

冷却エレクトロニクス STJ読み出し用SOI極低温アンプ

TIAかけはし事業「簡単・便利な超伝導計測」ミニ研究会

2017年1月4日

@物質・材料研究機構(NIMS)

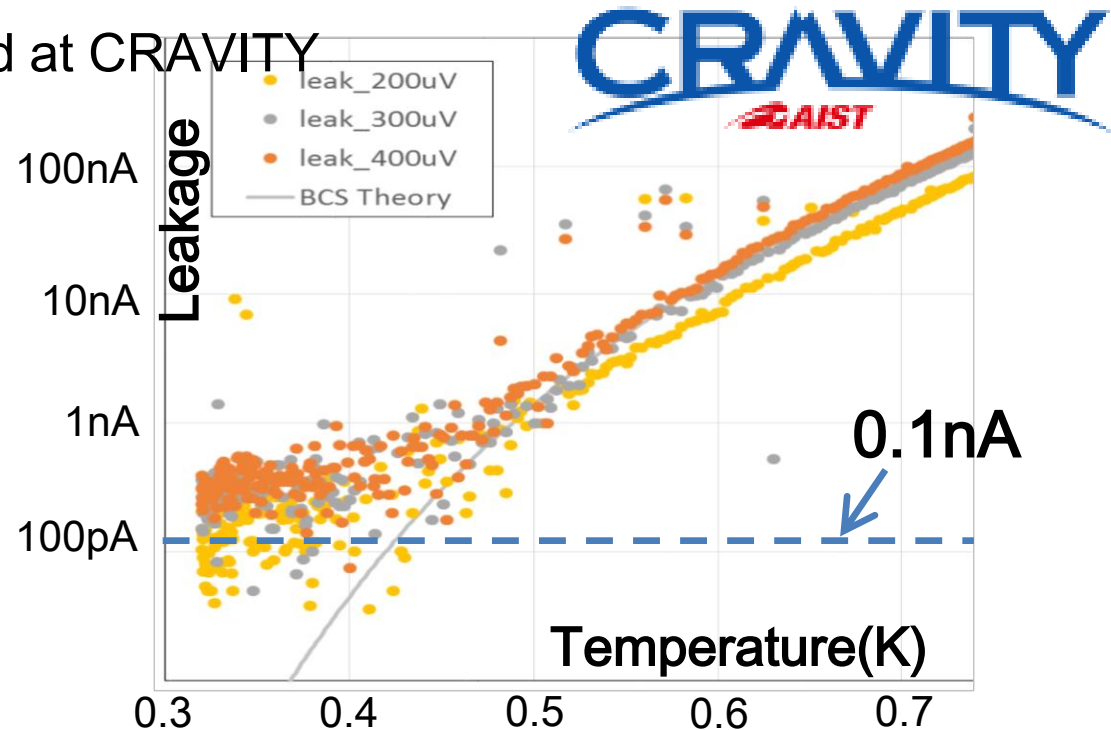
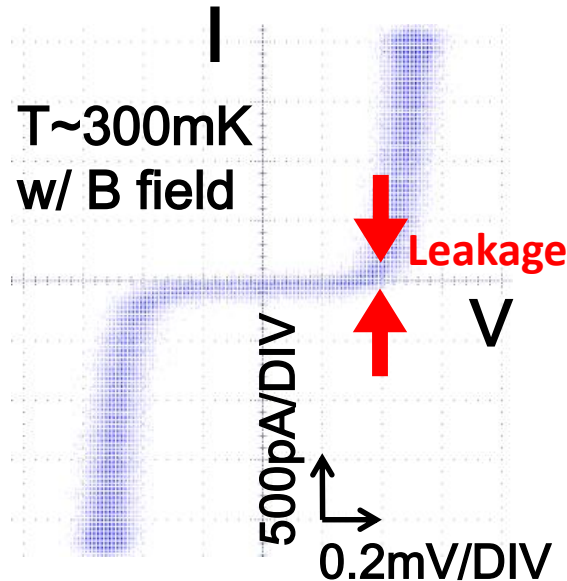
武内勇司 (筑波大)

on behalf of COBAND collaboration



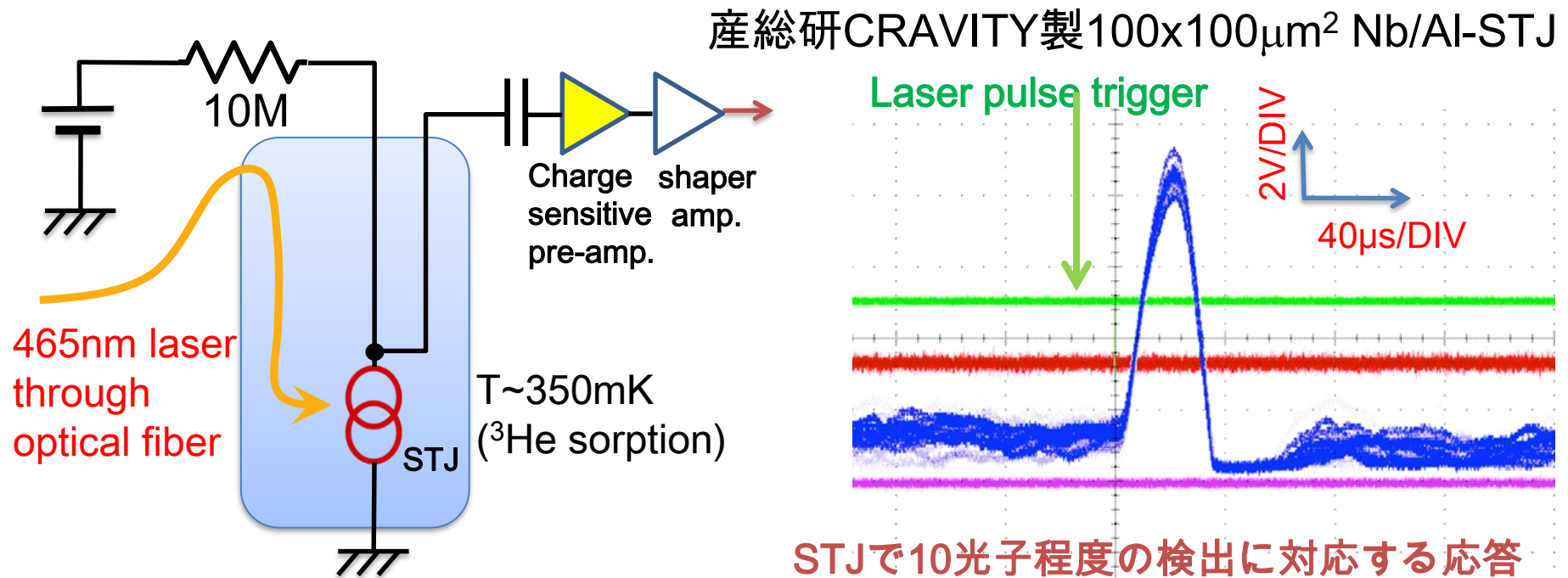
CRVAVITY製Nb/Al-STJ

50 μ m sq. Nb/Al-STJ fabricated at CRAVITY



- $I_{leak} \sim 200$ pA for 50 μ m sq. STJ, and achieved 50 pA for 20 μ m sq.
- $\Delta = 0.6$ meV, Al層でのバックトンネルゲインを10とすると 25 meV光子に対する信号は, $N_{q.p.} = 25 \text{ meV} / 1.7 \Delta \times 10 \sim 250$
- 50 pA のリーク電流をSTJ信号幅($\sim 1 \mu$ s)で積分: $50 \text{ pA} \times 1 \mu\text{s} \sim 310 e$
- 素子そのものは, 25 meVの一光子検出も可能な性能

100x100 μm^2 Nb/Al-STJ response to 465nm pulsed laser



STJの信号を室温まで引っ張ってきて，電荷積分型アンプで読み出すと，可視光の一光子検出ですら大きな労力が必要．

冷凍機の中のSTJのすぐ近くで信号を増幅したい！

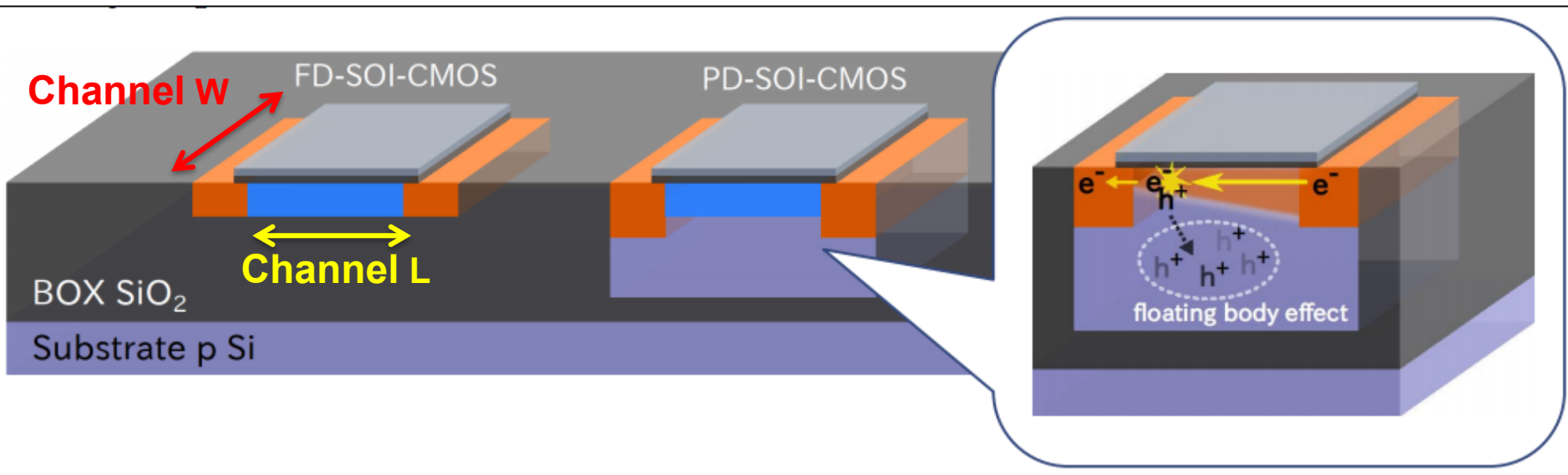
→ STJと同じ極低温で動作するアンプが必要

FD-SOI-MOSFET at Cryogenic temperature

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

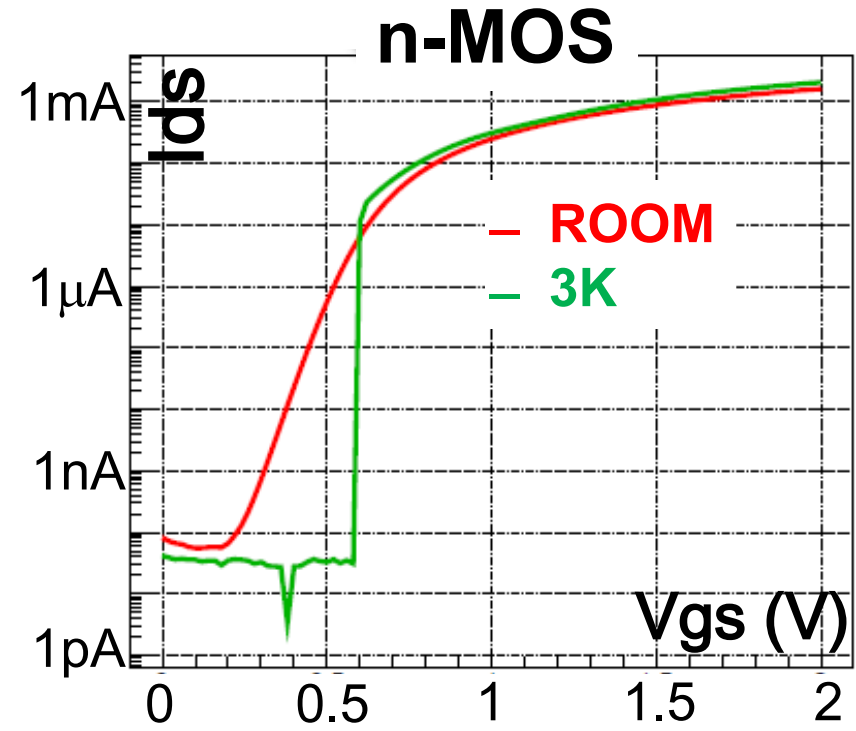
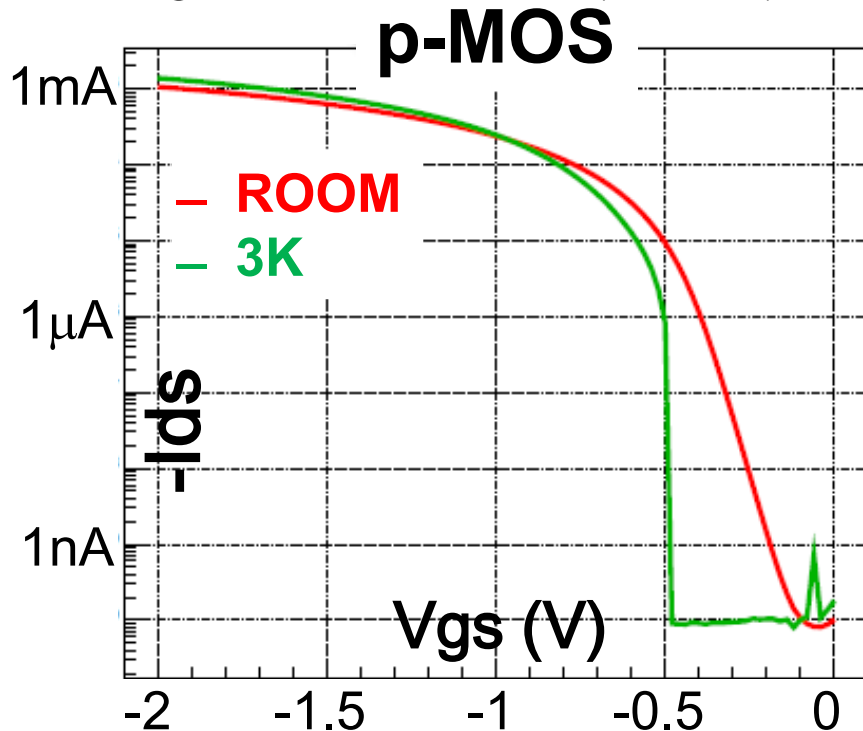
- ✓ Very thin channel layer in MOSFET
 - ◆ No floating body effect caused by charge accumulation in the body
- ✓ FD-SOI-MOSFET is reported to work at 4K

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



FD-SOI MOSFET I_d - V_g curve

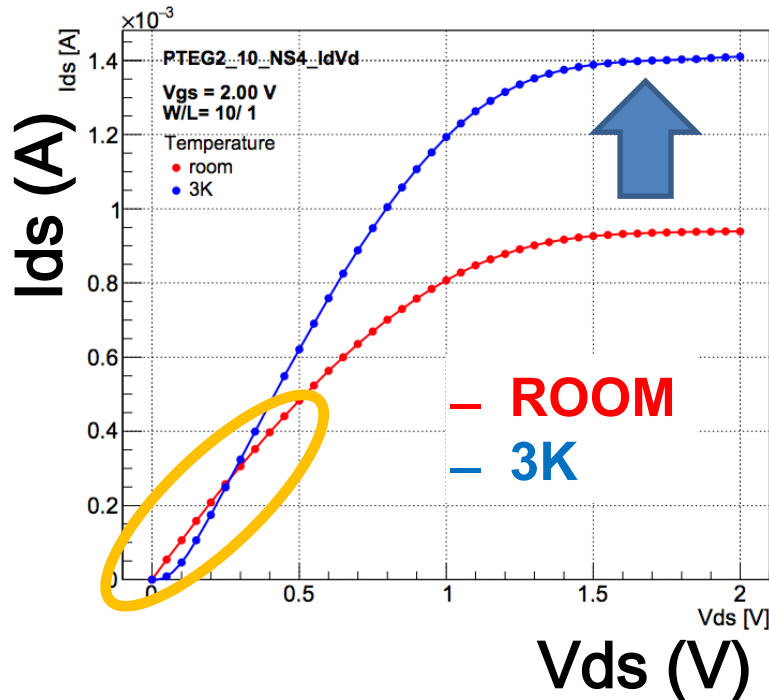
- Id- V_g curve of $W/L=10\mu\text{m}/0.4\mu\text{m}$ at $|V_{ds}|=1.8\text{V}$



- Both p-MOS and n-MOS show excellent performance at 3K (We confirmed they function down to 300mK).
- Threshold shifts, sub-threshold current suppression and increase of the carrier mobility at low temperature.

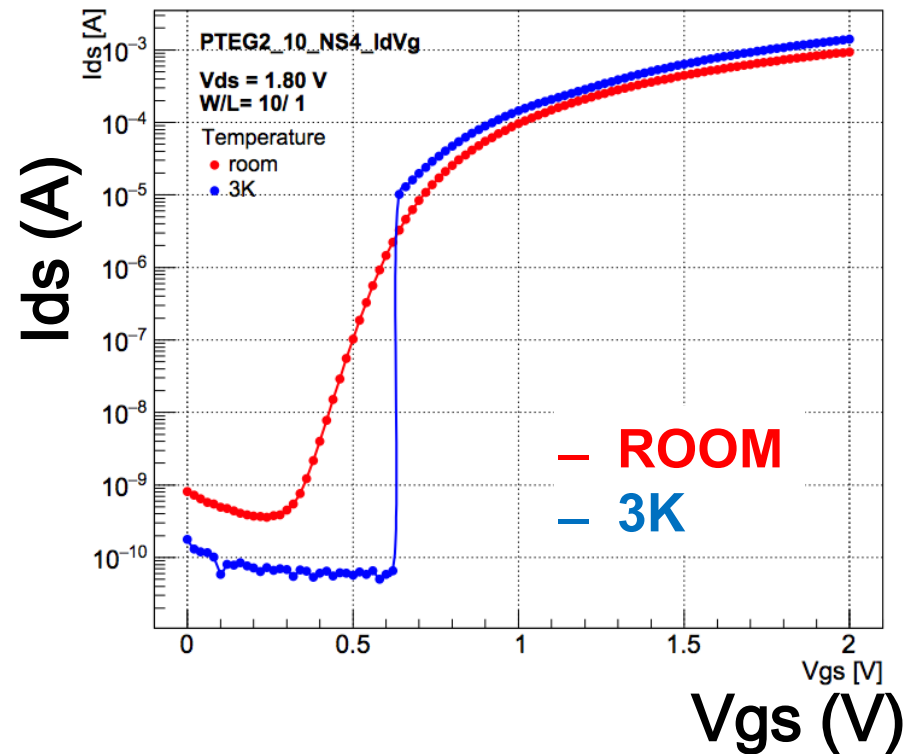
極低温でのFET特性変化

- 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

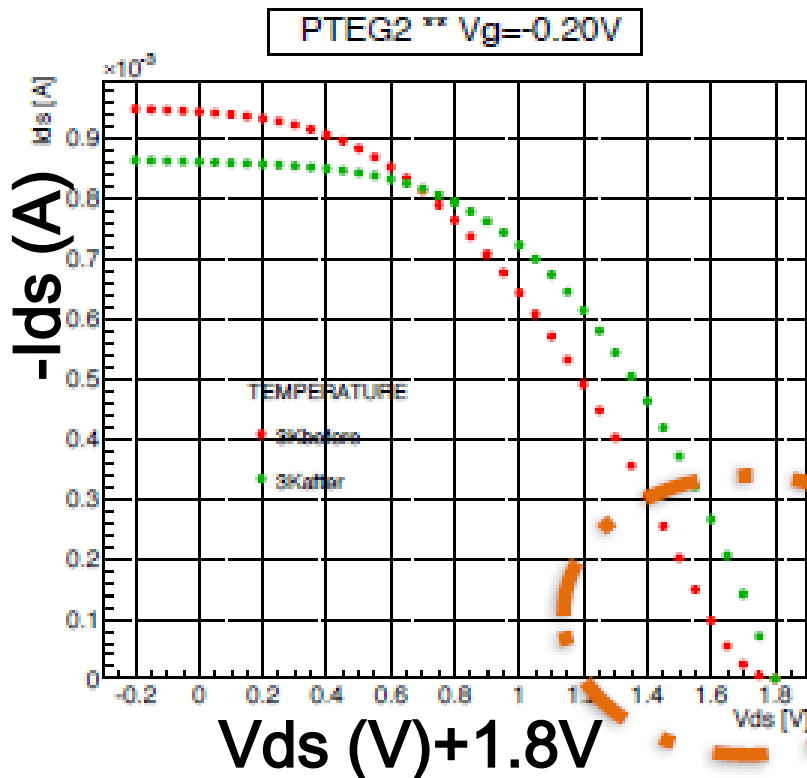


- 閾値電圧の移動
- サブスレッショルド電流の抑制

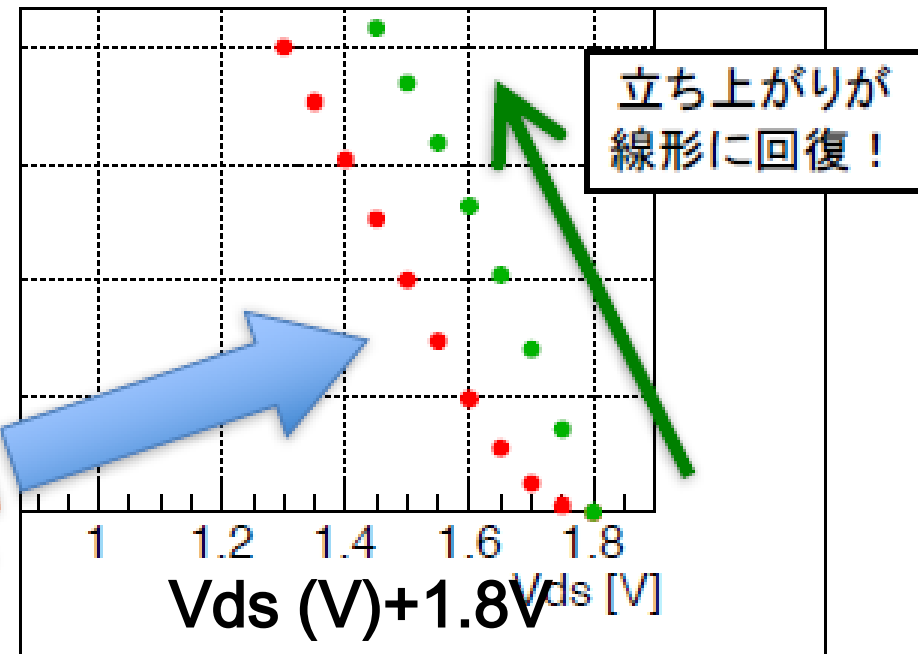
➔ 超低消費電力化が可能か？

LDD濃度変更後

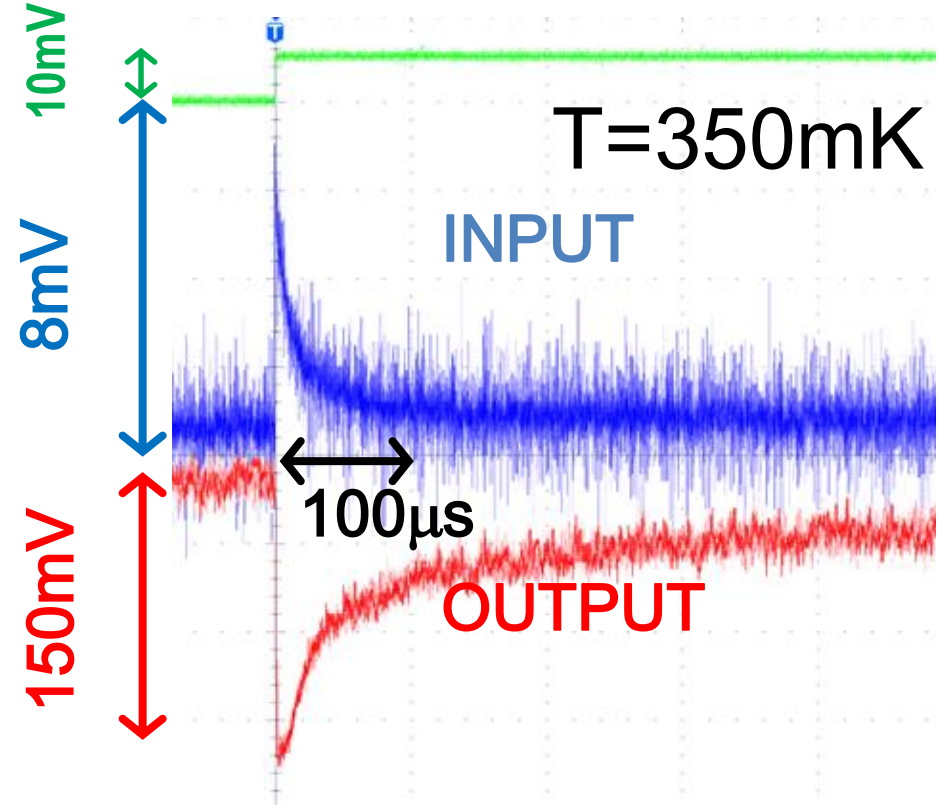
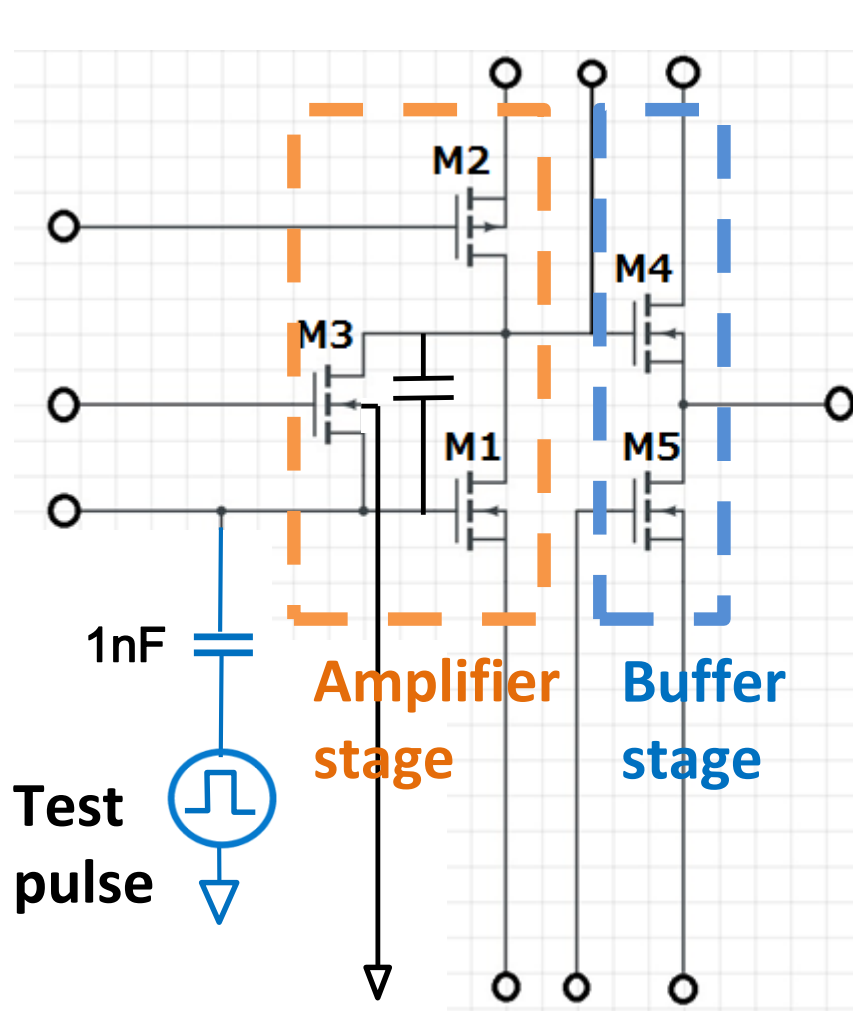
- LDD(Lightly doped drain)不純物濃度を増加することで、極低温においても I_d - V_d の立ち上がりが線形に回復
- p-ch ST2 W/L=10 μ m/1.0 μ m



- LDD不純物濃度が現行(@3K)
- LDD不純物濃度が改良(@3K)



SOI prototype amplifier

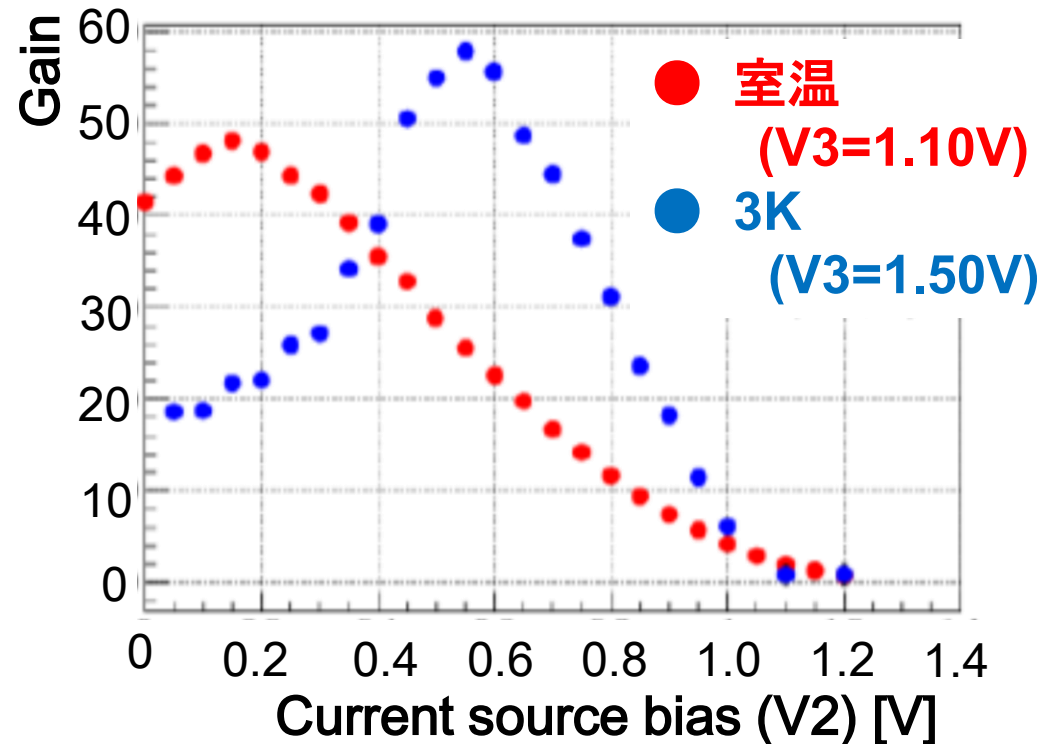
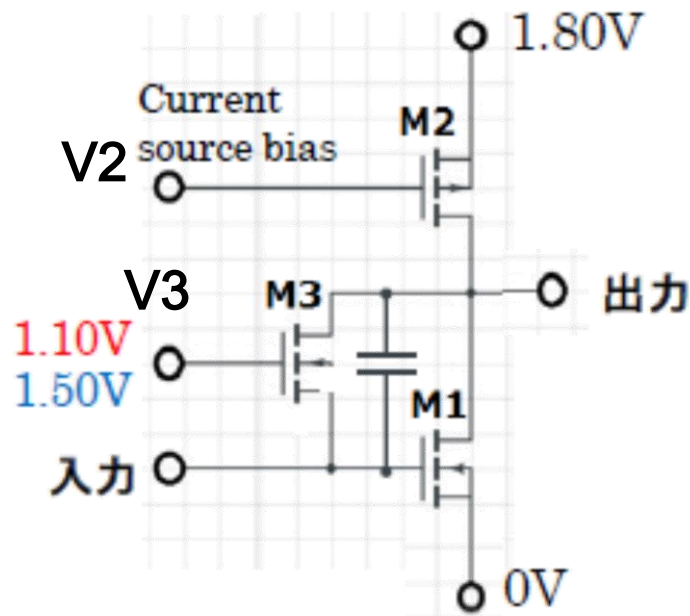


Test pulse input through $C=1\text{nF}$ capacitance at $T=3\text{K}$ and 350mK

- Power consumption $\sim 100\mu\text{W}$

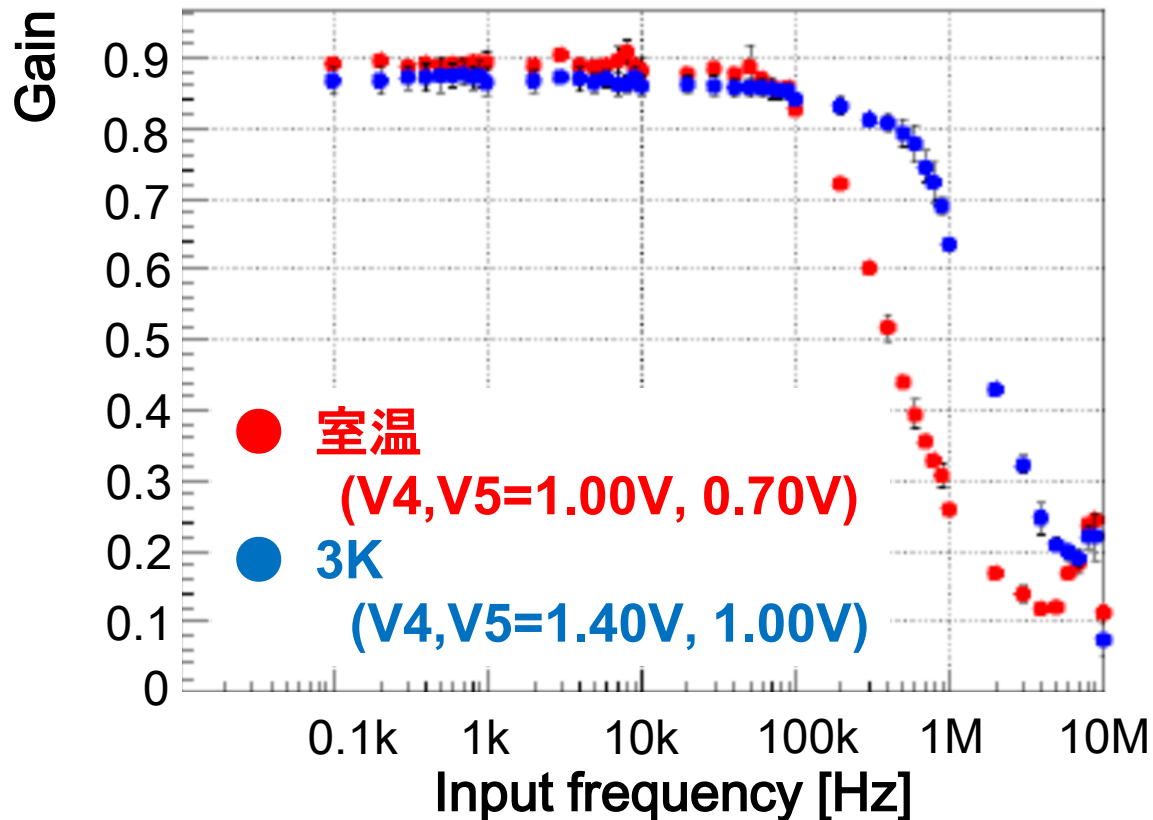
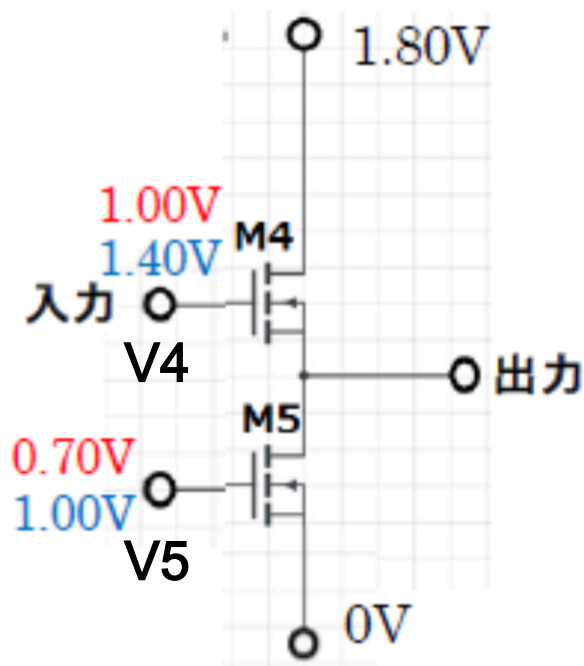
We can compensate the effect of shifts in the thresholds by adjusting bias voltages.

増幅段ゲイン



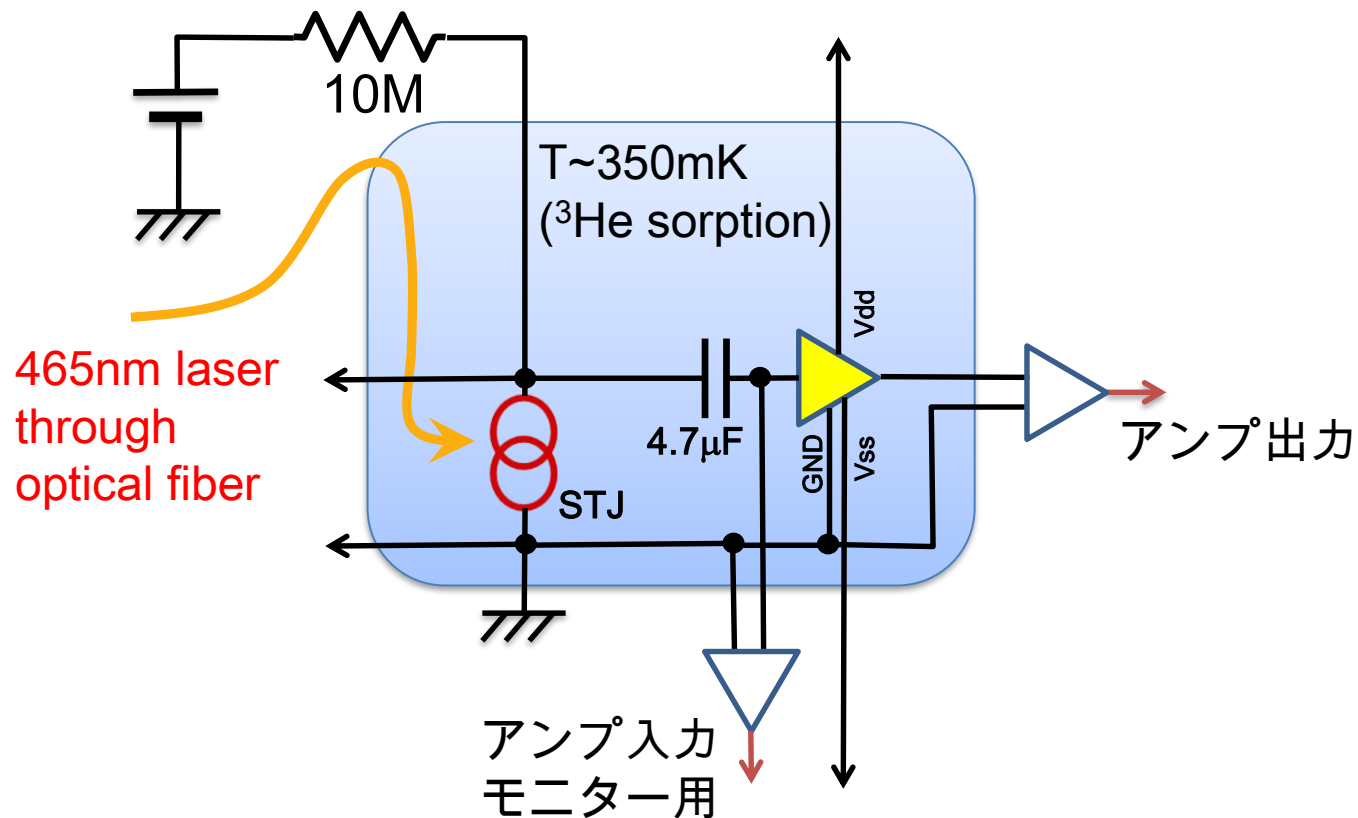
- 極低温時においてもバイアス電圧を調整することによってしきい値の変動を補償して、室温時と同じ増幅率を達成

バッファ一段出力周波数依存性



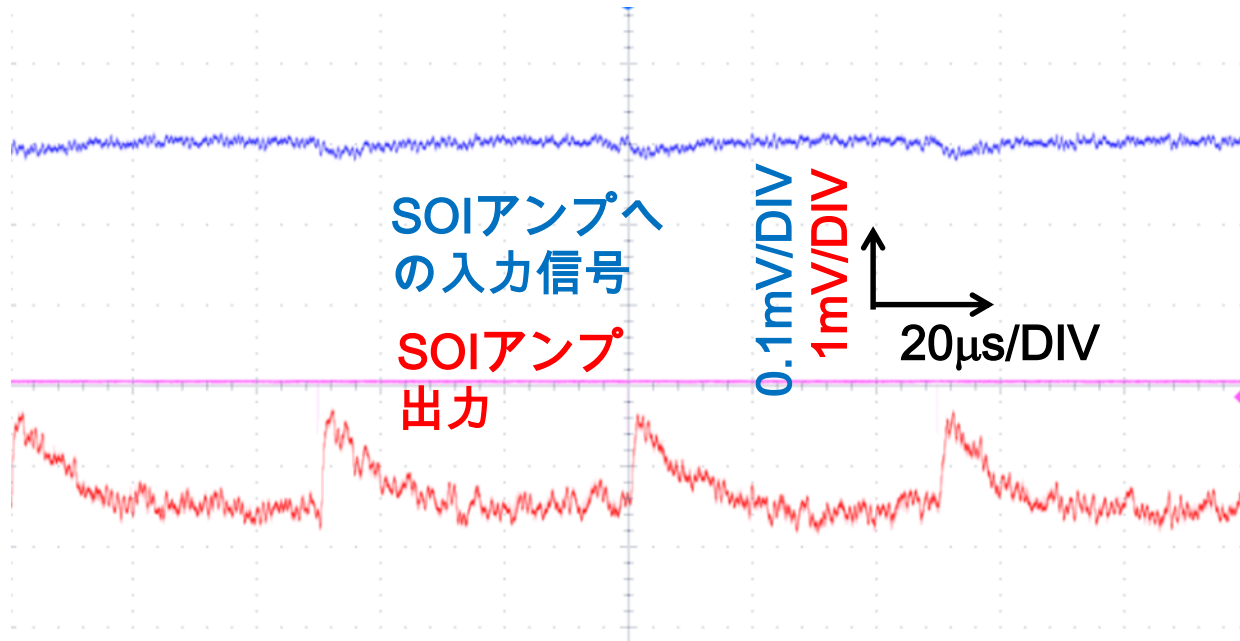
- 極低温時においてもバッファ一段に流す電流を増やすことによって冷凍機配線~0.5nFの容量負荷に対して 0.5MHz程度までの出力周波数帯域を確保

STJのパルス光応答のSOI増幅回路経由読み出し



- 20μm角 Nb/Al-STJのchipとSOI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のバイアス線の浮遊容量1nF程度: 1μsの信号に対して160Ω

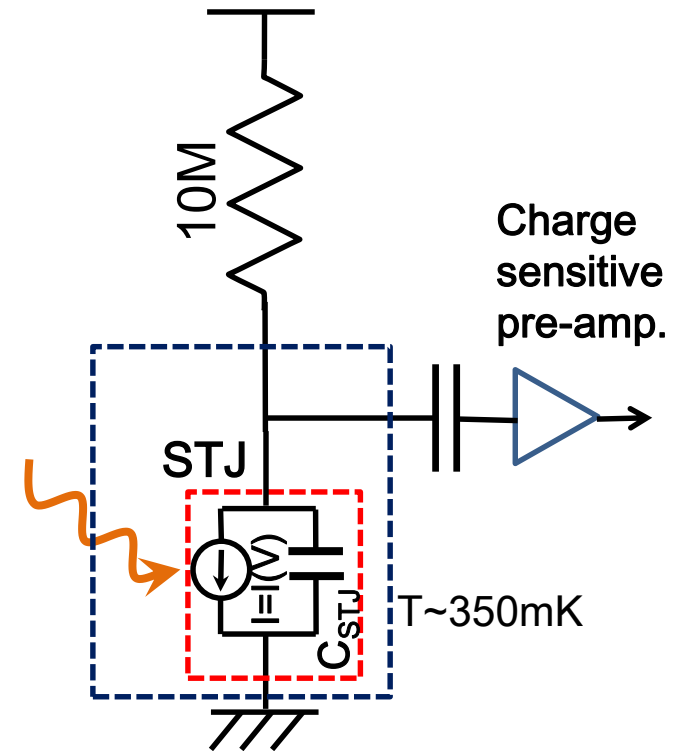
STJパルス光応答信号のSOI極低温アンプによる増幅



- 465nmパルス光レーザー照射($f=20\text{kHz}$)
- 512回アベレージ波形

SOI charge-sensitive pre-amplifier development

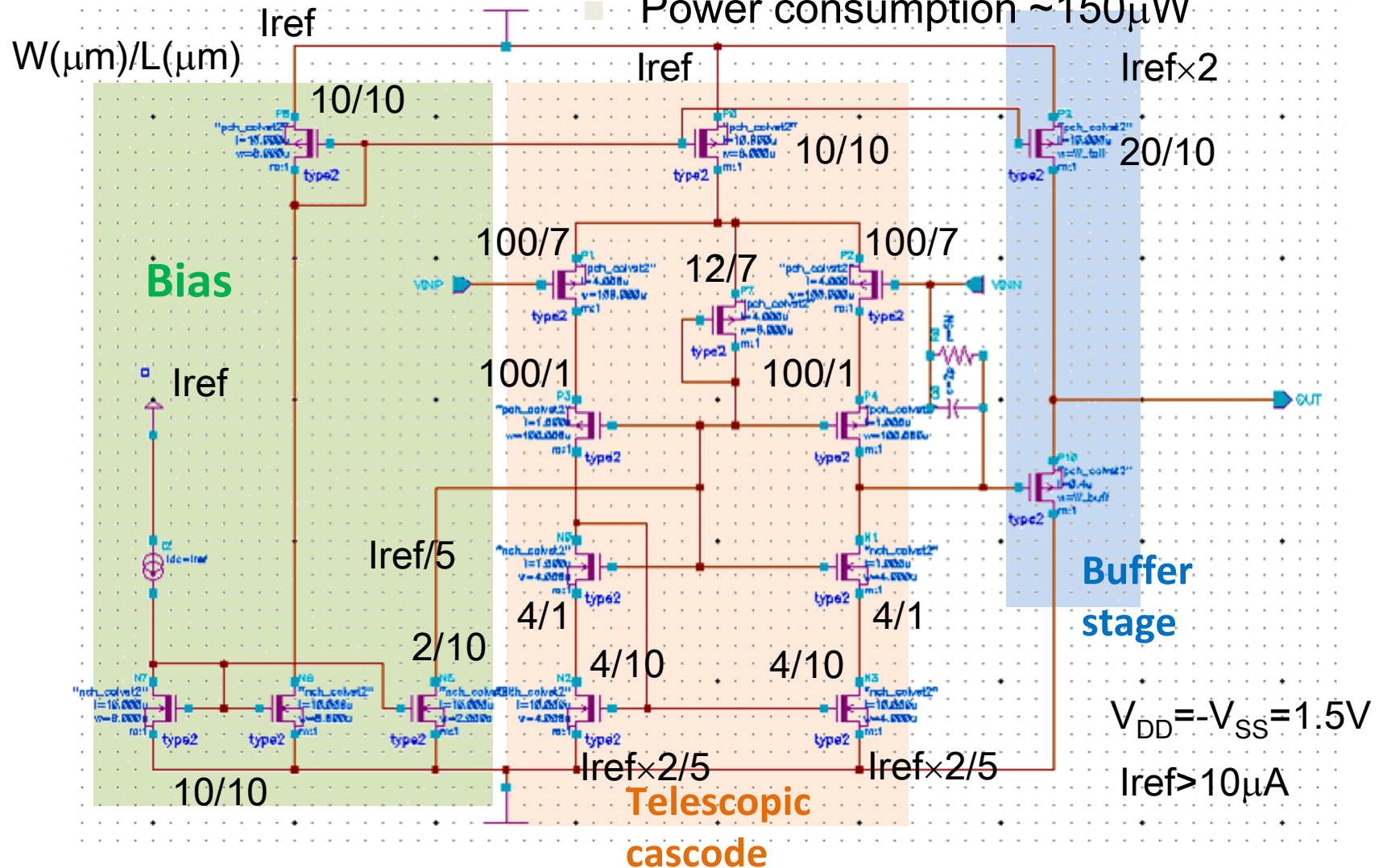
- STJは比較的大きな静電容量:
20 μm 角で $\sim 20\text{pF}$
 - ➔ 光子計数の利点を生かすためには、
低入力インピーダンスの電荷積分型
アンプが必要
- STJ応答時定数: $\sim 1\mu\text{s}$
 - ➔ 1MHz以上の帯域をもつSOIオペ
アンプを製作中



Op-amp Circuit for STJ design

Arriving in this winter!

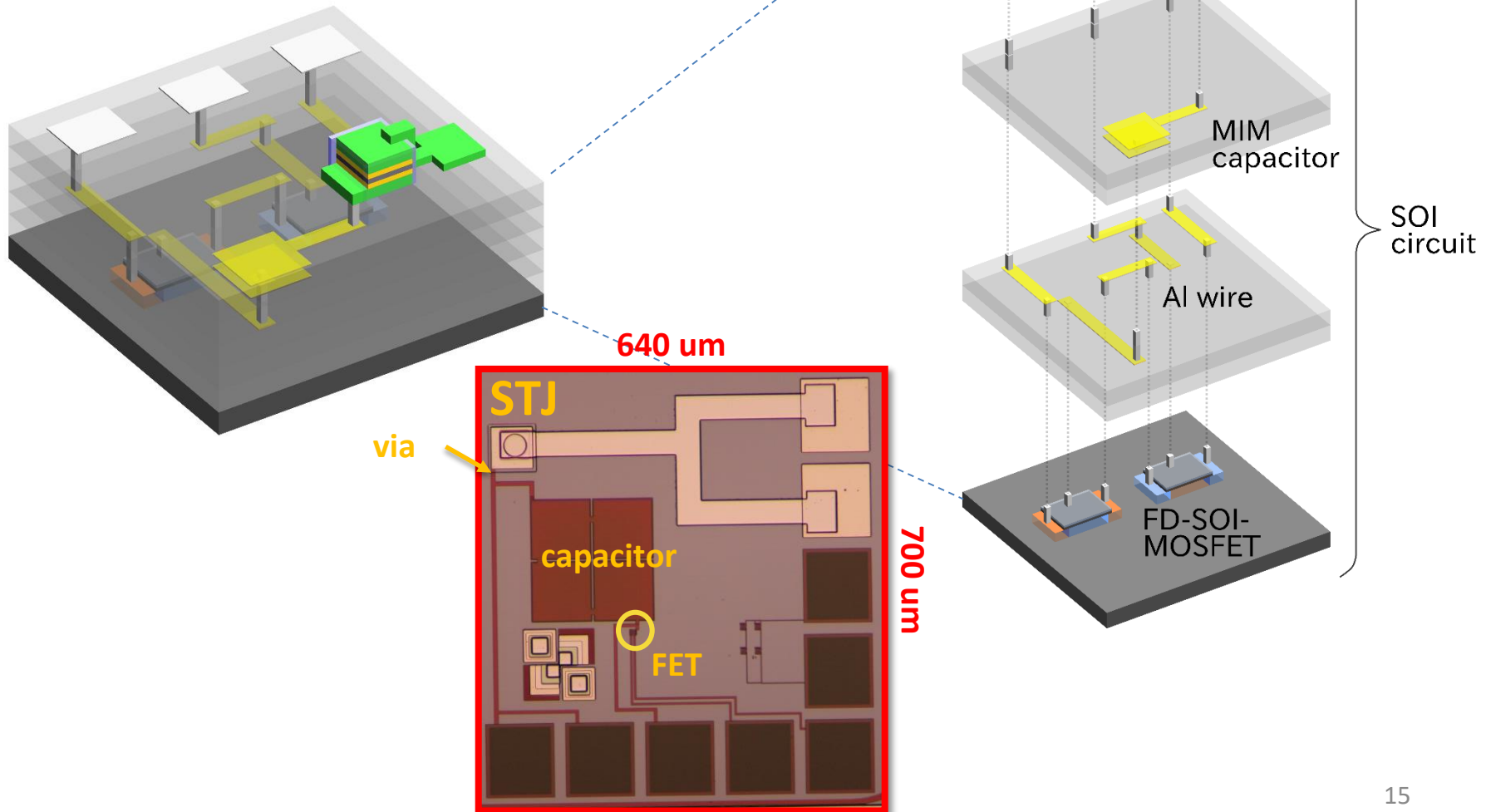
- telescopic cascode differential amplifier
- Feedback $C=2\text{pF} \times R=5\text{M}\Omega = 10\mu\text{s}$
- Power consumption $\sim 150\mu\text{W}$



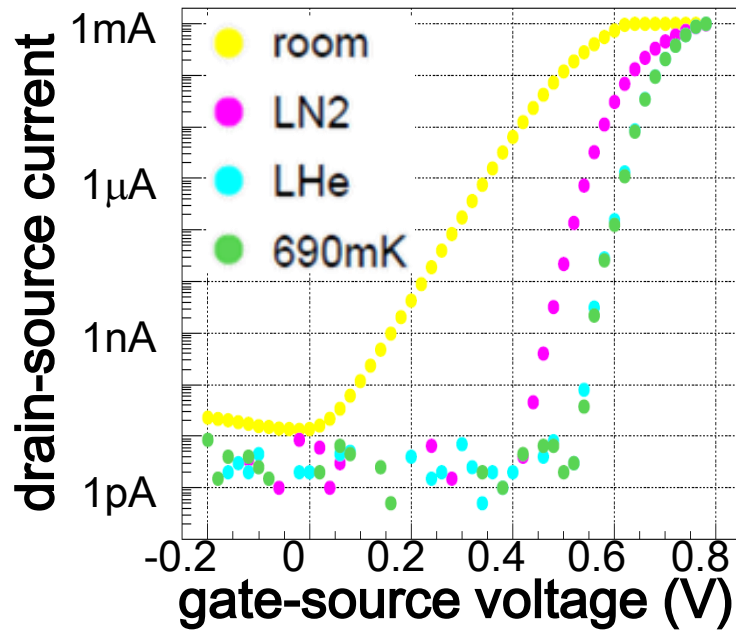
SOI増幅回路一体型STJ検出器(SOI-STJ)

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

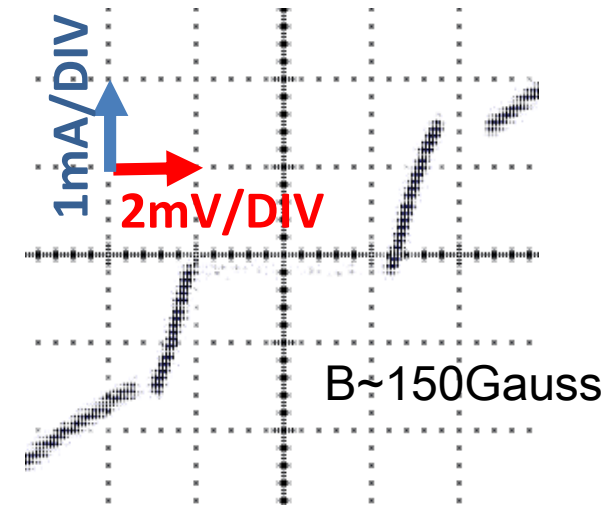
□ STJアレイ化(STJ大面積化)の可能性



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

まとめ

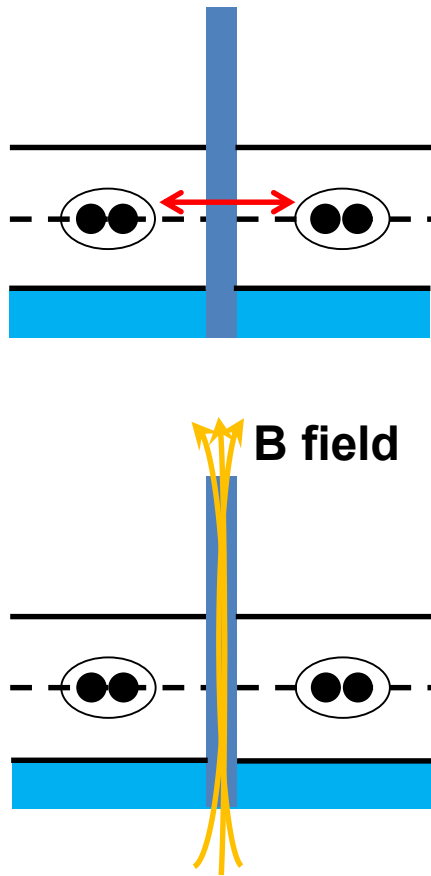
- COBAND(宇宙背景ニュートリノ崩壊探索)ロケット実験のための遠赤外光検出器($\lambda=50\mu\text{m}$)を開発中
- 超伝導トンネル接合素子(STJ) + SOI 読み出し回路
- SOIに技術を用いた極低温アンプによる読み出し回路を開発中
 - SOIアンプの極低温での動作を確認．**実際のSTJの光パルス信号のSOIアンプでの増幅信号読み出しに成功**．ノイズ評価に向けた測定を準備中
 - 光子計数の利点を最大限に生かす低インプットインピーダンス高速アンプ(帯域 $>1\text{MHz}$)を製作中
 - SOI アンプー一体型STJの可能性

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．

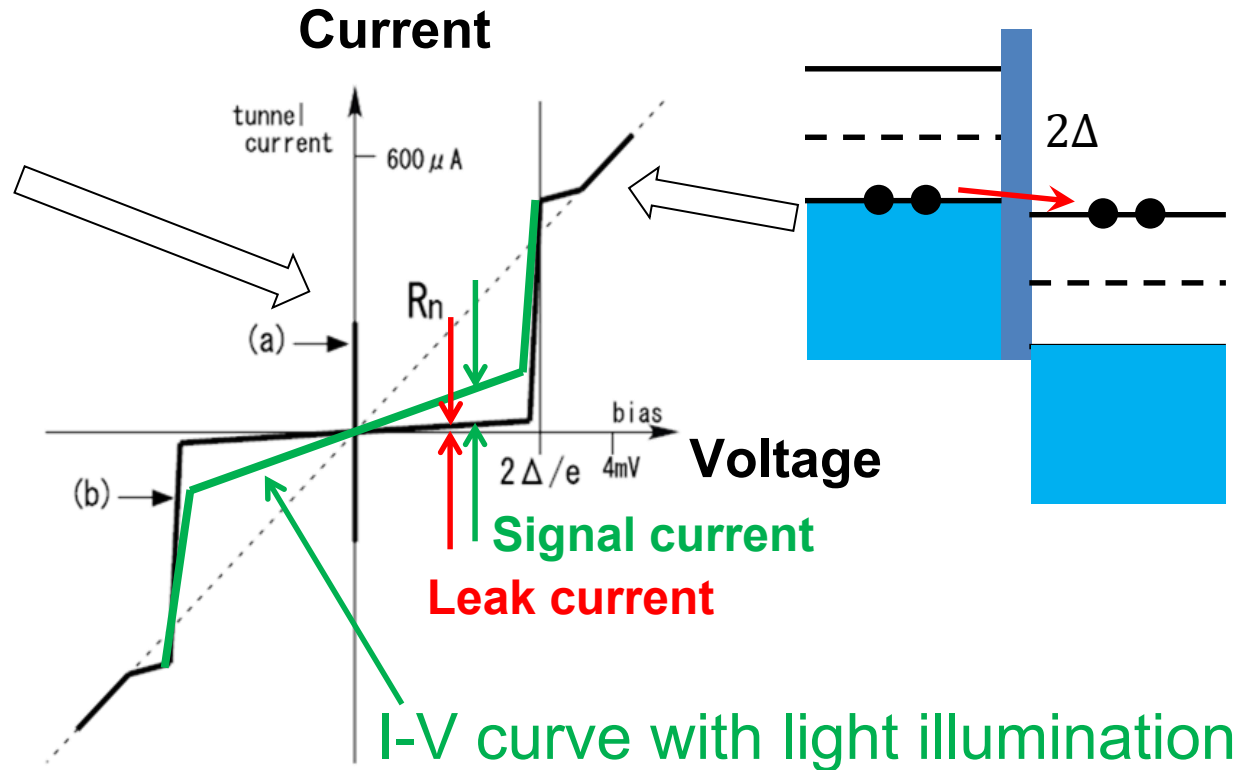
* VLSI Design and Education Center(VDEC), the U. Tokyo in collaboration with Synopsys, Inc., Cadence Design Systems, Inc., and Mentor Graphics, Inc.

backup

STJ current-voltage curve



Tunnel current of Cooper pairs (Josephson current) is suppressed by applying magnetic field



Optical signal readout

- ➔ Apply a constant bias voltage ($|V| < 2\Delta$) across the junction and collect tunneling current of quasi particles created by photons
- ✓ Leak current causes background noise