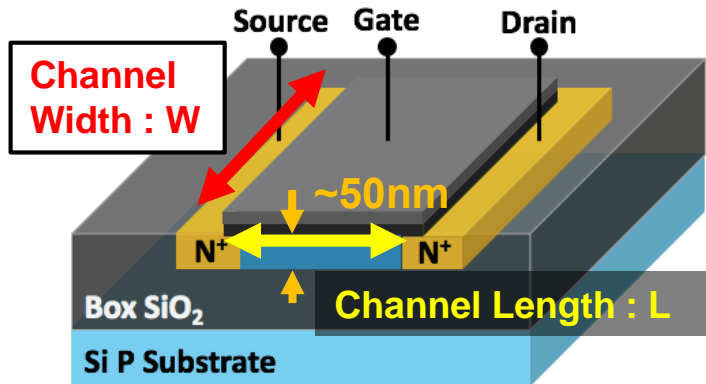


福井大遠赤センター(FIR-UF)で遠赤外線分子レーザーをチョッパー( $f=40\sim 200\text{Hz}$ )でOn/OffしながらNb/Al-STJに照射し、I-V特性の変化をみる (LHe4減圧 $T=1.6\text{K}$ )

- 波長 $57.2\mu\text{m}$  のレーザー照射に対するトンネル電流増加( $\sim 100\text{nA}$ )を観測
- STJの $25\text{meV}$ 光子応答校正のための光源として使用可

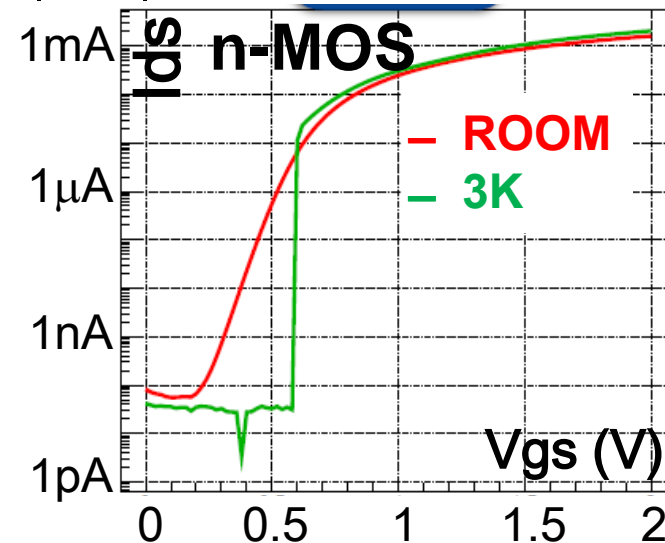
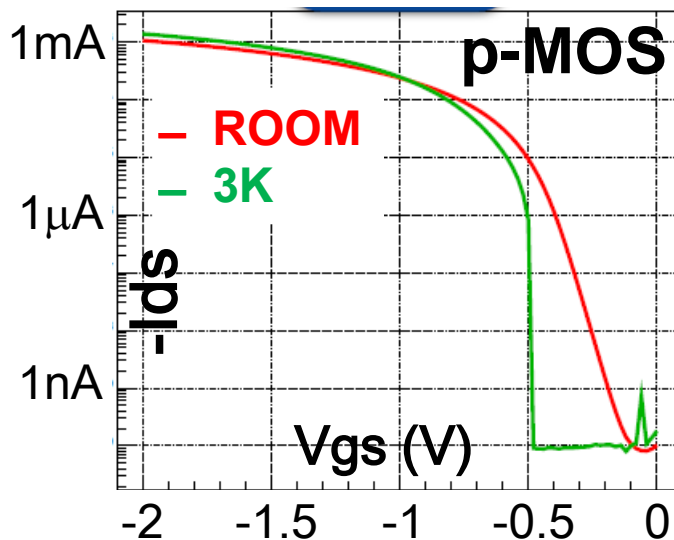
# FD-SOI-MOSFET によるSTJ信号読み出し回路

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



- SiO<sub>2</sub>絶縁膜上にMOSFETを形成
- チャネル層が非常に薄い

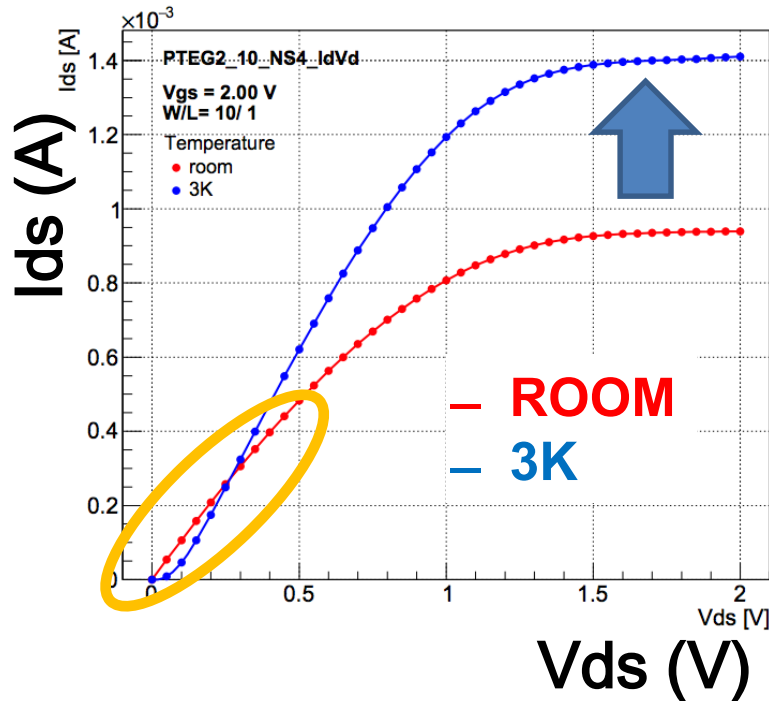
■ Id-V<sub>g</sub> curve of W/L=10μm/0.4μm at |V<sub>ds</sub>|=1.8V



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

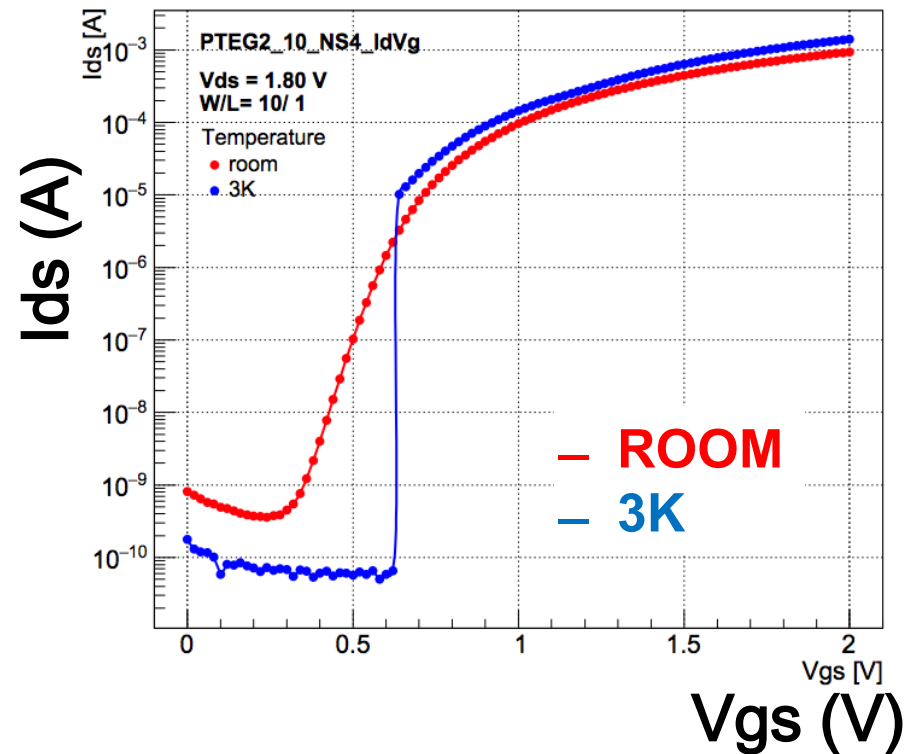
# 極低温でのFET特性変化

- n-ch ST2 W/L=10 $\mu$ m/1.0 $\mu$ 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

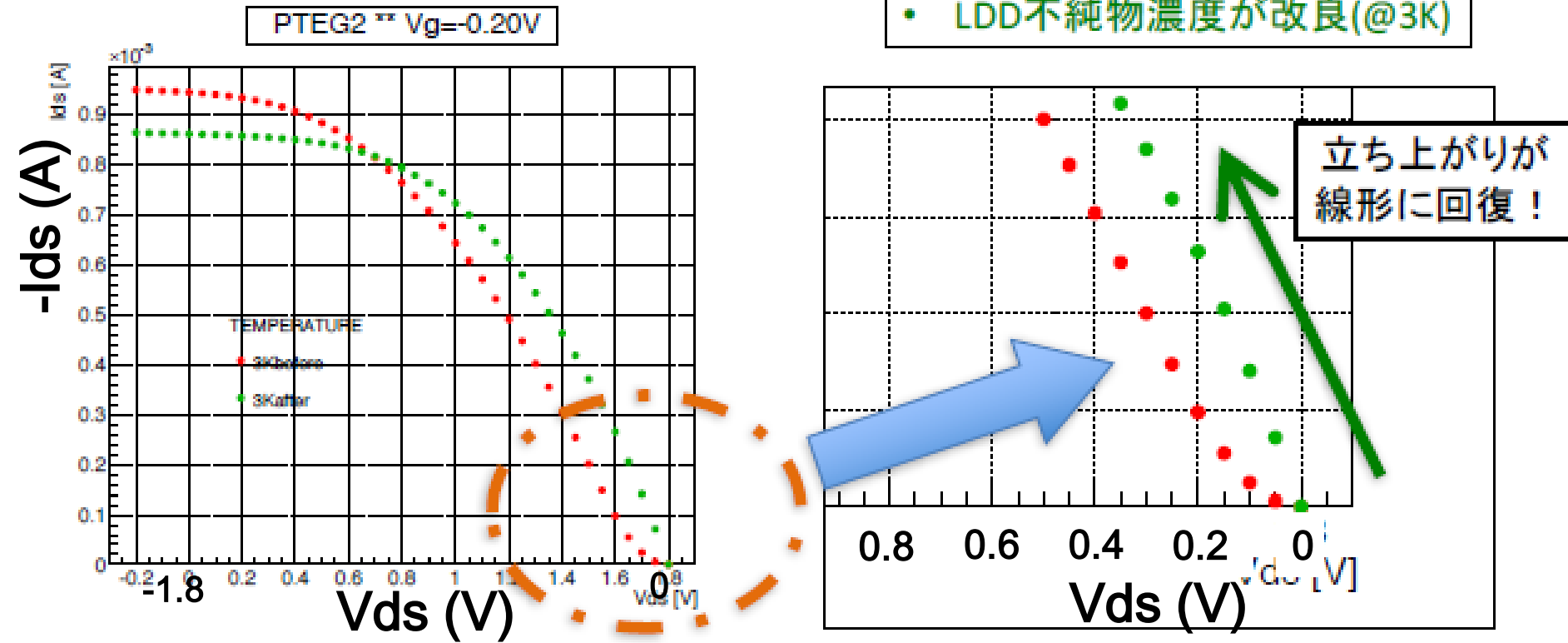


- 閾値電圧の移動
- サブスレッショルド電流の抑制

➔ 超低消費電力化が可能か？

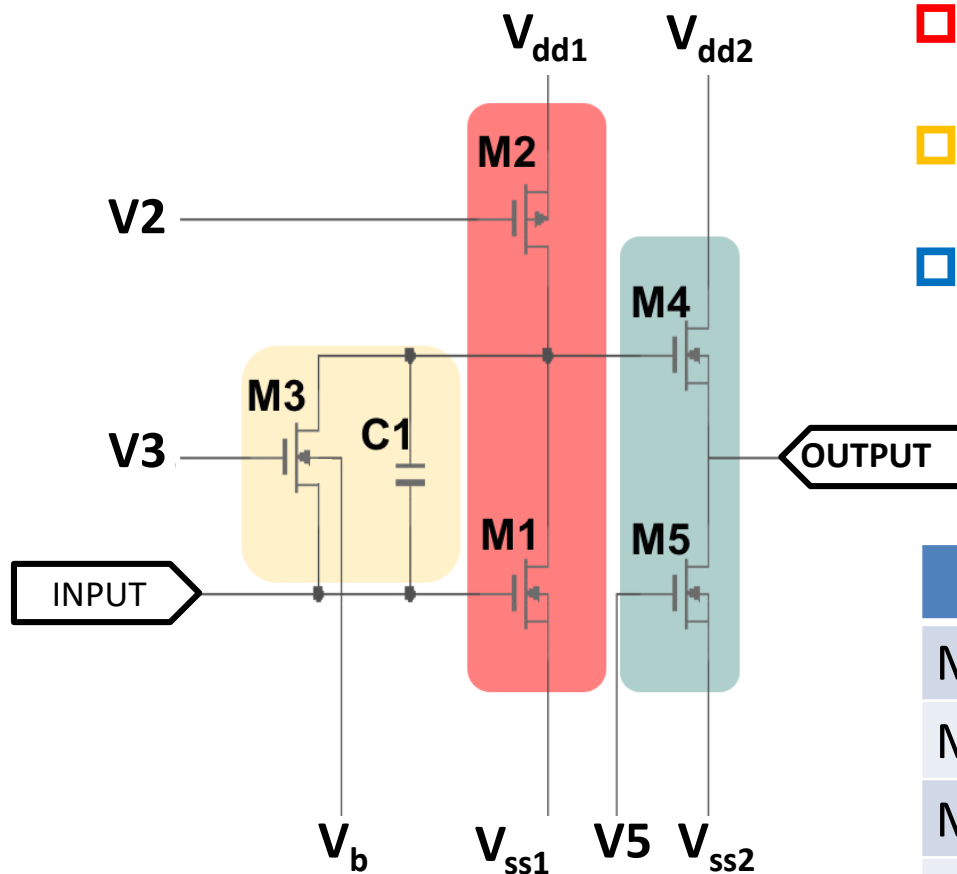
# LDD濃度変更後

- 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 $\mu$ m/1.0 $\mu$ m



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を行う．

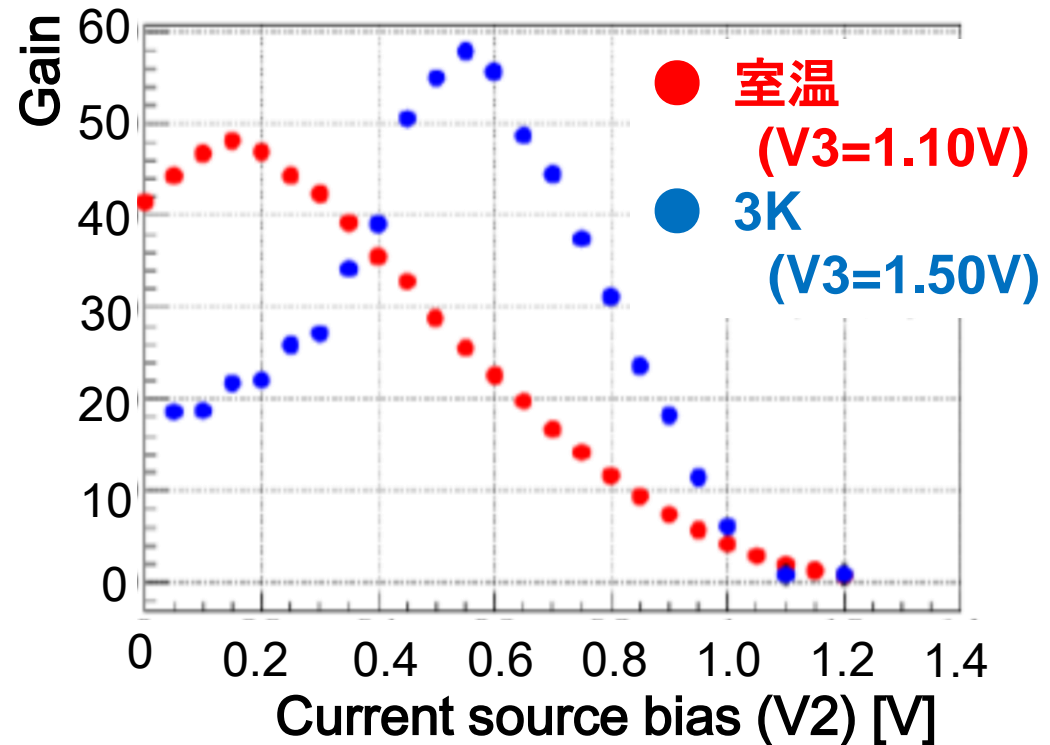
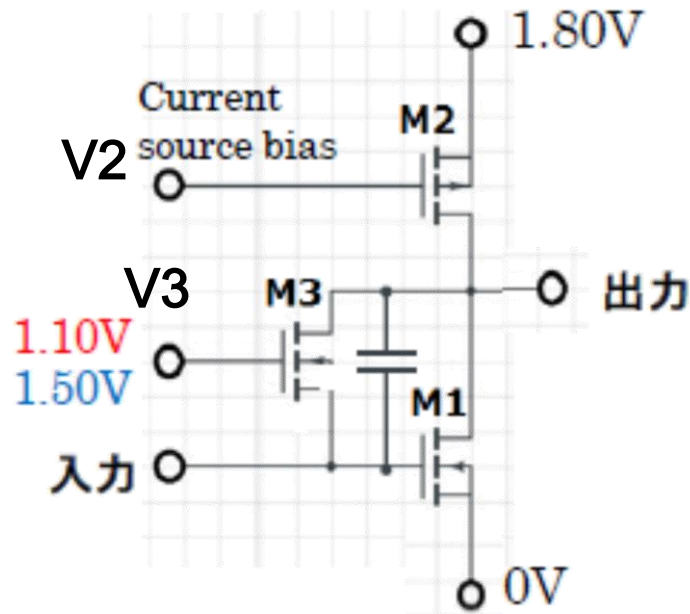
# SOI prototype amplifier (SOI-STJ4)



- **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

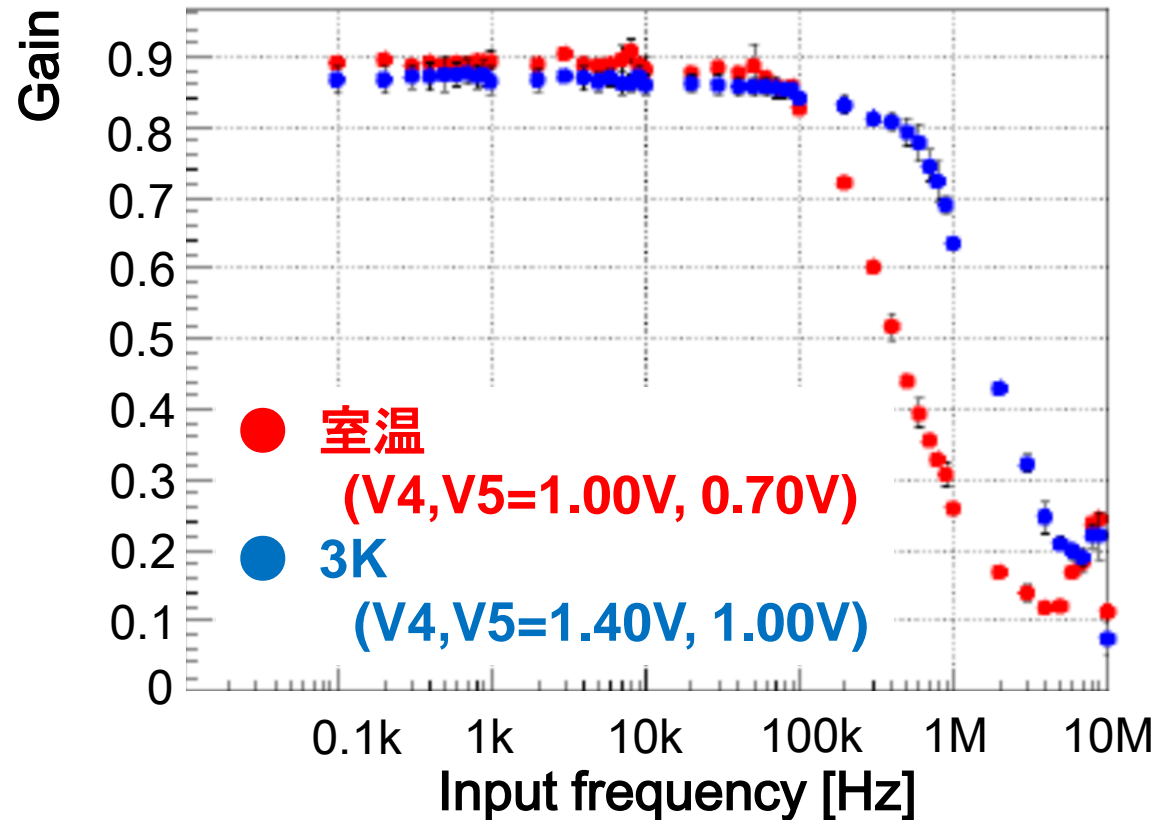
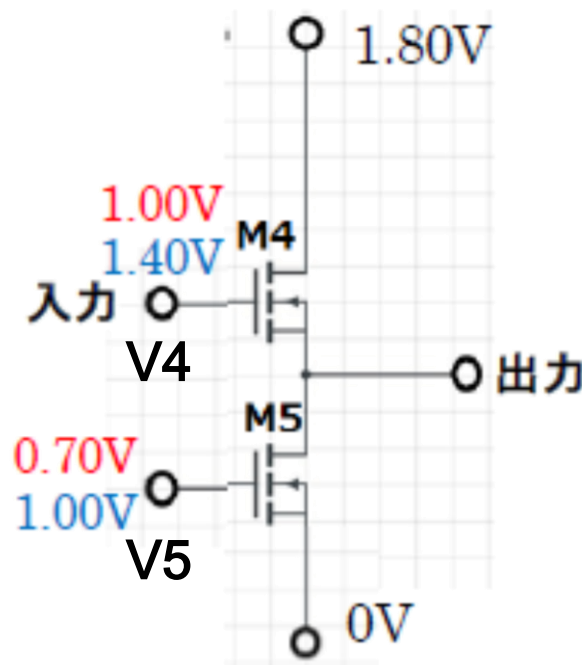
	Type	W [ $\mu\text{m}$ ]	L [ $\mu\text{m}$ ]
M1	Nch-source tie	40	1
M2	Pch-source tie	1	10
M3	Nch-body tie	1.6	10
M4	Nch-source tie	70	1
M5	Nch-source tie	60	1
C1	MIM cap.	100 fF	

# 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

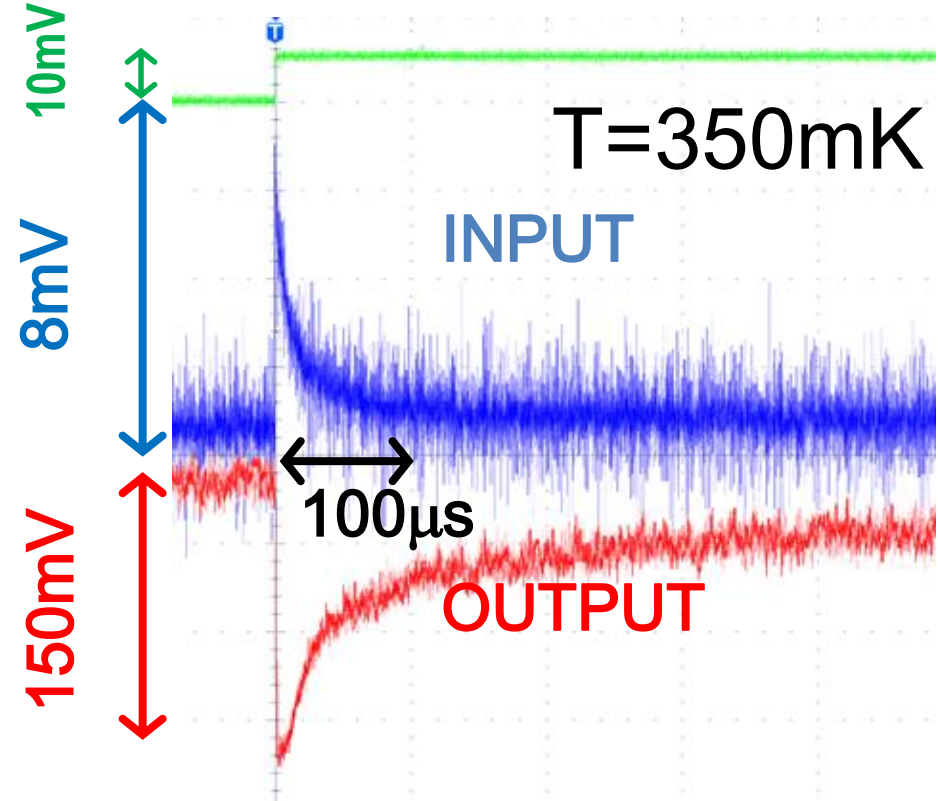
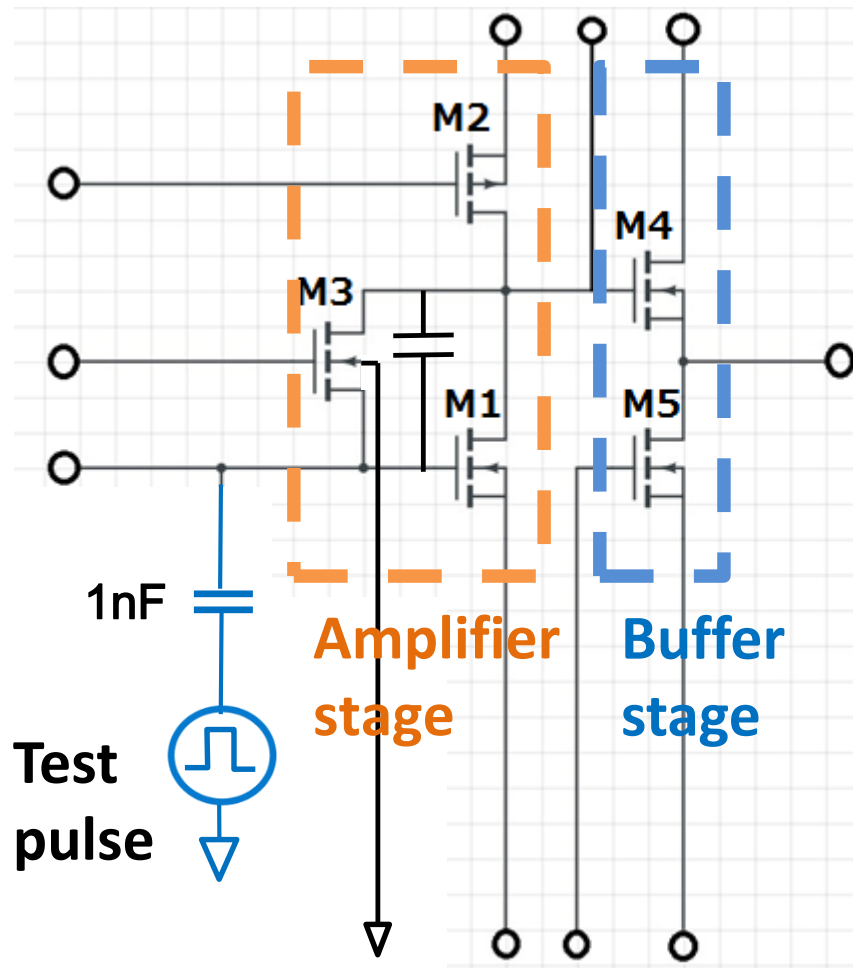
# バッファ一段出力周波数依存性



- 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

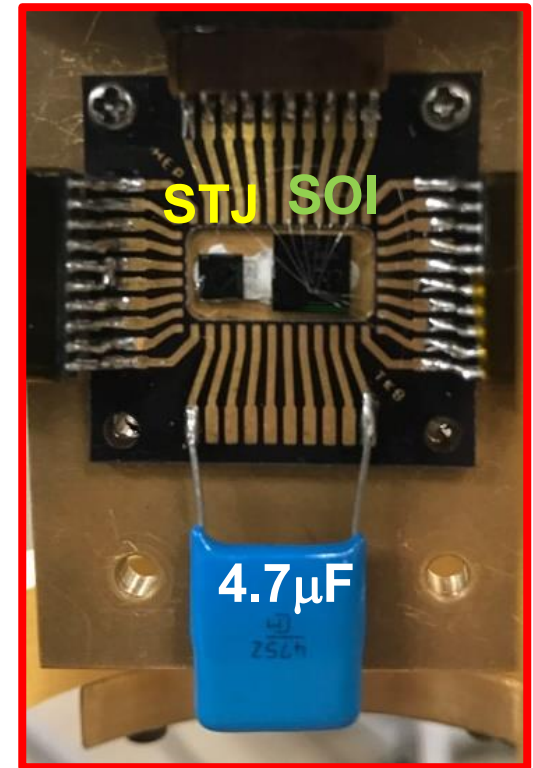
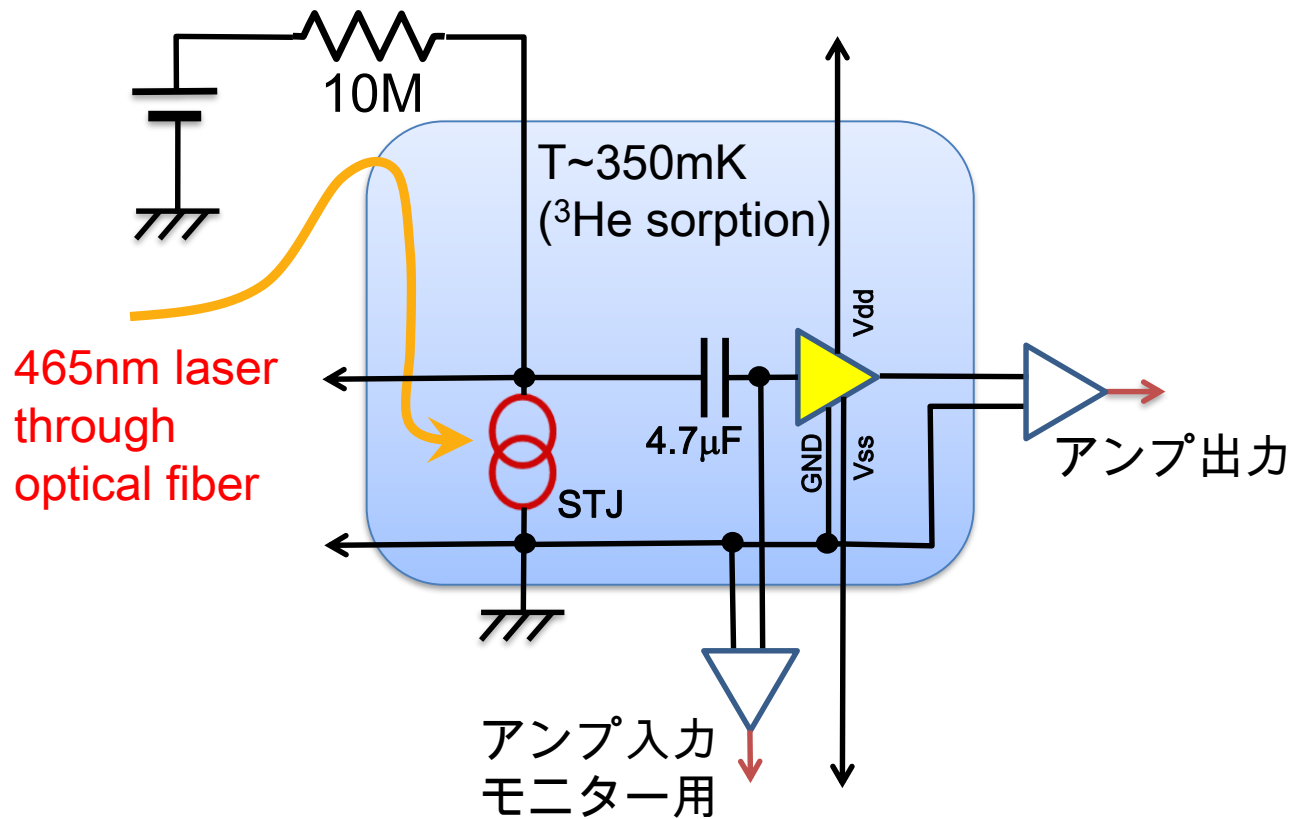


- T=350mK にてC=1nFのキャパシタンスを用い，テスト入力
- 電力消費量：~100μW

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

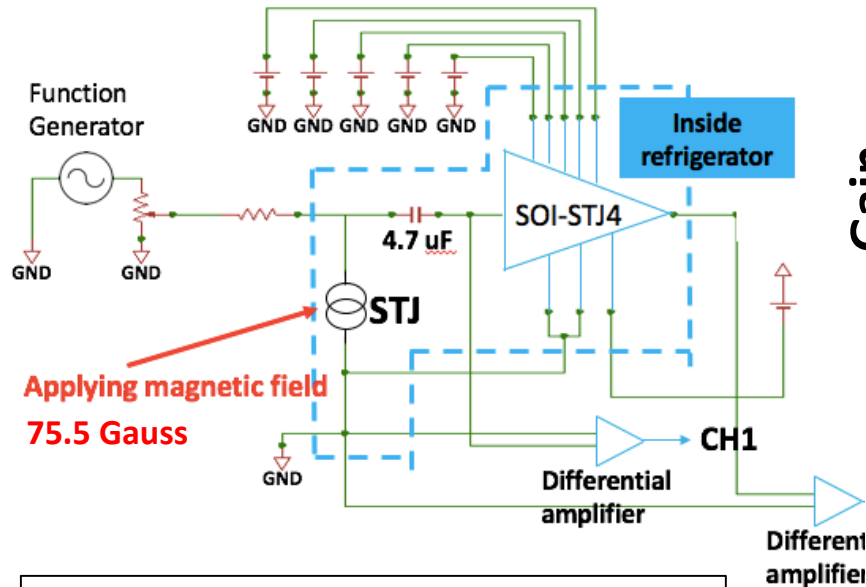


# STJのパルス光応答のSOI-STJ4回路経由読み出し



- 20μm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kΩ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: 1μsの信号に対して160Ω

# SOI-STJ4 電圧増幅率周波数依存性 @T=300mK



Bias Voltage

Vdd1 = 1.8V

Vss1 = 0V

Vdd2 = 1.1V

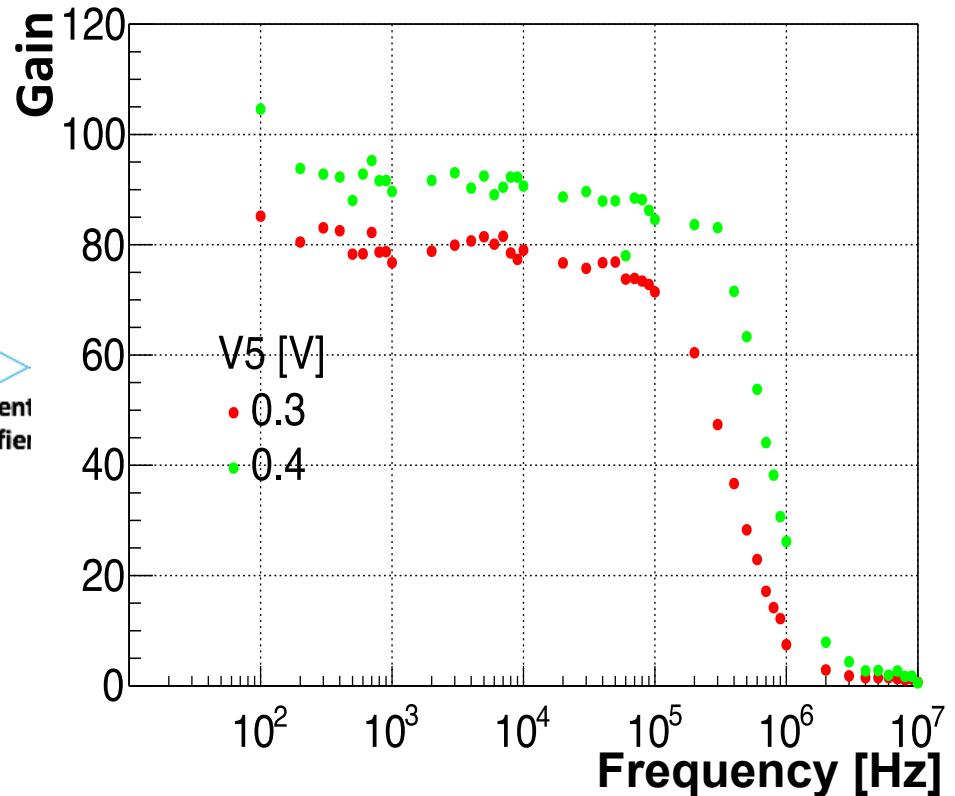
Vss2 = -0.7V

V2 = 0.4V

V3 = 1.5V

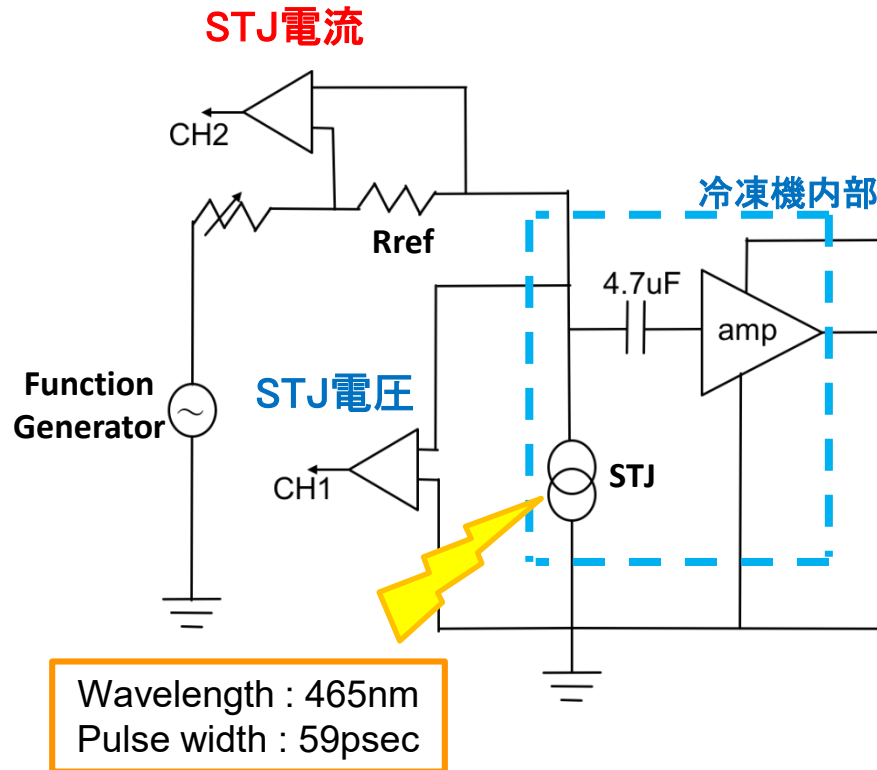
Input Vpp = 1mV

Frequency dependence of SOI-STJ4 gain  
@T=300mK

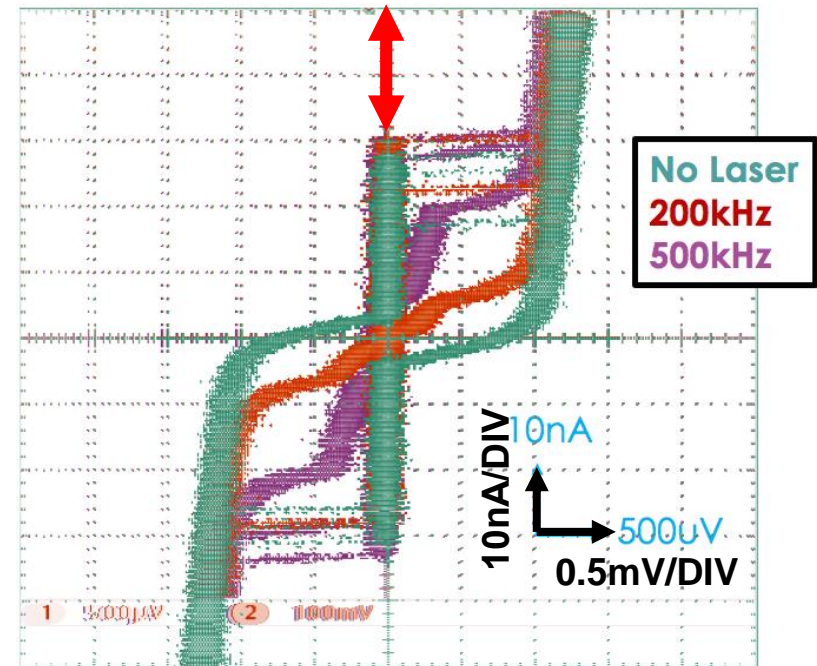


- 300mKにおいて冷凍機配線~0.5nFの容量負荷に対して 0.5MHz程度までの出力周波数帯域を確保

# Nb/Al-STJ I-V特性の光応答

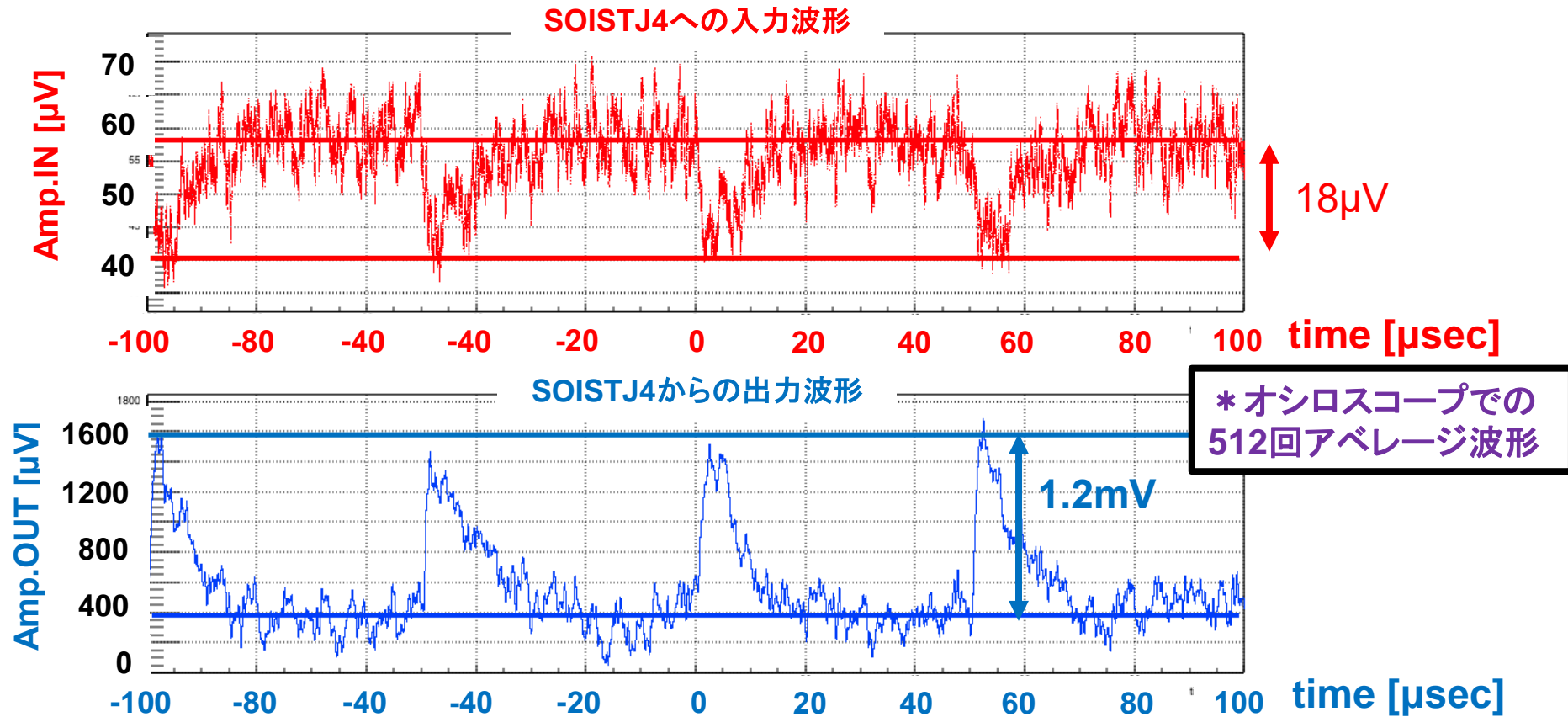


B=75.5 Gauss



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．

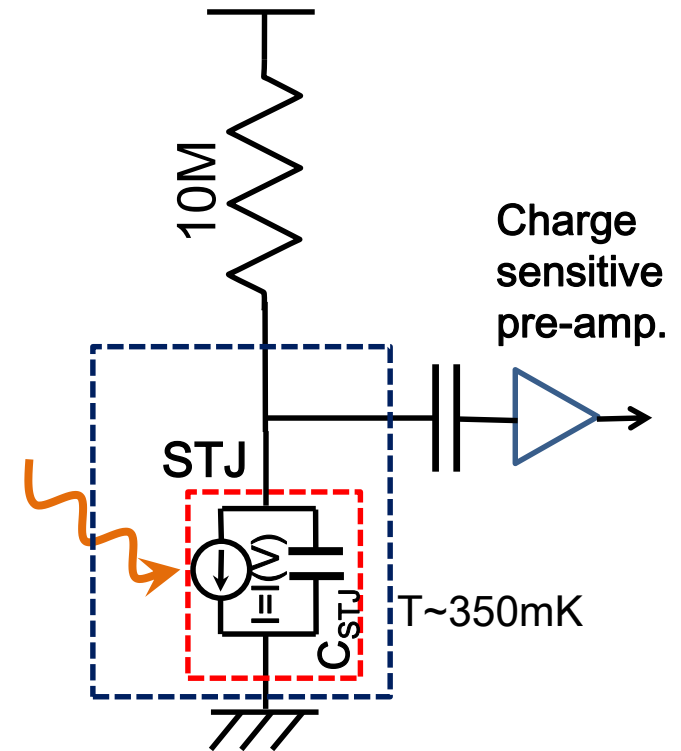
# STJ光パルス応答のSOI-STJ4への入力と出力



- 20kHzの波長465nmレーザーパルス照射に対する20 $\mu$ 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

# SOI charge-sensitive pre-amplifier development

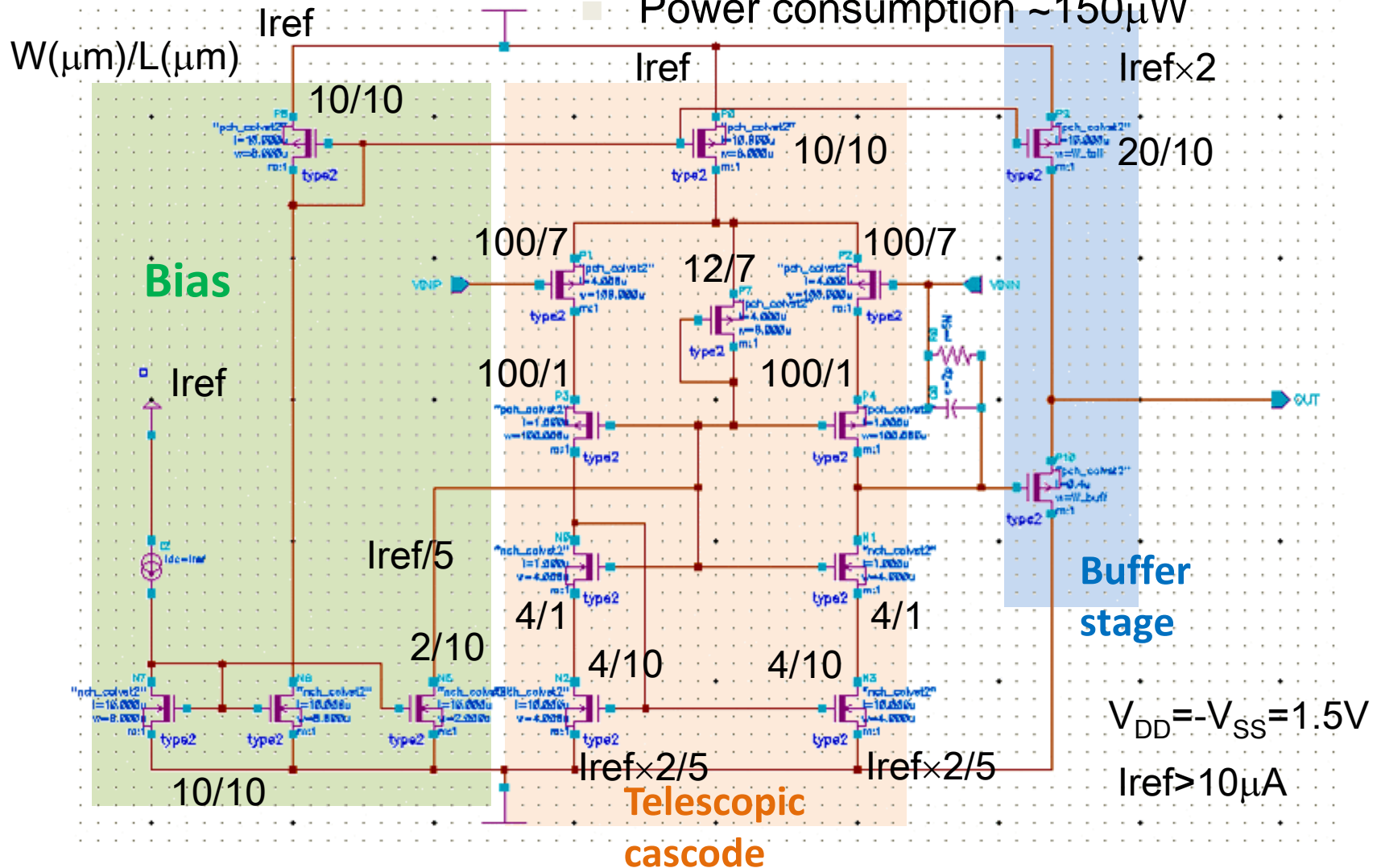
- STJは比較的大きな静電容量:  
20 $\mu\text{m}$ 角で $\sim 20\text{pF}$ 
  - ➔ 光子計数の利点を生かすためには、  
低入力インピーダンスの電荷積分型  
アンプが必要
- STJ応答時定数:  $\sim 1\mu\text{s}$ 
  - ➔ 1MHz以上の帯域をもつSOIオペ  
アンプを開発中



# Op-amp Circuit for STJ (SOI-STJ5)

ただ今測定中！

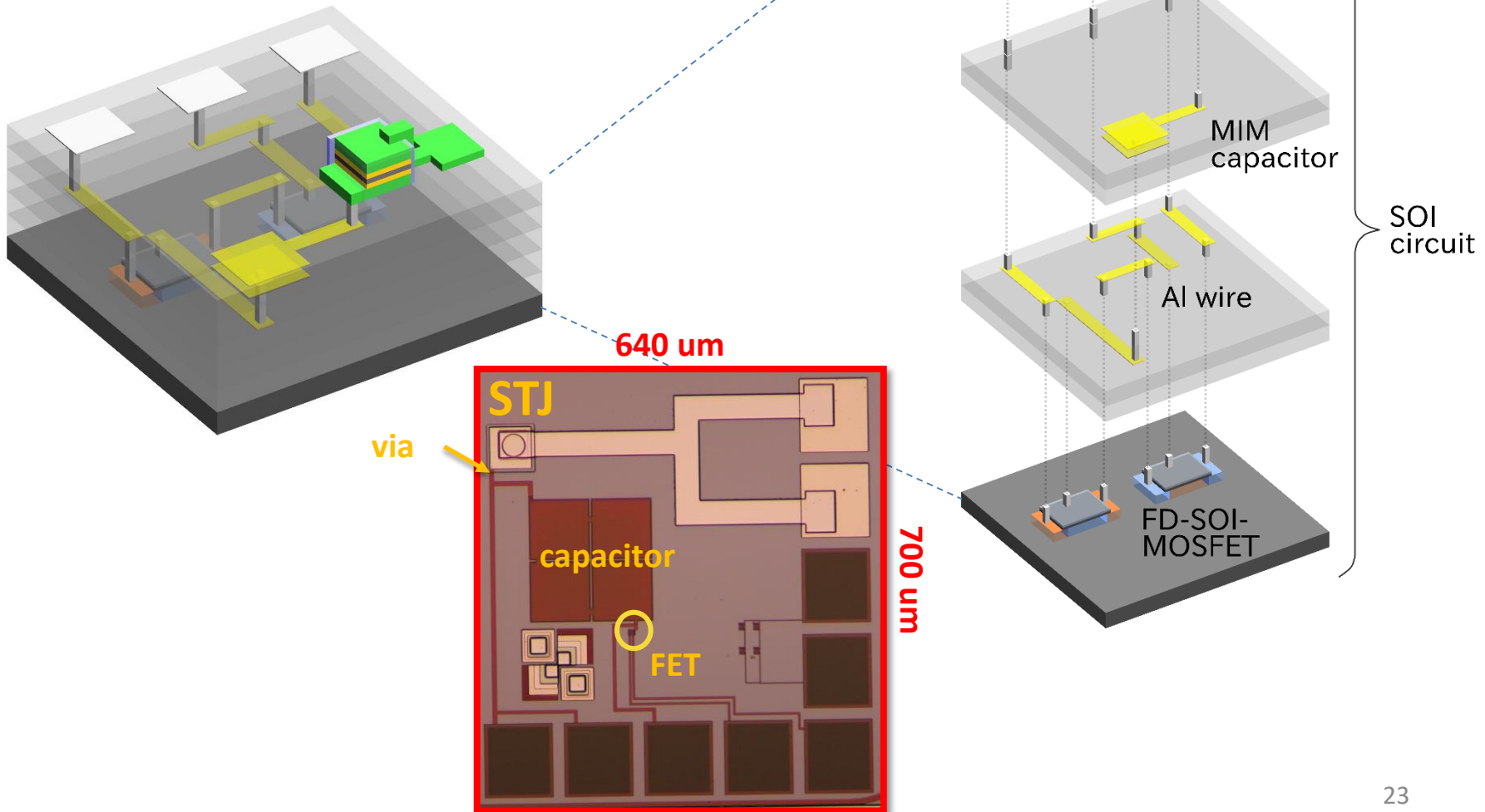
- telescopic cascode differential amplifier
- Feedback  $C=2\text{pF} \times R=5\text{M}\Omega = 10\mu\text{s}$
- Power consumption  $\sim 150\mu\text{W}$



# SOI増幅回路一体型STJ検出器(SOI-STJ)

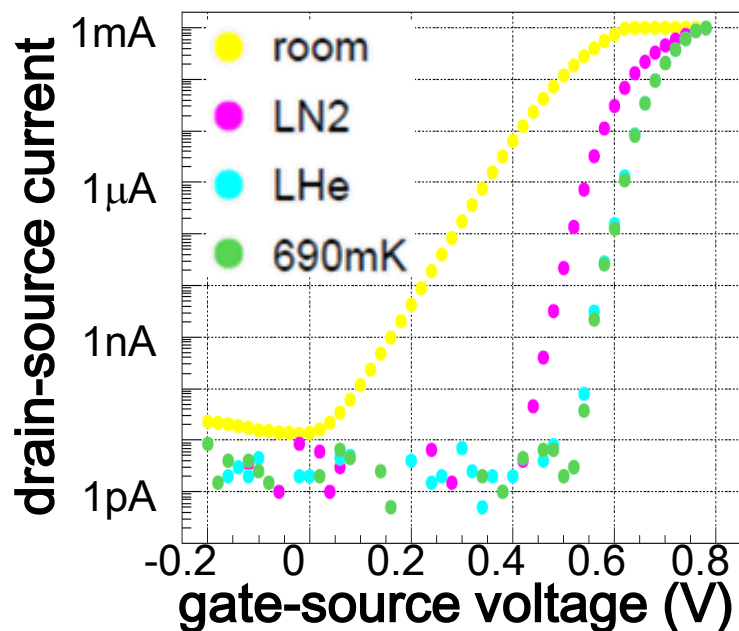
SOI回路基板上にNb/Al-STJ検出器を直接形成した**増幅回路一体型**の検出器

□ STJアレイ化(STJ大面積化)の可能性

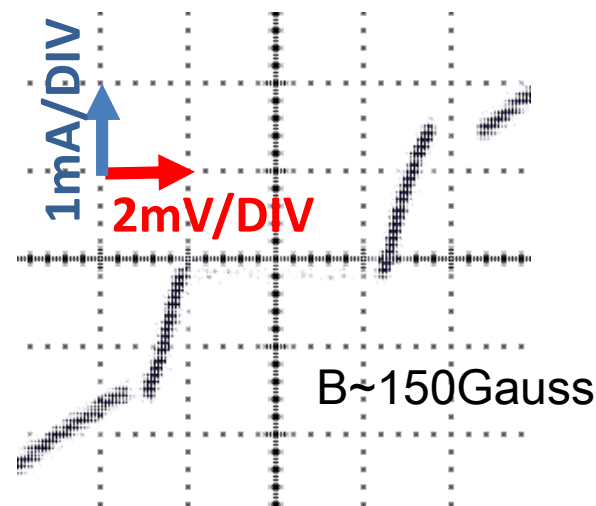




# SOI基板上へのSTJを形成後の特性



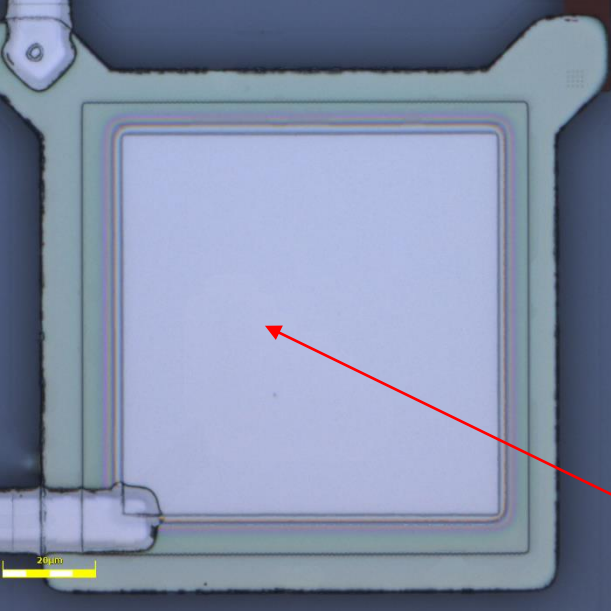
FD-SOI基板上にNb/Al-STJを形成後の  
nMOS-FETの特性(KEKのプロセス装置使用)



FD-SOI基板上に形成されたNb/Al-STJの  
I-V特性(KEKのプロセス装置使用)

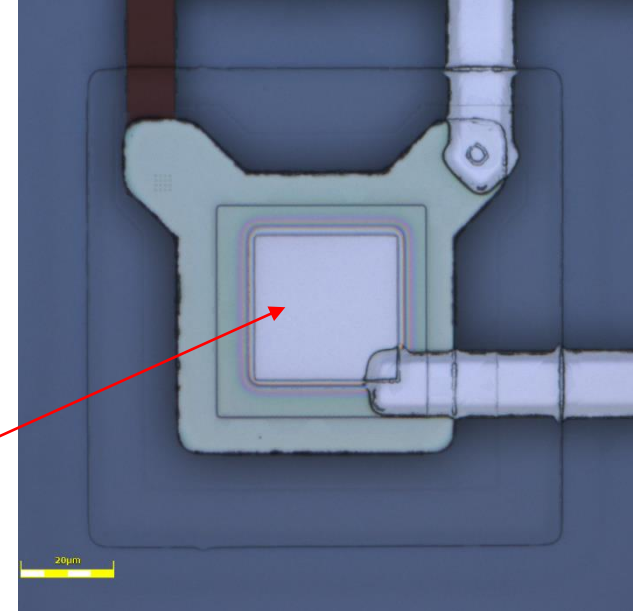
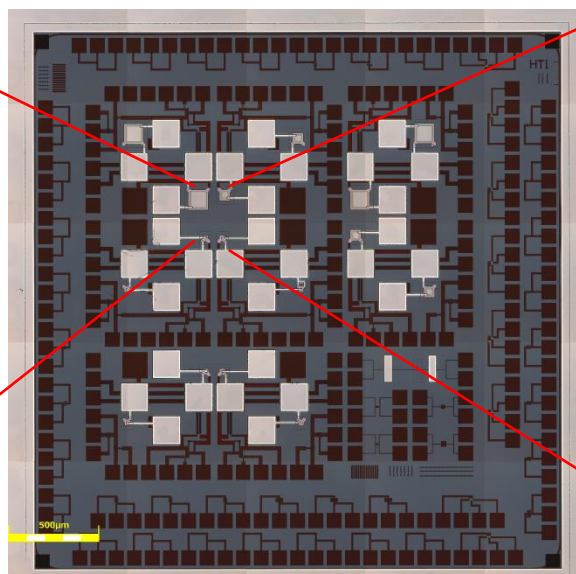
- KEK のプロセス装置でSOI基板上へNb/Al-STJを作製
  - 通常のSi基板上のSTJと同等のI-V特性を観測
  - SOI基板中のn-MOS, p-MOS-FETともに極低温で動作
- 産総研CRAVITYでSOI基板上へのSTJ作製をテスト中





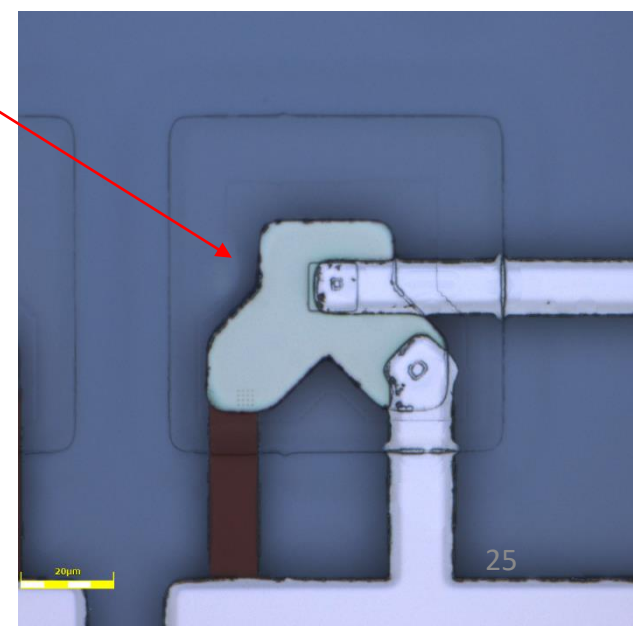
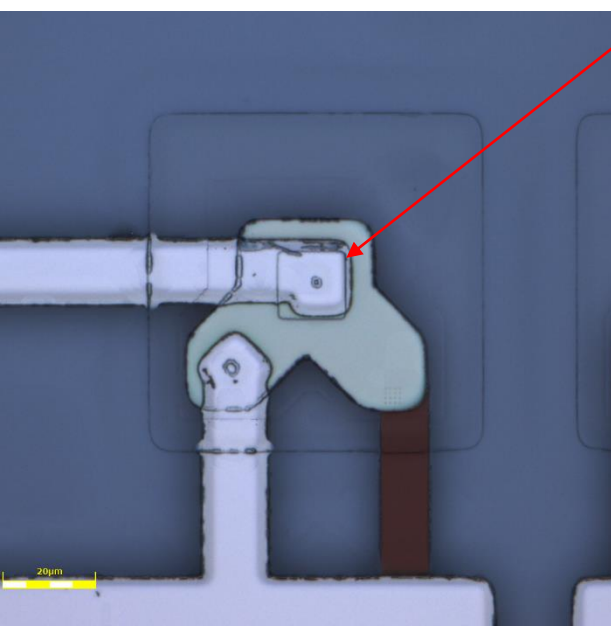
94um角

14um角



44um角

10um角

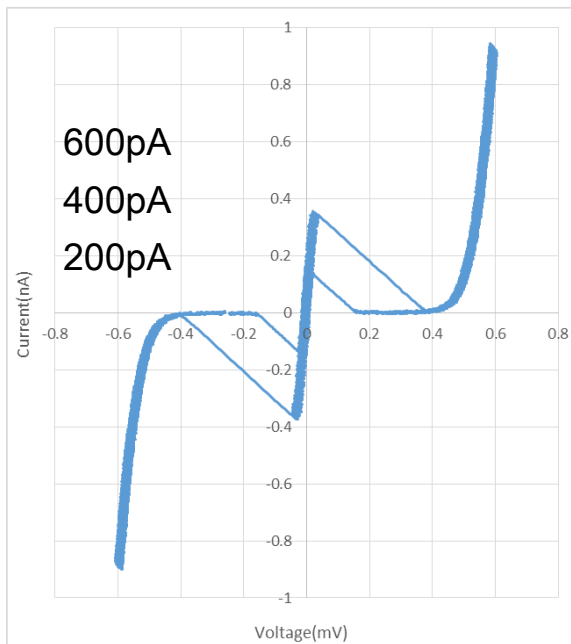


Nb(100nm)/Al(70nm)/AlOx  
(Jc:300A/cm)/Al(70nm)/Nb  
(100nm)

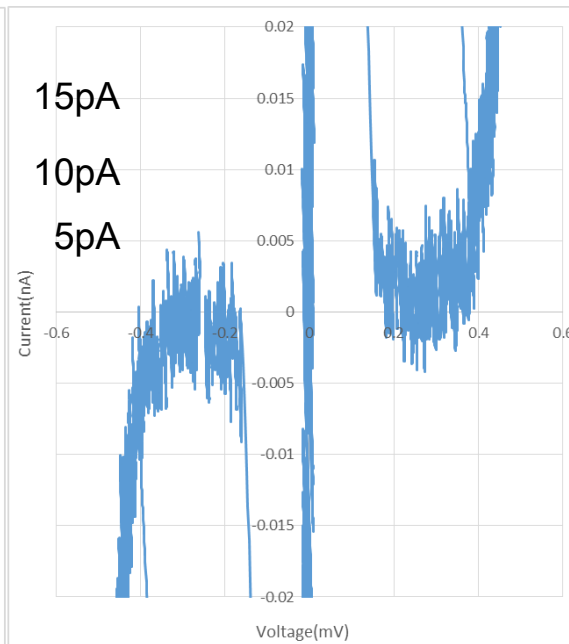
# SOI基板上10 $\mu$ m角のIV@309mK (FT518)



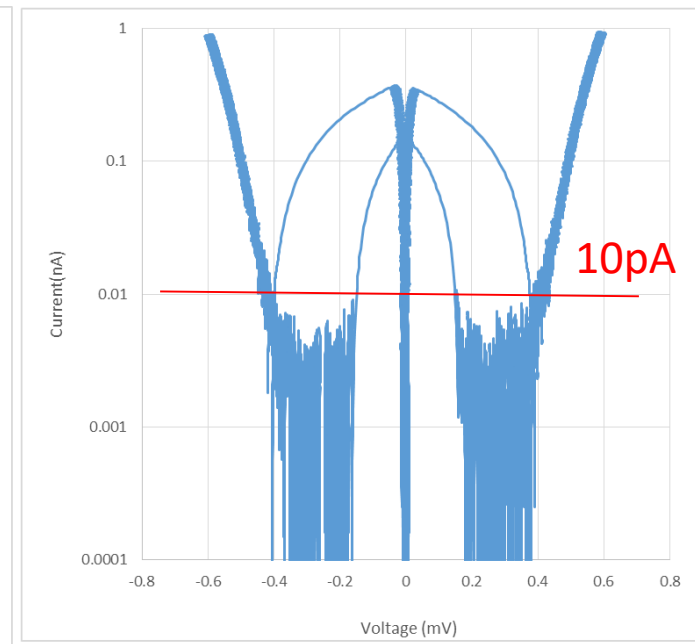
全体



中心部拡大



電流値(絶対値)ログプロット



SOIデバイス上でもSi基板上と同程度の実現

# 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読出し回路を開発中
  - SOIアンプの極低温での動作を確認 . 実際のSTJの光パルス信号のSOIアンプでの増幅信号読み出しに成功(SOI-STJ4) . ノイズ評価に向けた測定を開始
  - 光子計数の利点を最大限に生かす低インプットインピーダンス高速アンプ(帯域 $>1\text{MHz}$ ) (STJ-SOI5) を測定中
  - SOI アンプー一体型STJの可能性

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 .

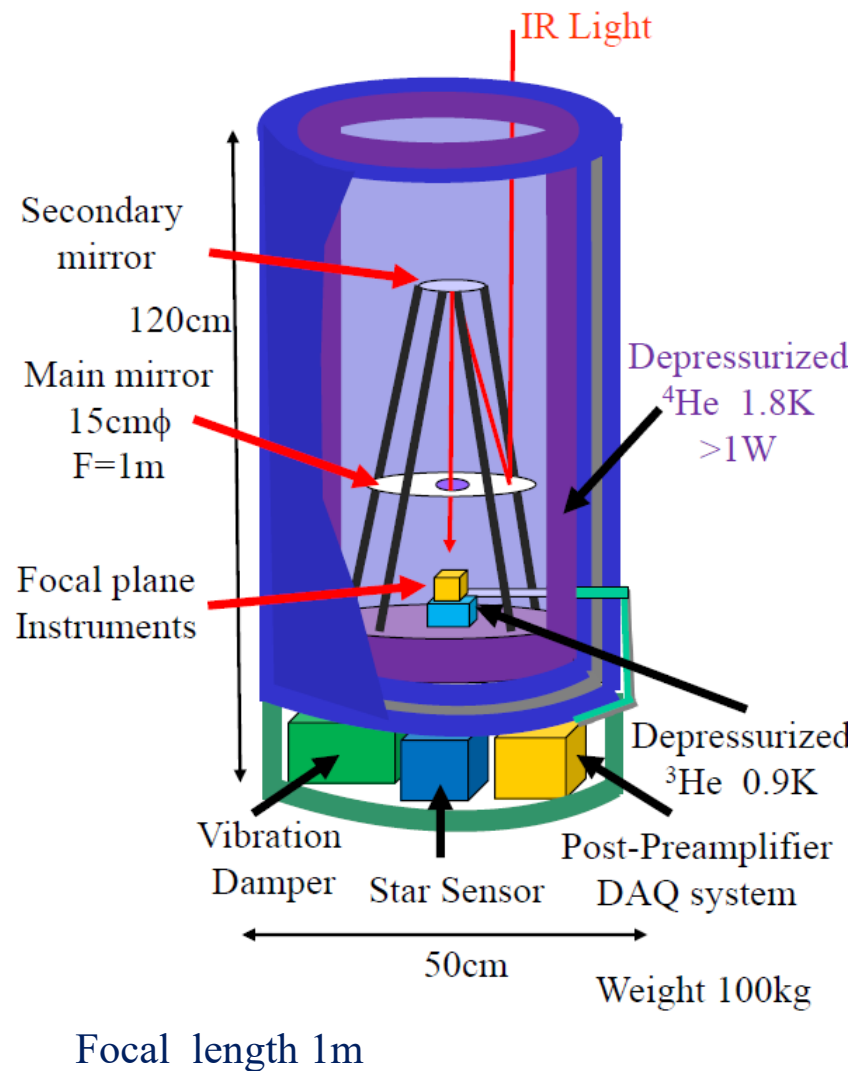
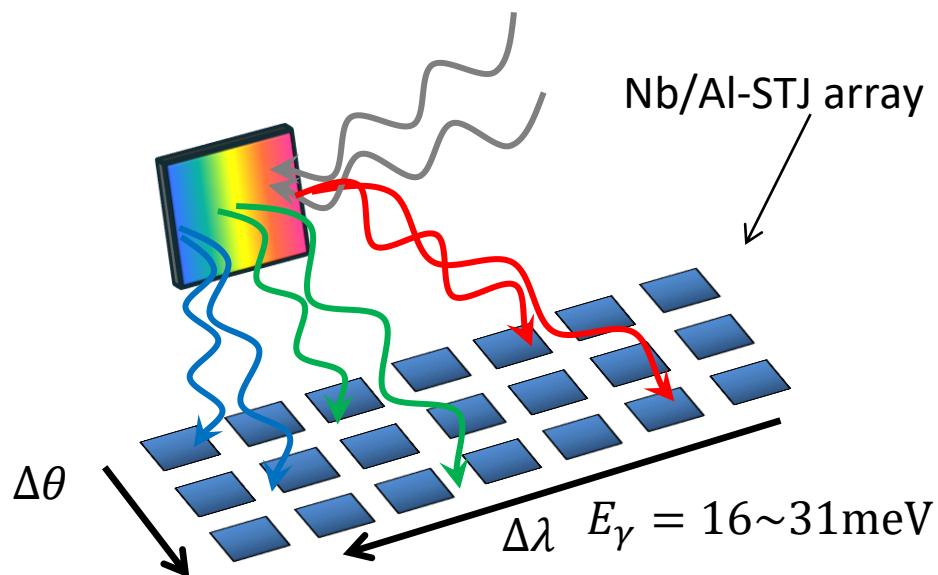
\* VLSI Design and Education Center(VDEC), the U. Tokyo in collaboration with Synopsys, Inc., Cadence Design Systems, Inc., and Mentor Graphics, Inc.

# Backup

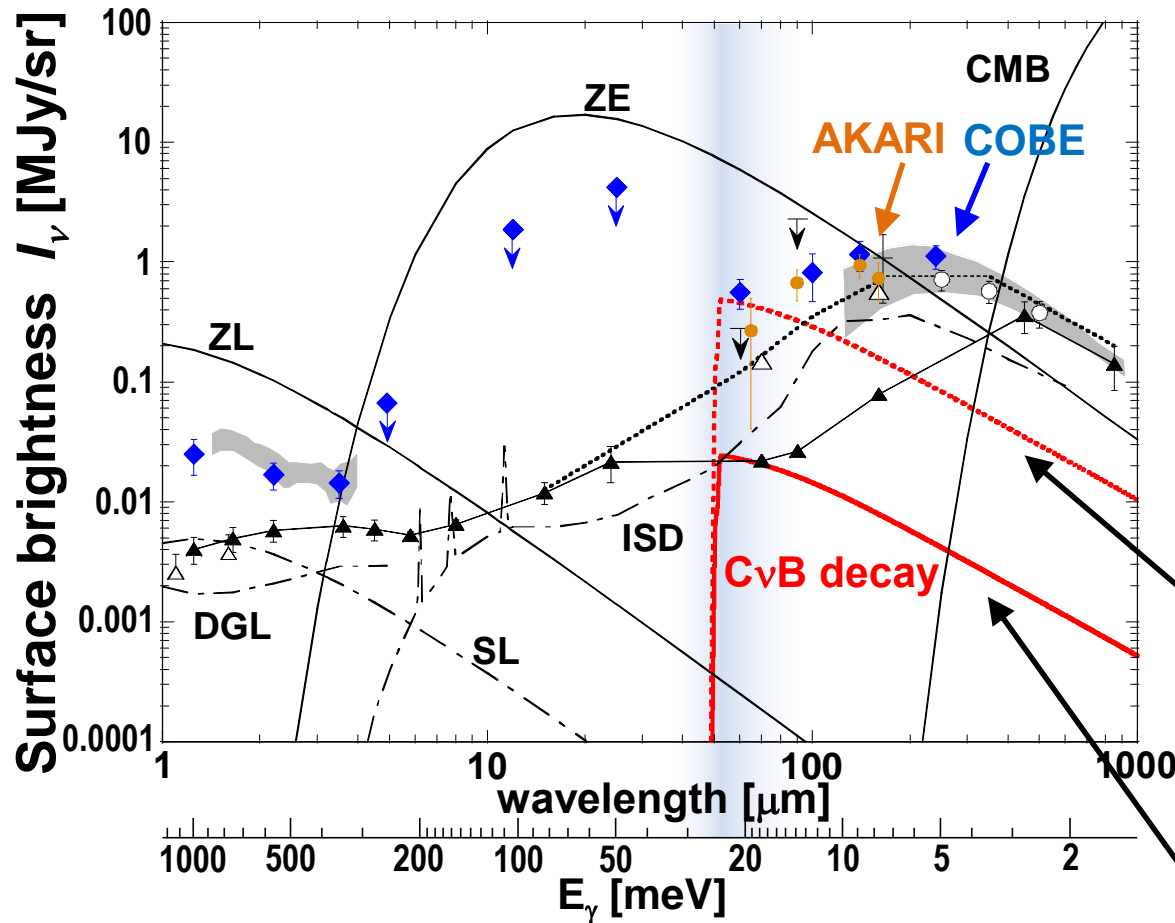
# JAXA Rocket Experiment for Neutrino Decay Search

## 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
  - $\Delta\lambda = 0.8\mu\text{m}$
  - $100\mu\text{m} \times 100\mu\text{m} \times 50 \times 8 \text{ pixels}$



# 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  $E_\gamma$  spectrum**

**for  $m_3 = 50 \text{ meV}$**

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

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

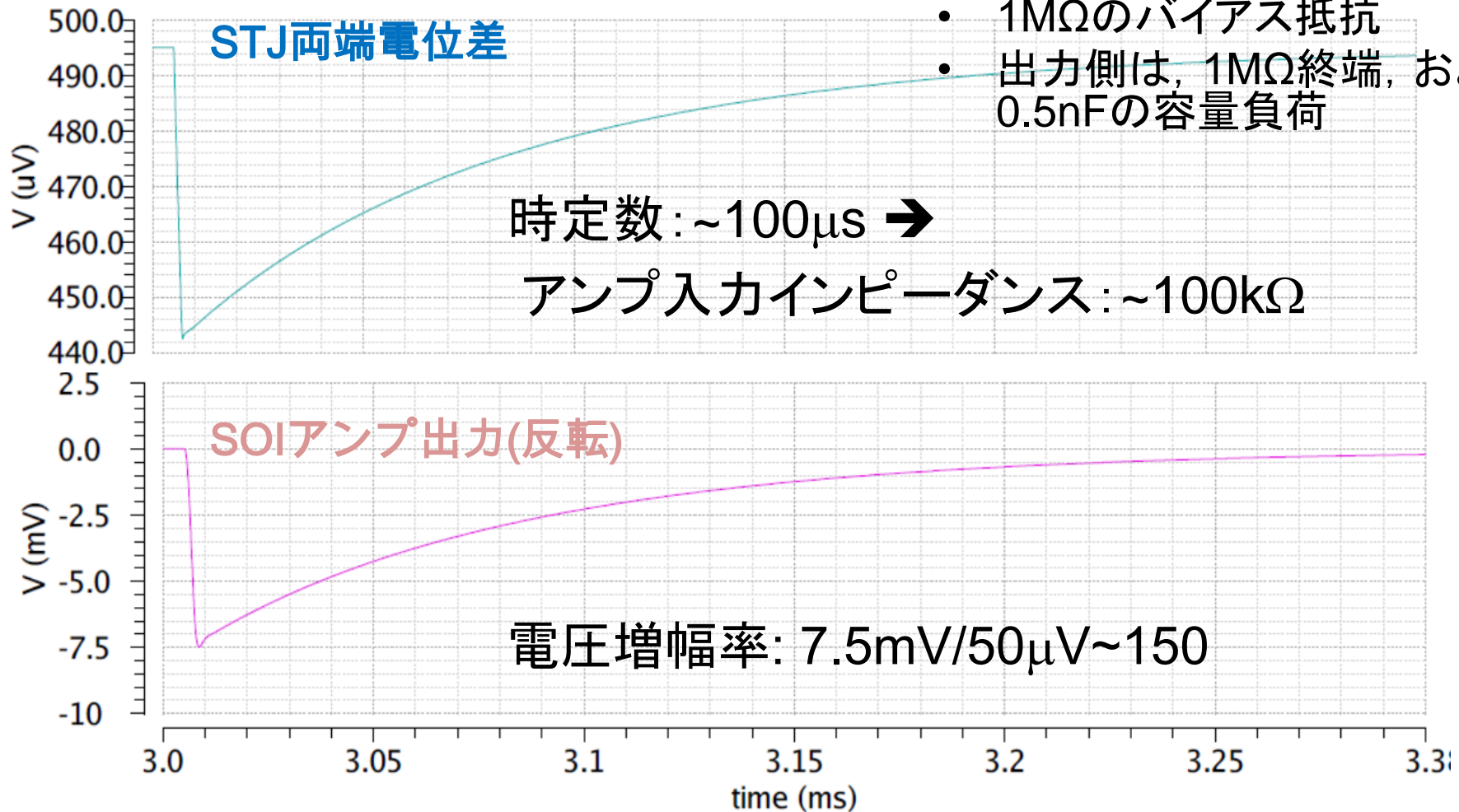
at  $\lambda = 50 \mu\text{m}$

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

# SOI-STJ4 光パルス応答シミュレーション

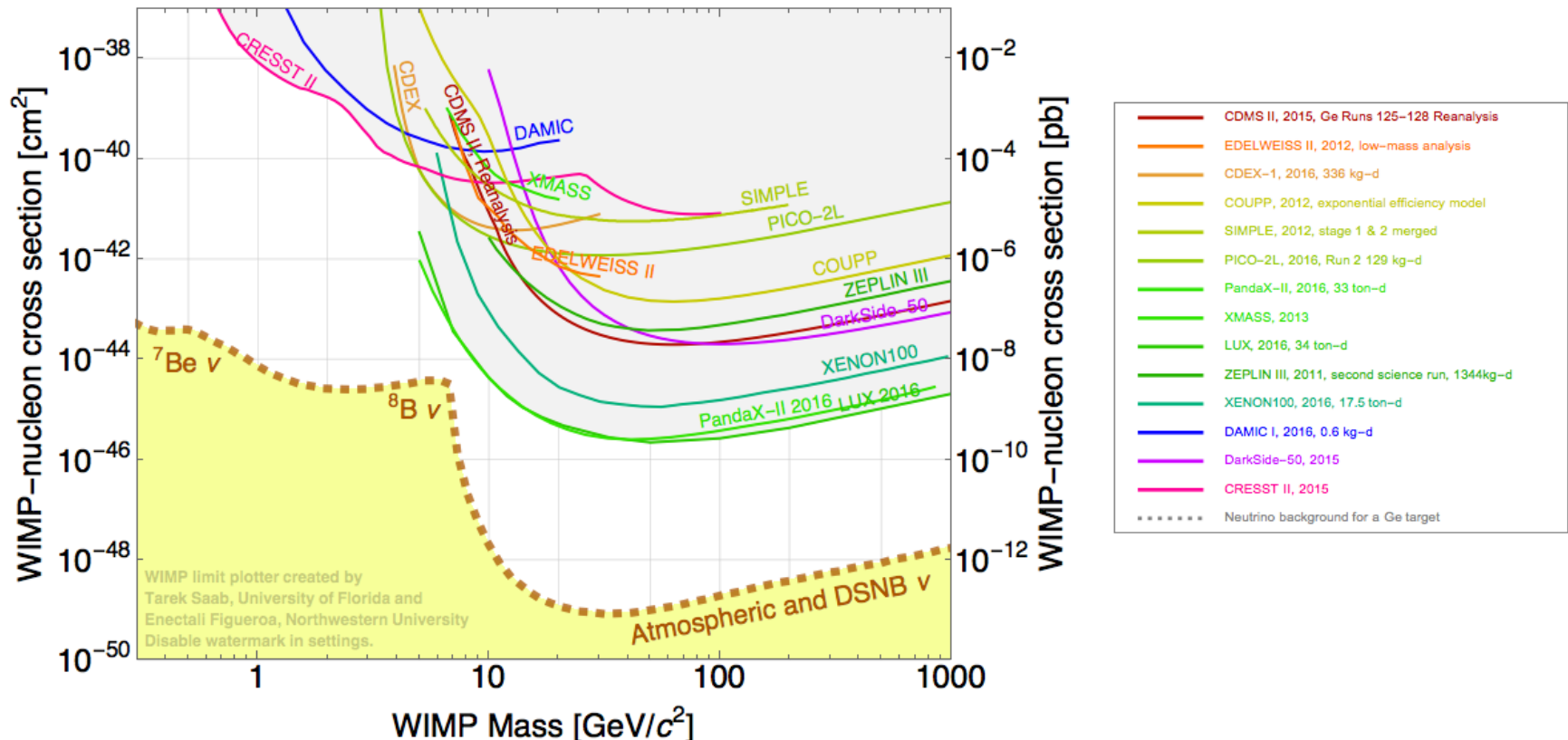
シミュレーション条件

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



# Light Dark Matter

- Search for DM lighter than 2GeV



[http://cdms.berkeley.edu/limitplots/mm/WIMP\\_limit\\_plotter.html](http://cdms.berkeley.edu/limitplots/mm/WIMP_limit_plotter.html)