

COBAND実験のための SOI-STJの研究開発VIII

笠島誠嘉, 金信弘, 武内勇司, 飯田崇史, 武政健一, 永田和樹, 浅野千紗, 若狭玲那,
菅野洋信, 笠原宏太, 八木俊輔, 美馬寛^A, 新井康夫^B, 倉知郁生^B, 羽澄昌史^B, 石野
宏和^C, 樹林淳子^C, 吉田拓生^D, 西村航^D, 坂井誠^D, 加藤幸弘^E, 松浦周二^F, 川人祥二^G,
池田博一^H, 和田武彦^H, 長瀬晃一^H, 馬場俊祐^H, 志岐成友^I, 浮辺雅宏^I, 藤井剛^I, 大
久保雅隆^I, Erik Ramberg^J, Dmitri Sergatskov^J, Paul Rubinov^J, Soo-Bong Kim^K,
木内健司^L

筑波大, 理研^A, KEK^B, 岡山大^C, 福井大^D, 近畿大^E, JAXA^F, 関西学院大^G, 静岡大^H,
AIST^I, Fermilab^J, Seoul Nat'l. Univ.^K, 東大^L



目次

- COBAND実験について
- SOI-STJ6について
- SOI-STJ5*のノイズ評価
- SOI-STJ5*によるNb/Al-STJの可視光信号応答の増幅
- まとめ



COBAND実験(Cosmic Background Neutrino Decay)

- いまだ分かってないニュートリノの絶対質量を決定する

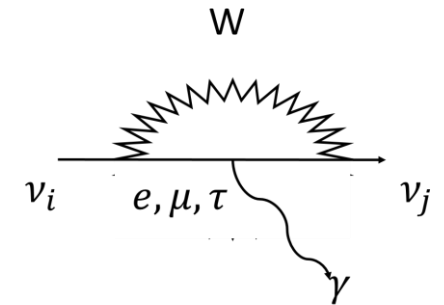
- ニュートリノの崩壊光のエネルギーと質量

$$m_i = \frac{|m_i^2 - m_j^2|}{2E_\gamma}$$

- 予想されるニュートリノの崩壊光のエネルギー(25 milli-eV)は小さいため、エネルギーギャップの小さい超伝導体を利用したSTJ検出器を使用する

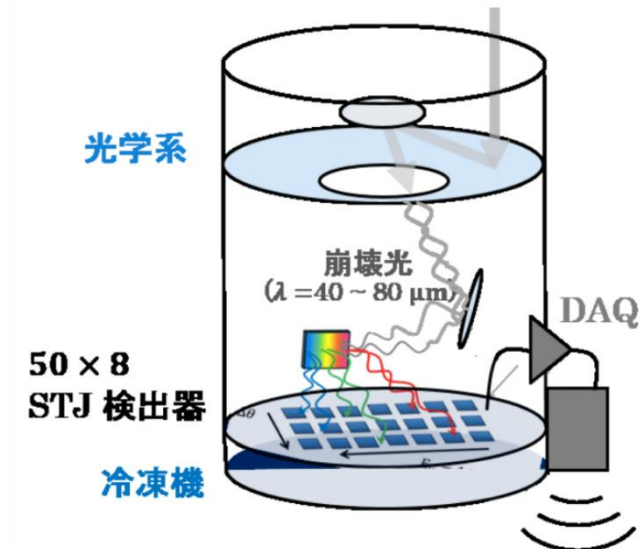
- ニュートリノは長寿命(1.5×10^{17} 年:Left-Right Symmetric Model)なため宇宙に大量に存在するとされる宇宙背景ニュートリノを対象とする

- ロケット実験を予定している
- 崩壊光を回折格子で分光し、STJ(Superconducting Tunnel Junction) arrayでエネルギースペクトルをエネルギー分解能2%で計測する
- ニュートリノの寿命の感度 $O(10^{14}$ 年)で崩壊を探索する
 - ✓ 見つからない場合は寿命下限を現在の $O(10^{12}$ 年)から $O(10^{14}$ 年)まで二桁引き上げる



ニュートリノ崩壊のファインマン図

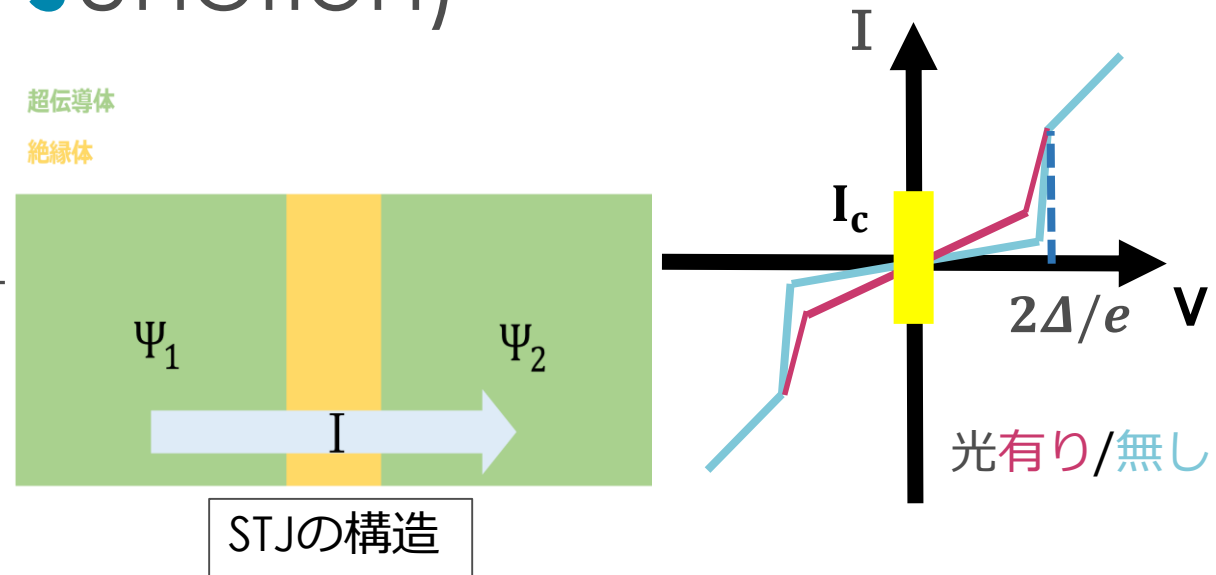
高度200km, 約5分の観測



STJ(Superconducting Tunnel Junction)

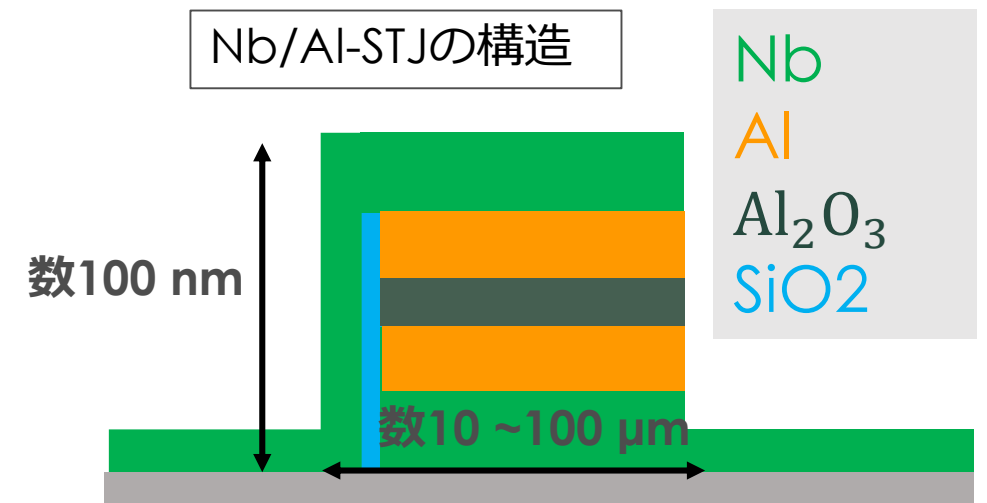
● 構造と動作原理

- 超伝導体/絶縁体/超伝導体のジョセフソン接合
- STJに入射した光子がクーパー対を破壊し準粒子を生成させる。準粒子は絶縁膜をトンネルしその電流を観測する。
- 一端に電圧を印加することで準粒子が一方通行になるようにする



● Nb/Al-STJと要求

- バンドギャップが小さくエネルギー分解能に優れる
- リーク電流が100 pA以下
 - ✓ 達成(39 ± 13 pA @20 μ m角)
- 1光子検出が可能



極低温増幅器と要求

● 問題点

- Nb/Al-STJにより崩壊光の1光子検出への要求は満たしているが、いまだ出来ていない
 - ✓ 熱アンカーのための長い配線による寄生容量、熱ノイズなどが増幅器に信号が達するまでにのってしまう
 - ✓ これを防ぐためSTJの直後で信号を増幅する必要がある

● 極低温増幅器への要求

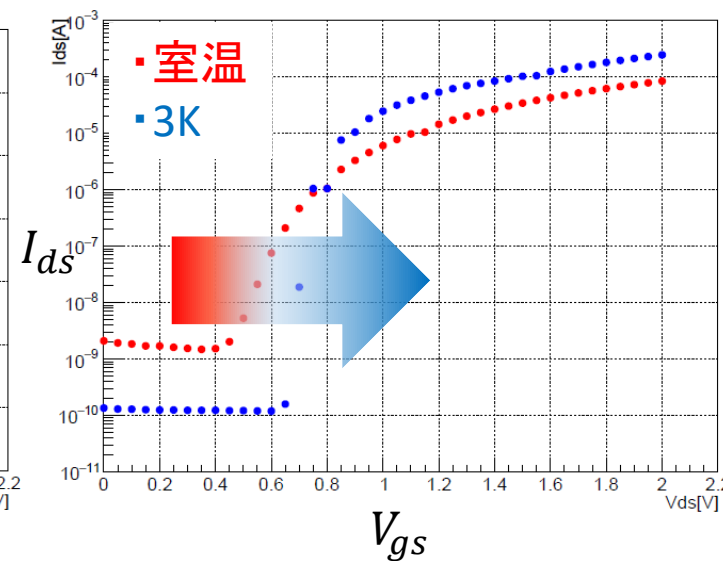
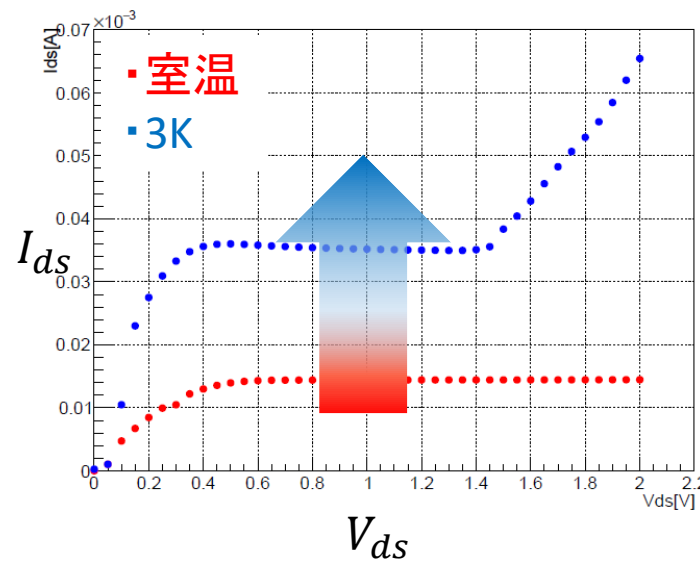
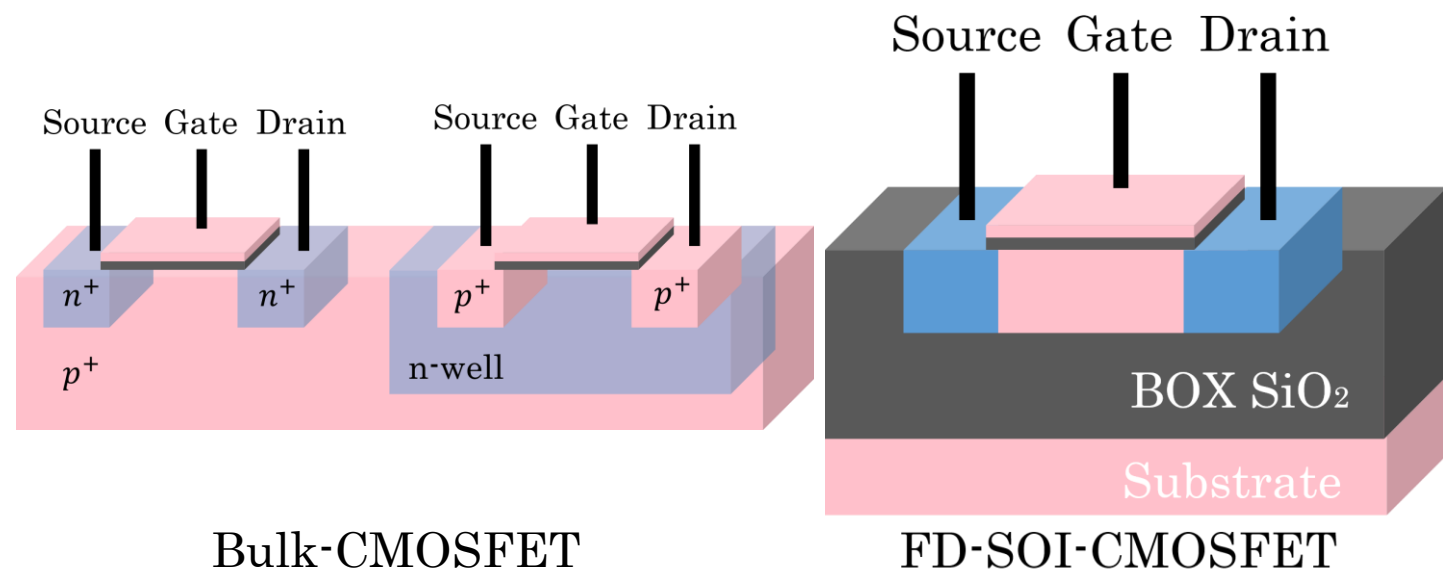
- 3K以下で動作する
- STJ検出器の信号(<10 μ s)を増幅できる
- 冷凍機の配線容量負荷(数100 pF)の下でも増幅できる
- 低消費電力
- ノイズが小さい(ノイズ等価電力 $\sim 1 \times 10^{-19}$ W/ $\sqrt{\text{Hz}}$)

各温度での冷凍機の冷却能力

	3 K	300 mK
冷却能力	250 mW	150 μ W

FD-SOI-CMOSFET

- Bulk-CMOSでプロセスされたMOSFETは低温では動作しない
- Fully Depleted-Silicon On Insulator-CMOSFET
 - ✓ SiO_2 上にMOSFETを形成したもの
 - ✓ ボディ部分が薄い(~50 nm)
 - ✓ 寄生容量が小さく, 低消費電力
 - ✓ 浮遊帯効果が起きない
 - ✓ 低温でも動作する



FD-SOI-MOSFETの電流電圧特性

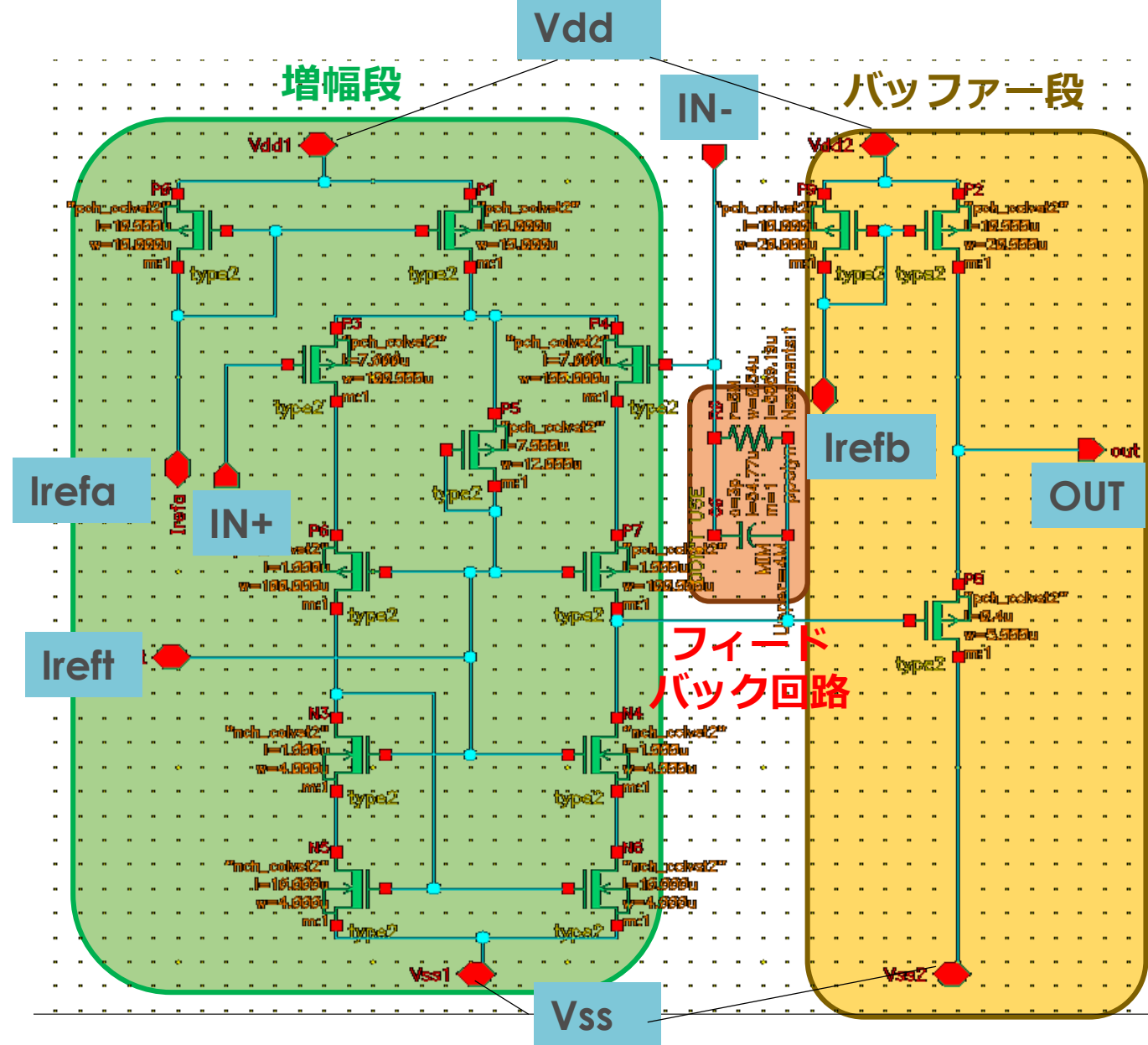
SOI-STJ5

- 帰還付き差動増幅回路による電荷積分型回路
- 低入力インピーダンス
 - STJの容量を通してGNDに逃げることなく、ほぼ全ての信号電荷を増幅器に伝えられる
- フォロワー回路(低出力インピーダンス)により出力周波数帯域の向上
- 各印加バイアスは

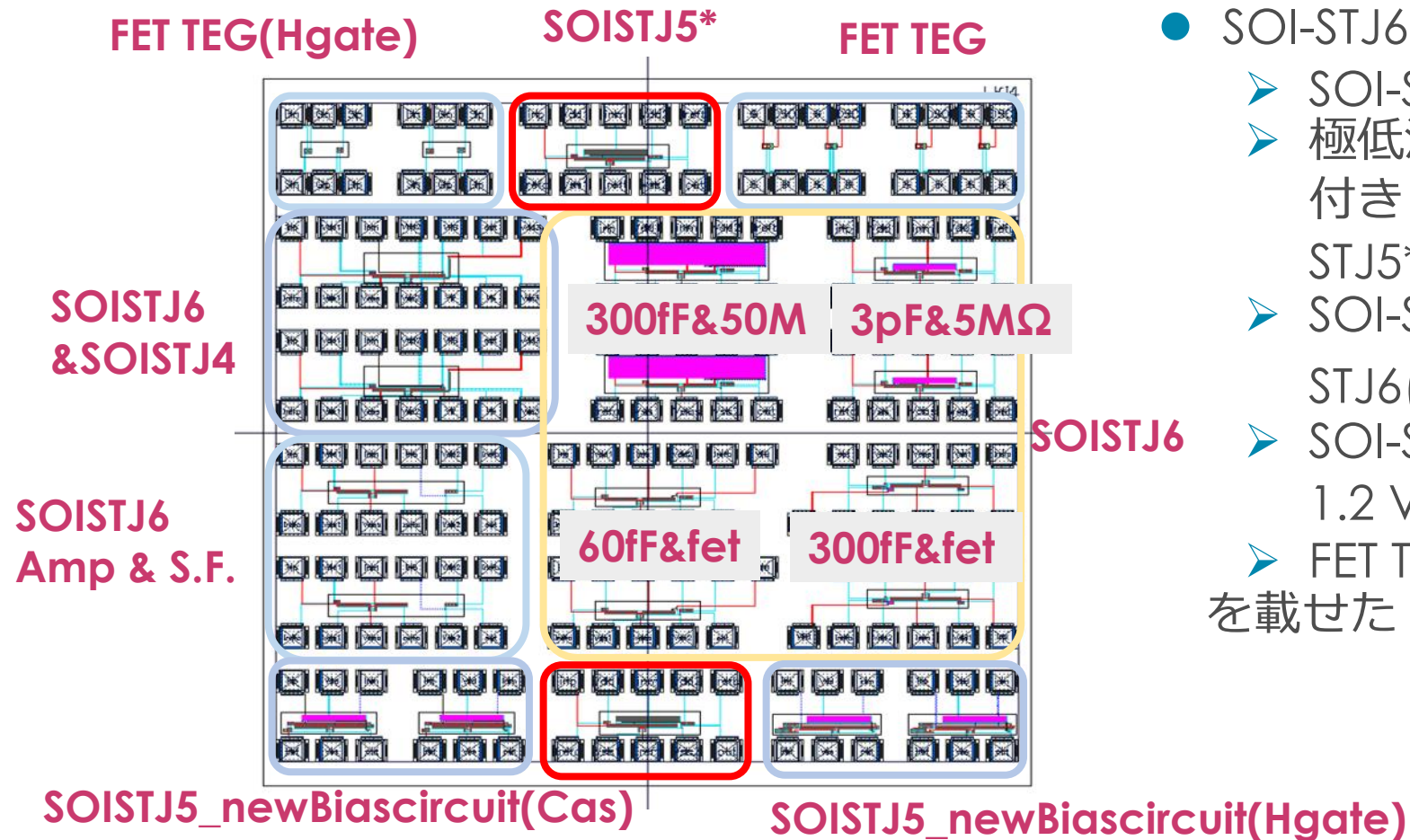
Vdd=1.5 V
Vss=-1.5 V
Irefa=-10 μ A
Irefb=-20 μ A
Ileft=-2 μ A

Idd=60 μ A
Iss=-28 μ A

- 消費電力は180 μ W
(冷却能力 280 mW @3 K)



SOI-STJ6



● SOI-STJ6では

- SOI-STJ5*(gain : 0.3 mV/fC)
- 極低温でも動作が期待されるカレントミラー付き(カスコード接続、H-gate FET) SOI-STJ5*
- SOI-STJ5*より高いgainを持つSOI-STJ6(gain : 3 mV/fC, 15 mV/fC)
- SOI-STJ6とSOI-STJ4を一体化した物(gain : 1.2 V/fC)
- FET TEG(H-gate, FD-SOI)を載せた

SOI-STJ5*(変更点)

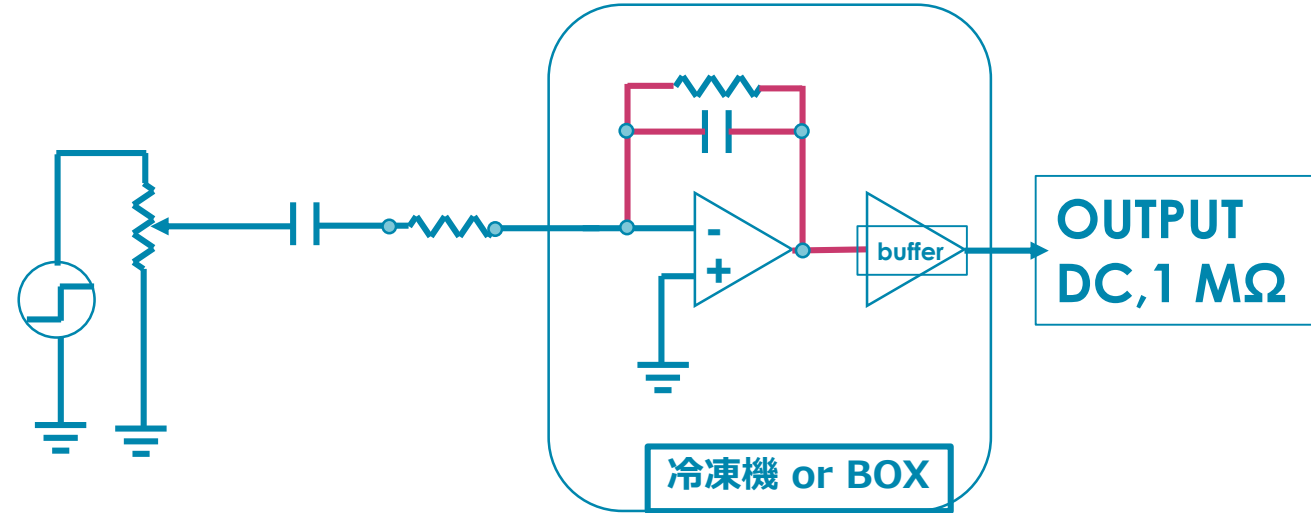
● SOI-STJ5(変更前)

- SOI-STJ5ではボンディングで増幅段、バッファード、フィードバック回路の抵抗とコンデンサを繋げていた
- そのため余計な容量が乗り出力波形が乱れ、gainも落ちていた



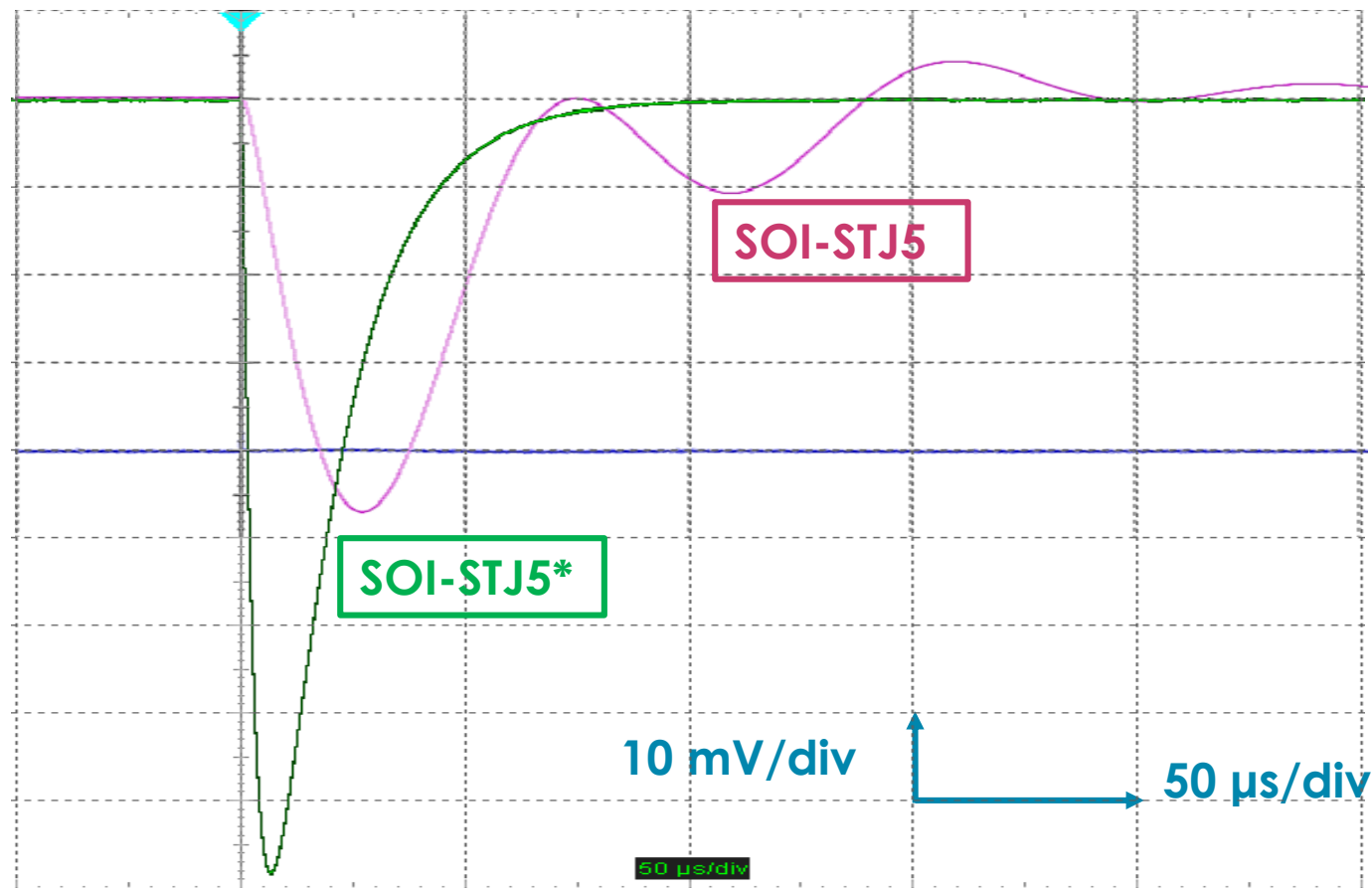
● SOI-STJ5*(変更後)

- ボンディングで繋いでいた場所を全てチップ上に最初からレイアウトした



図の赤い場所がSOI-STJ5でアルミワイヤで繋げていた場所

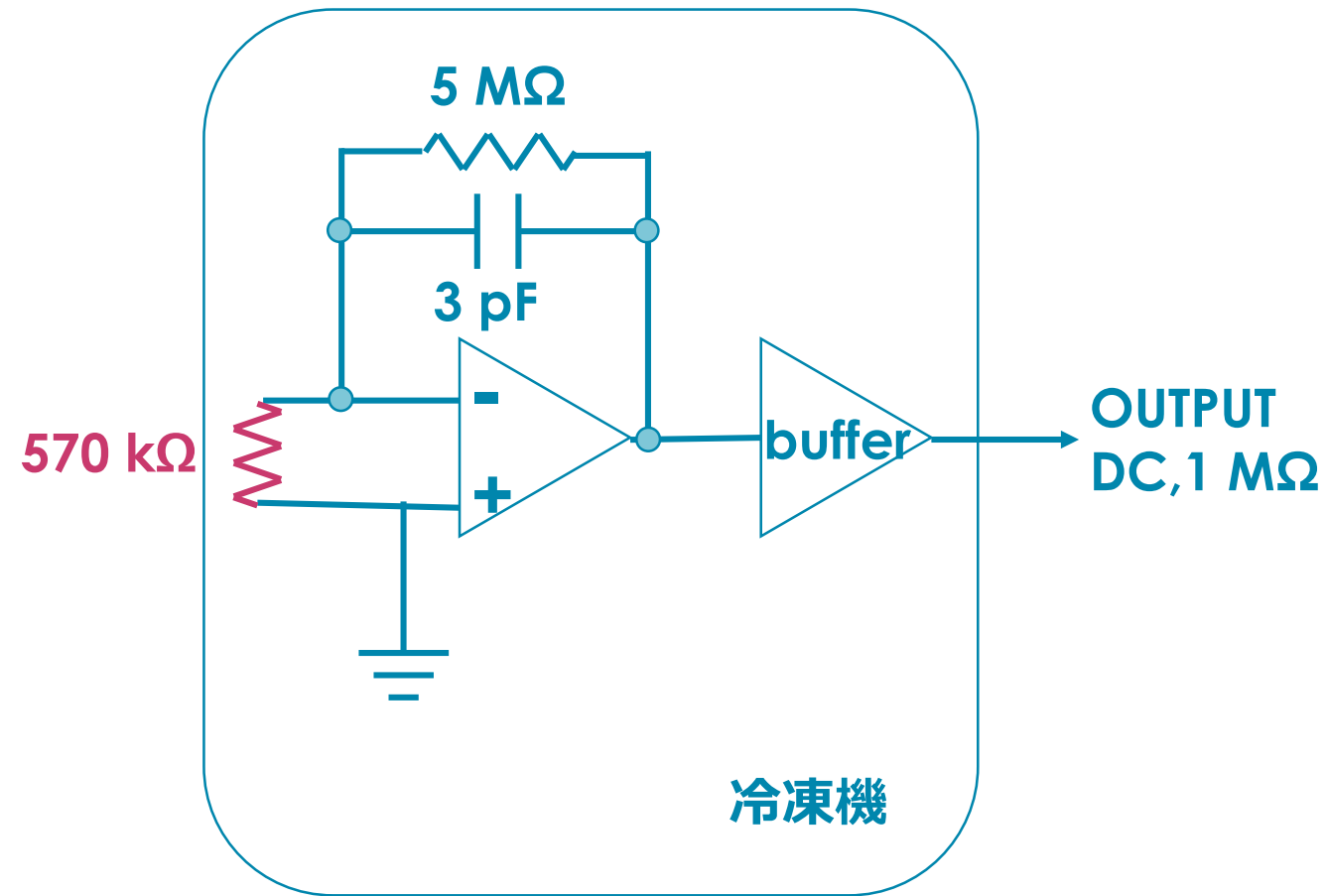
SOI-STJ5*(変更点)



擬似信号の増幅結果
入力電荷404 fC @室温

- SOI-STJ5と比べ
 - 出力が増えた
 - テールの形が安定した
- またボンディングの回数が大幅に減り簡単になったため、ボンディングをし直すたびに状況が変わりチップ毎の波形が大きく変化することが無くなった

ノイズの測定系



- 増幅器本体のノイズを評価するため入力回路を付けずIN+とIN-を弱く短絡した時の出力を測定する

NEP(Noise Equivalent Power)

- NEP(ノイズ等価電力)

- 検出器内部に起因するノイズ(熱雑音, 1/fノイズ, etc.)の出力を、外部からの信号を増幅した物とみなし評価する方法
- ここでは増幅器だけを測定しNEPは

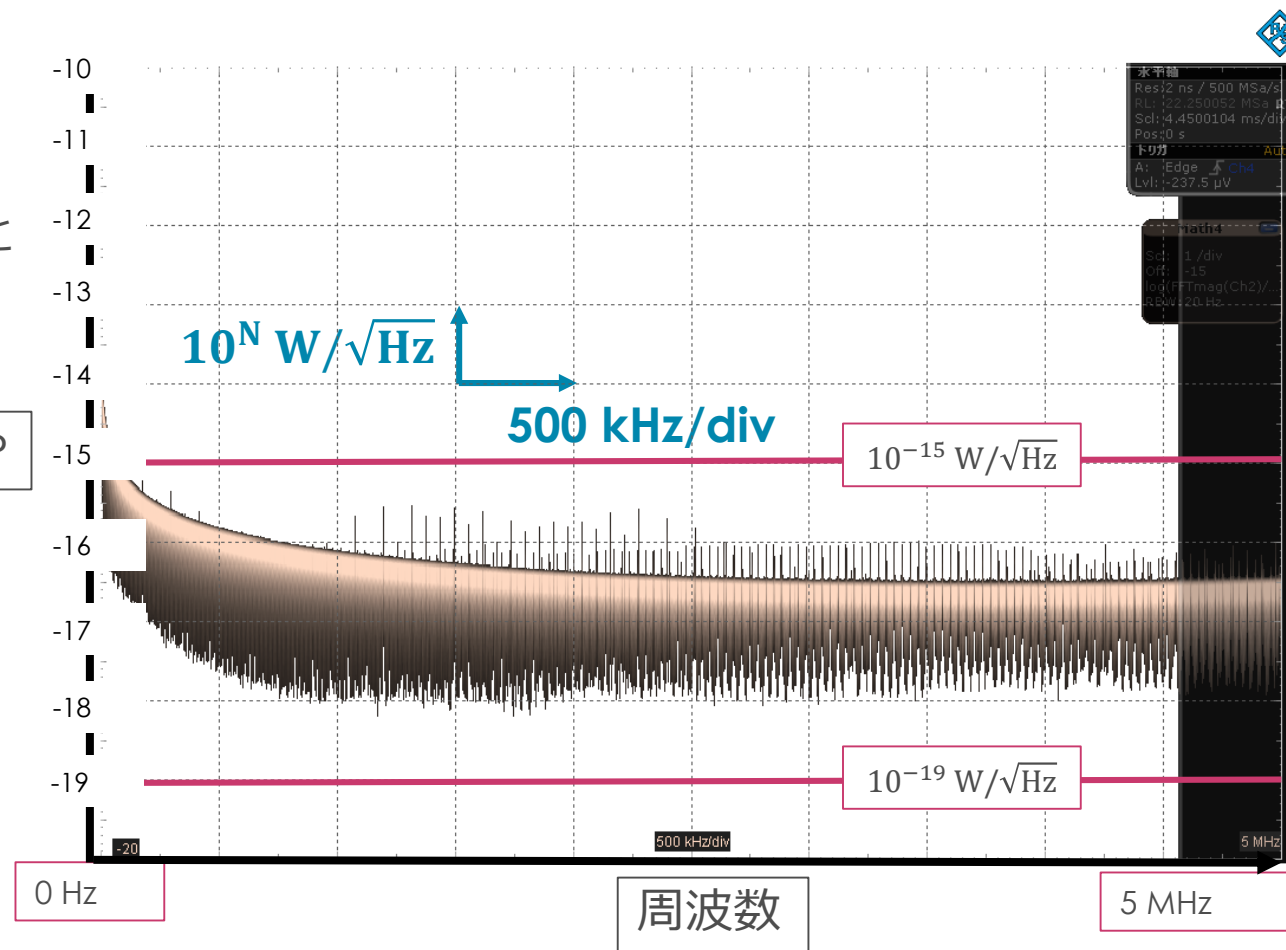
$$\text{NEP} [\text{W}/\sqrt{\text{Hz}}] = \frac{V_{\text{out}}}{\text{gain} \times F_{\text{conversion}} \times \sqrt{\text{RBW}}}$$

とする

- $V_{\text{out}} [\text{V}]$: SOI-STJ5*の出力
- $\text{gain} [\text{V/C}]$: SOI-STJ5*の増幅率
- $F_{\text{conversion}} [\text{C/W}]$: STJ出力電荷の入力エネルギー相当への変換係数
- $\text{RBW} [\text{Hz}]$: 帯域幅分解能

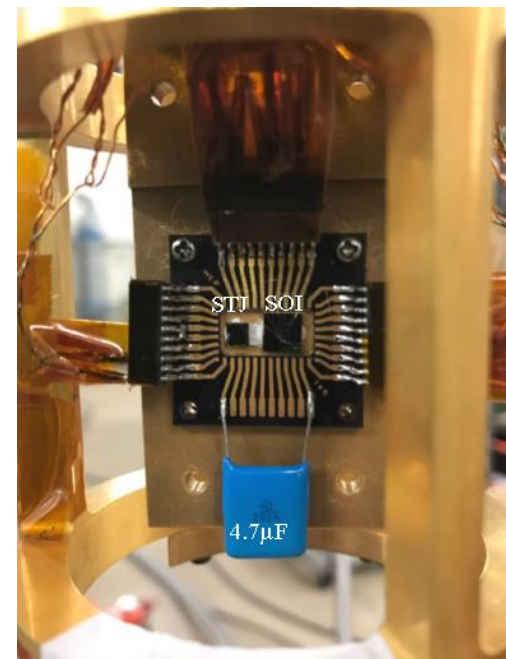
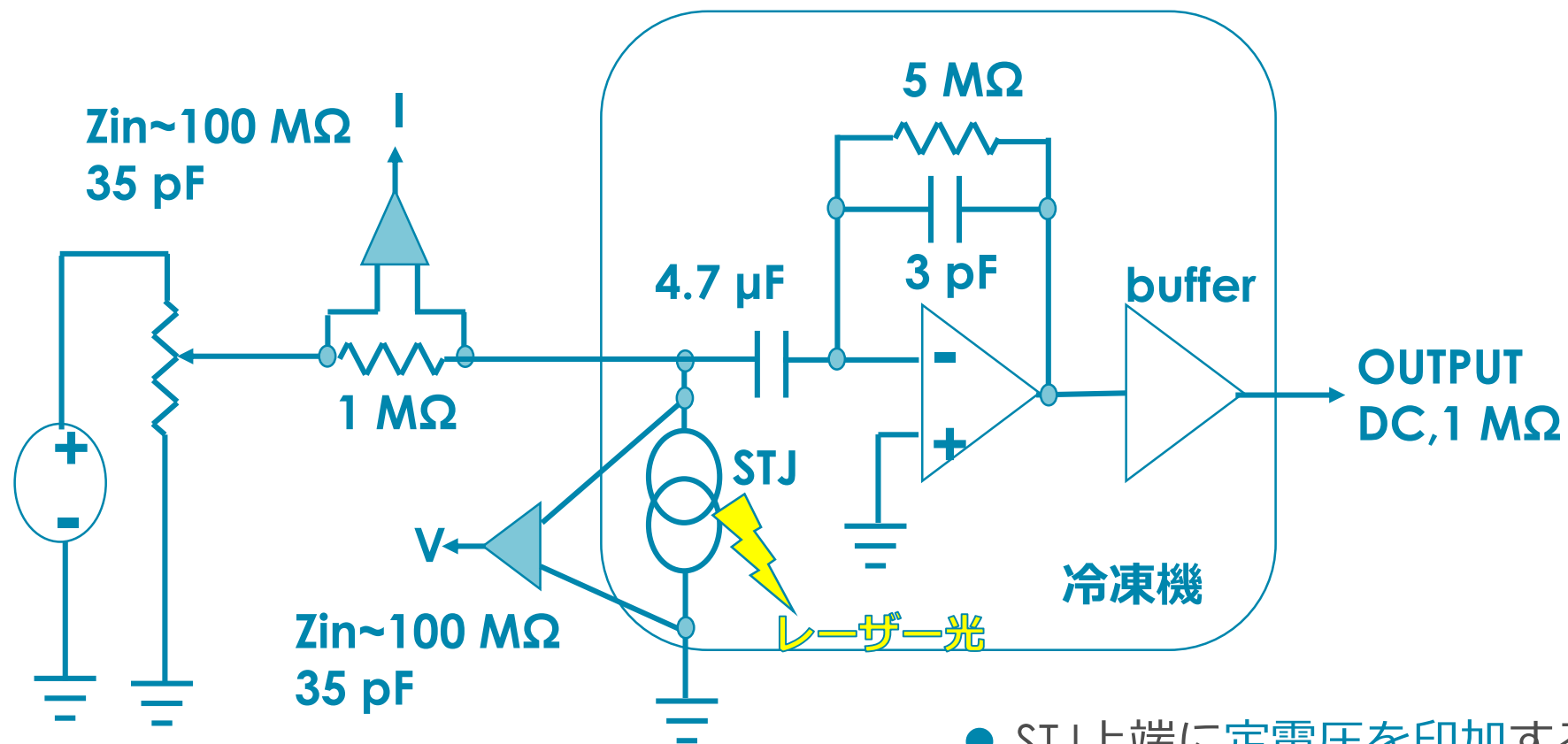
- この値より小さい信号はノイズと区別できない

NEP



SOI-STJ5*のNEP(0 Hz ~ 5 MHz) @400 mK

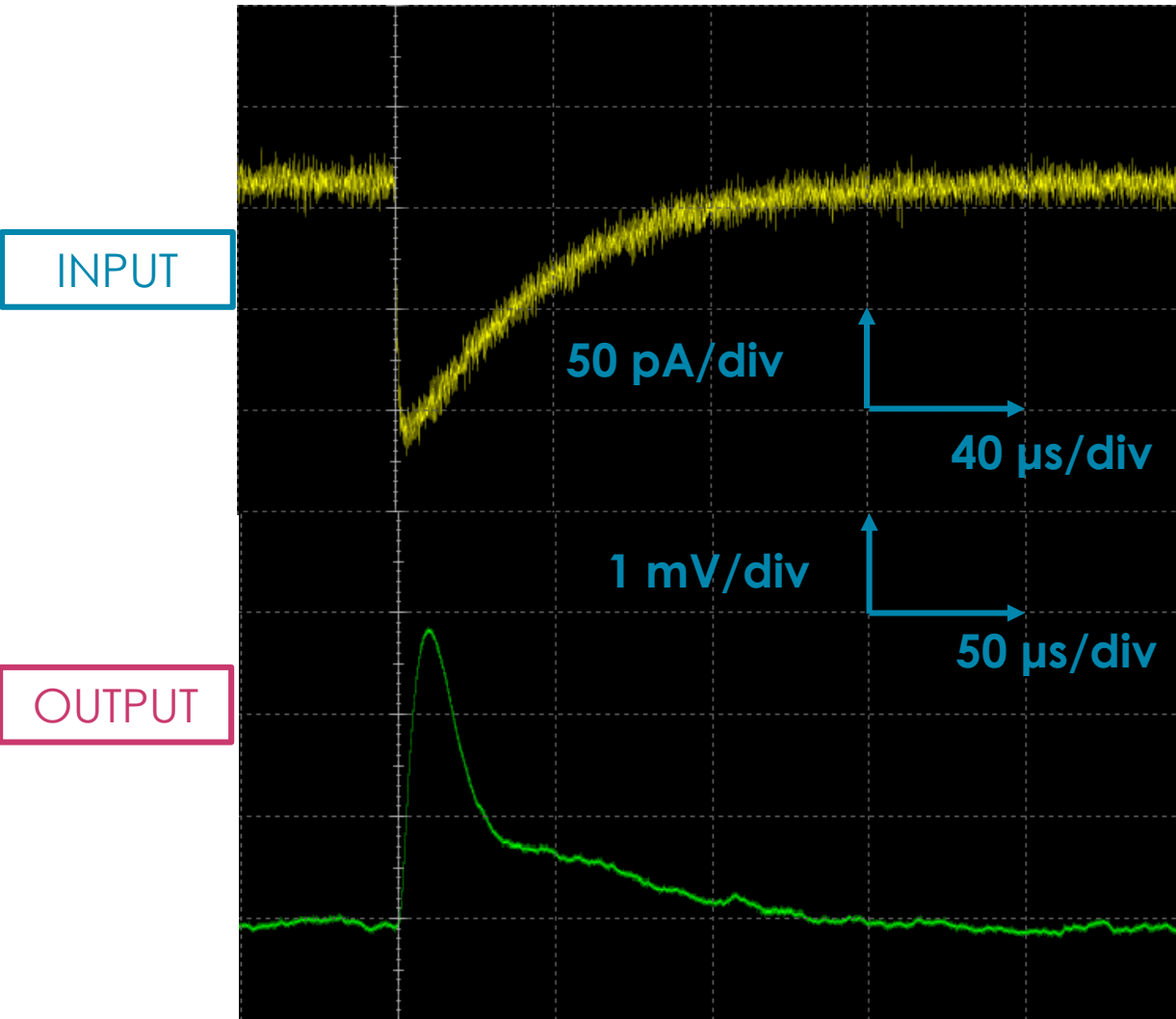
STJ信号増幅試験の測定系



極低温ステージ

- STJ上端に定電圧を印加する
- 大容量のコンデンサ($4.7\text{ }\mu\text{F}$)をIN-の前に置くことで直流成分をカットする

STJ信号増幅試験結果



- 20 μ m角のNb/Al-STJ(AISTのcravityで製作)
 - 厚さ: Nb 100 nm, Al 70 nm, Al_2O_3 2~3nm
- 波長465 nm、周波数200 Hzのレーザーパルスを入射
- 電荷積分型増幅回路でSTJ信号を増幅することに成功!!
- INPUT、OUTPUTより入力電荷は 10 ± 5 fCと見積もられる
 - 光子数に直すと2~5 個

SOI-STJ5*によるSTJ信号の増幅結果

INPUT:SOI-STJ5*をoffの状態ですTJの両端の電圧差を測定(定電流モード)し、この電圧差をSTJのdynamic抵抗で割って定電圧モードの電流に変換したもの

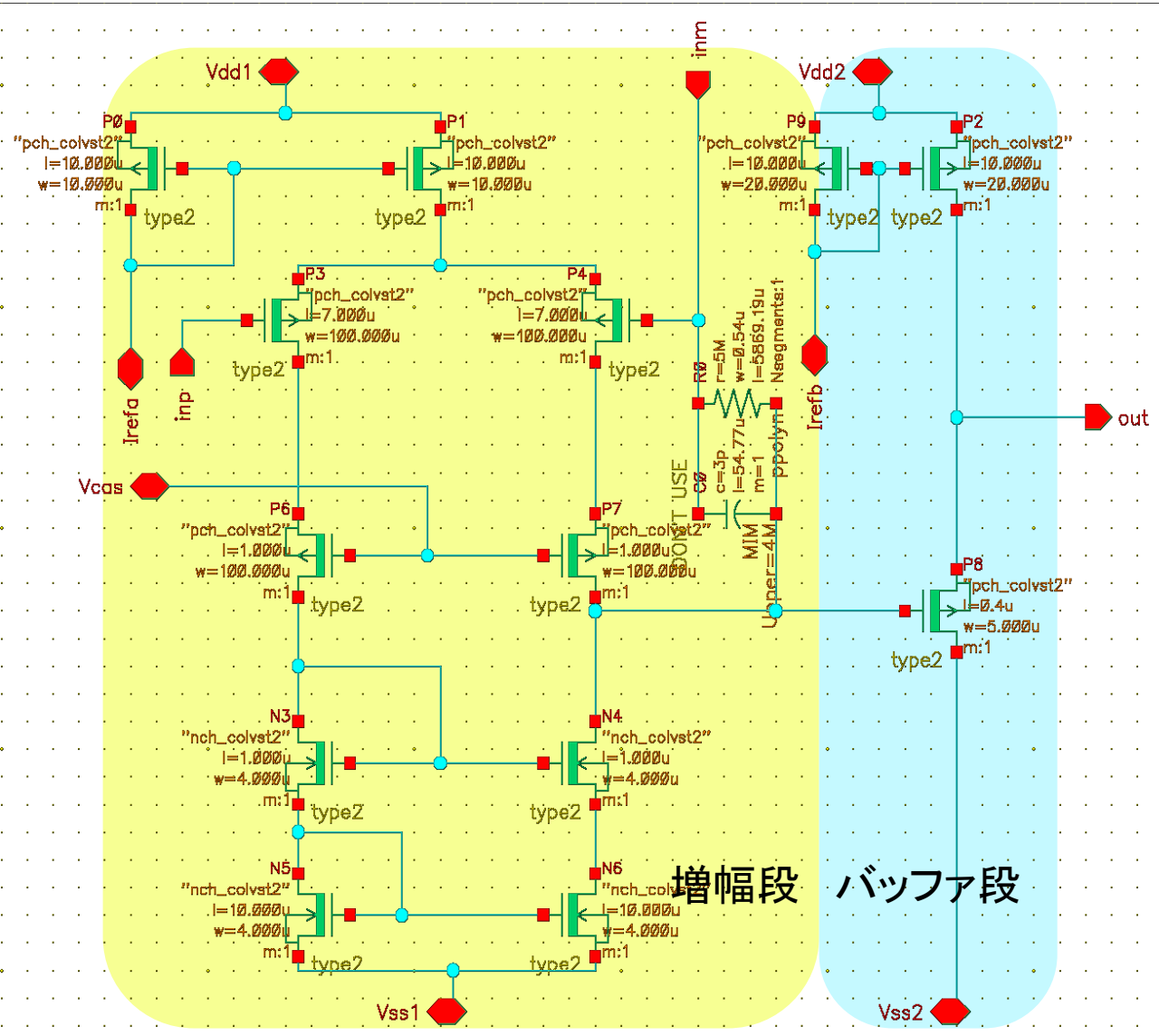
OUTPUT:SOI-STJ5*をonにした出力信号

まとめ

- ニュートリノ崩壊光を観測するために検出器の開発を行っている
 - STJ検出器からの信号を増幅するため極低温増幅器の開発をしている
- 電荷積分型増幅回路SOI-STJ5*の評価をした
 - 増幅器本体のノイズ評価をした($NEP \sim 10^{-17} \text{ W}/\sqrt{\text{Hz}}$)
 - 可視光(465 nm)をNb/Al-STJで検出し増幅することに成功した
- 今後の予定
 - 増幅器の電流制御の部分を一括制御する回路の評価
 - よりgainの高いSOI-STJ6による赤外光の検出

BUCKUP

SOI-STJ6の設計



- 消費電力への制限を緩くし増幅段を少し変更
→SOI-STJ5よりも高い周波数帯域を持つ。

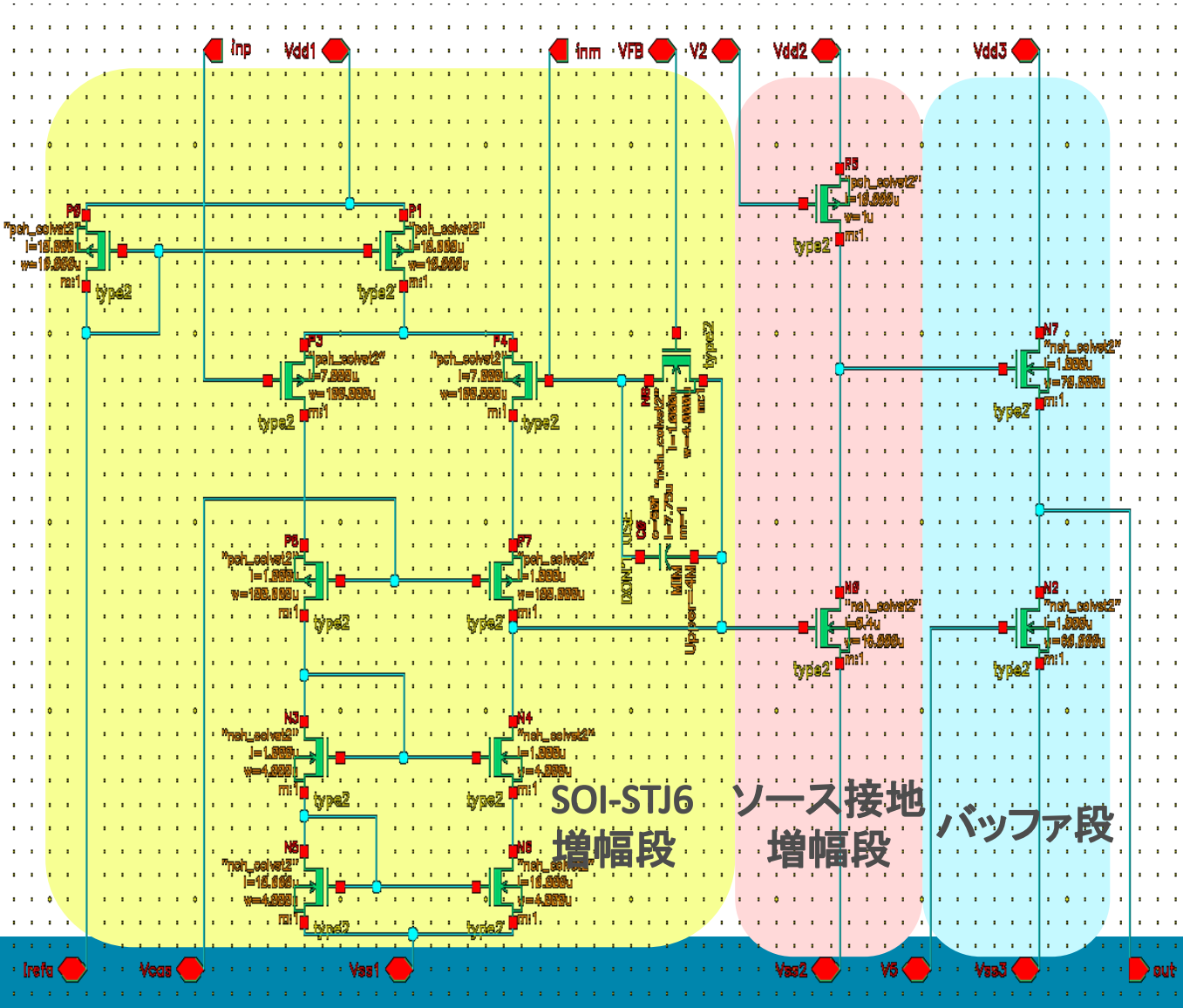
- 消費電力 $\sim 200\mu W$

- FBの容量は
3pF, 300fF, 60fF
のものを用意

$C_{FB} = 300fF$ を使えば4.4fCを
8 σ 以上で分離可能

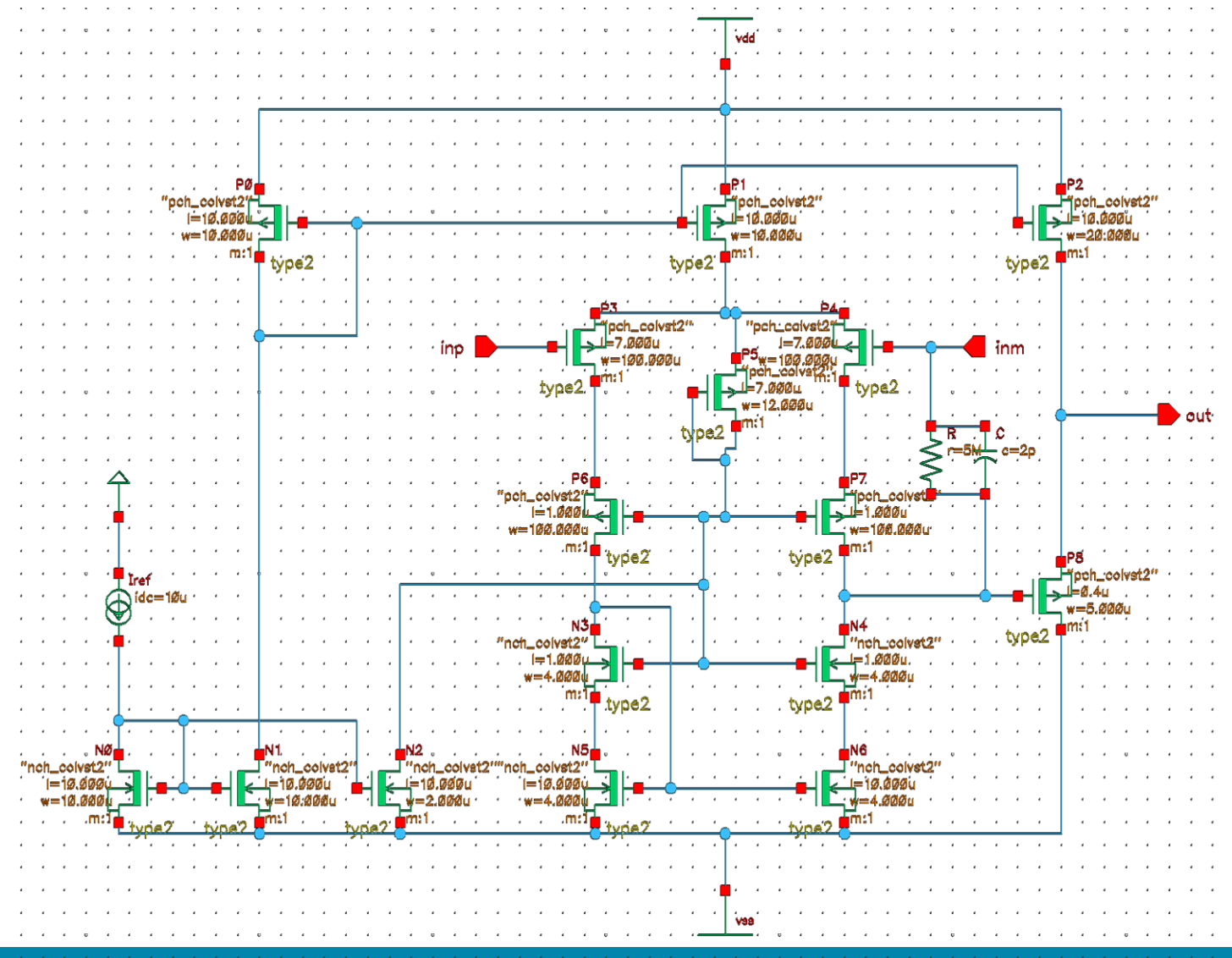
可視光($\lambda = 465nm$)
1光子に対するSTJの
応答電荷量

SOI-STJ6+ソース接地増幅回路

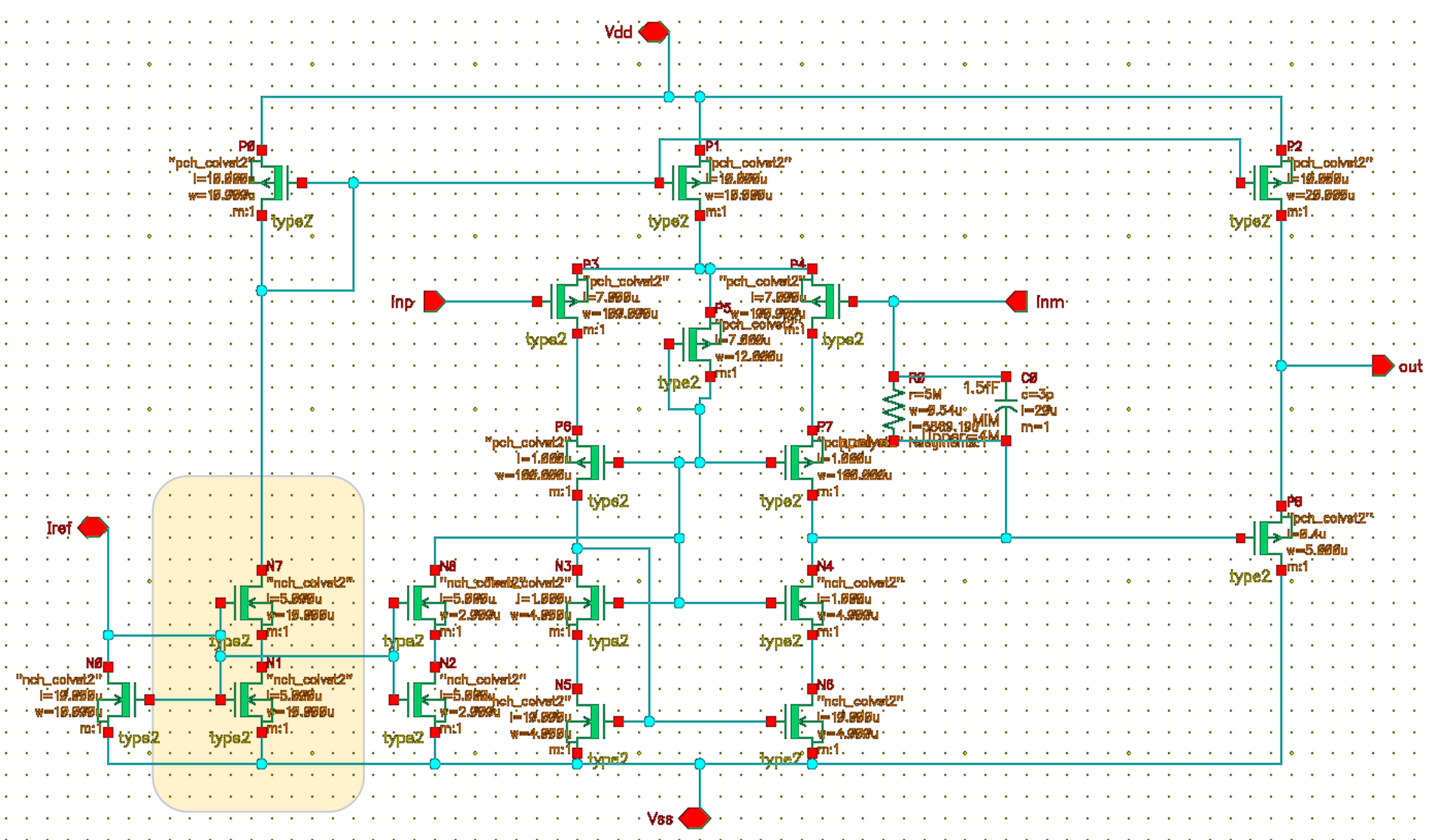


- フィードバック容量60fC
- 消費電力
SOI-STJ6増幅段 $\sim 50\mu\text{W}$
ソース接地 $\sim 10\mu\text{W}$
バッファ段 $\sim 90\mu\text{W}$
合計 $\sim 150\mu\text{W}$
- 25meV, 1光子(0.03fC)
に対して3~40mVの出力を得る設計

SOI-STJ5 with bias

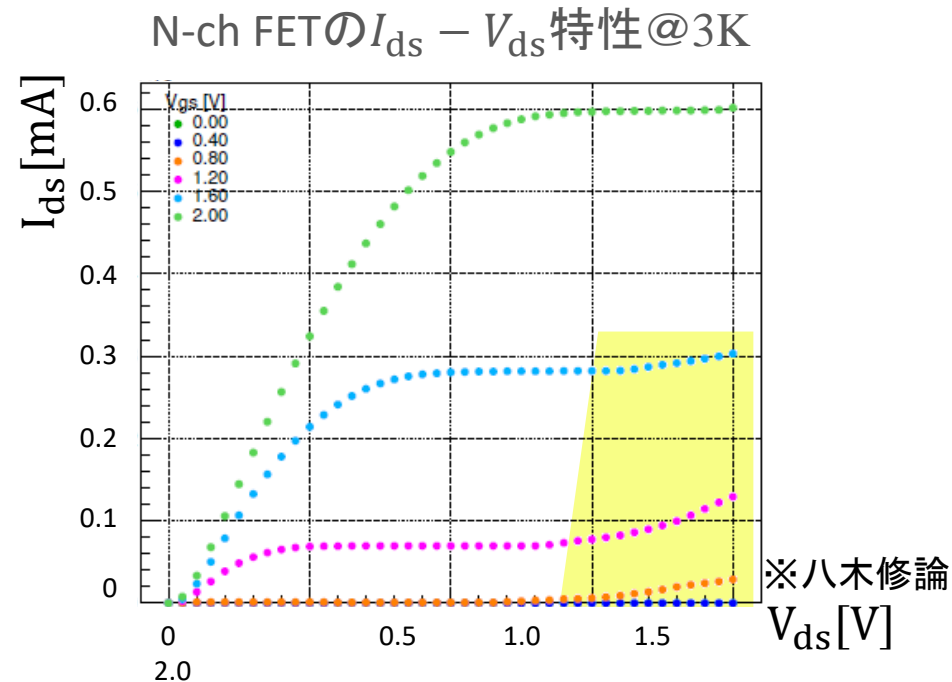
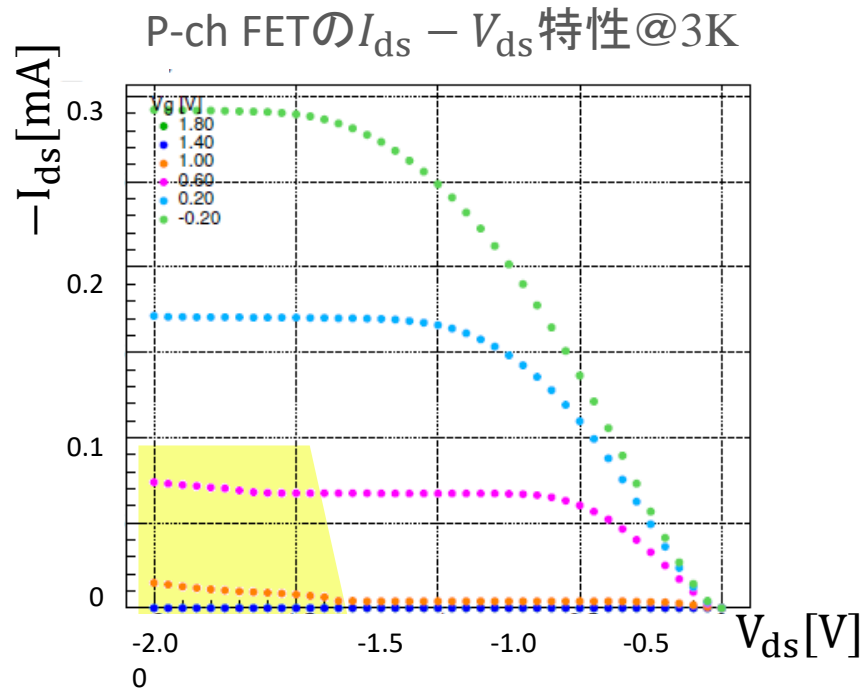


SOI-STJ5 (CasBias)



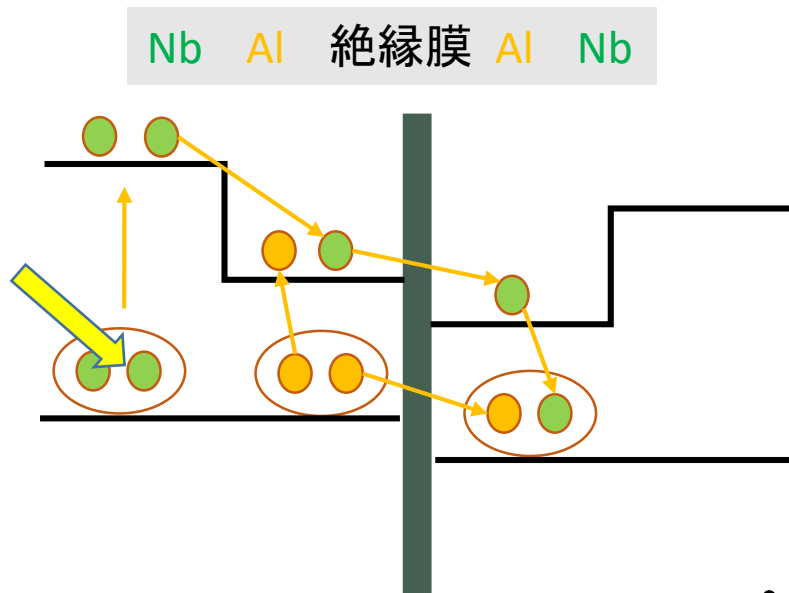
極低温におけるバイアス回路異常動作の原因

$W/L=10\mu\text{m}/5\mu\text{m}$



- $|V_{gs}| < |V_{ds}|$ の領域でドレイン・アバランシェにより I_{ds} が増加する。
- Simulationにおける動作点の確認とバイアス回路抜きのSOI-STJ5の測定により、二箇所FETがドレインアバランシェする領域で動作していると判明。

バクトンネリング効果



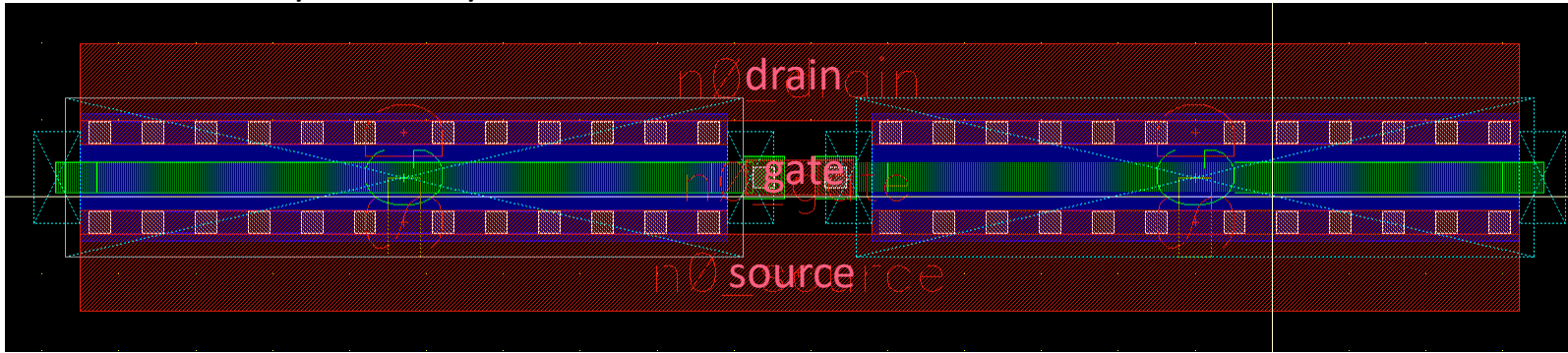
- バクトンネリングの仕組み

- ✓ Nb層に光が入射し、クーパ対が励起して準粒子を生成
- ✓ 生成された準粒子内あるものはそのままトンネル
- ✓ トンネルしなかった準粒子はAl層での準粒子の存在確率を高める
- ✓ トンネルした準粒子がAl層のクーパ対の片割れとクーパ対を作る
- ✓ その際に余った電子が準粒子としてAl層で励起

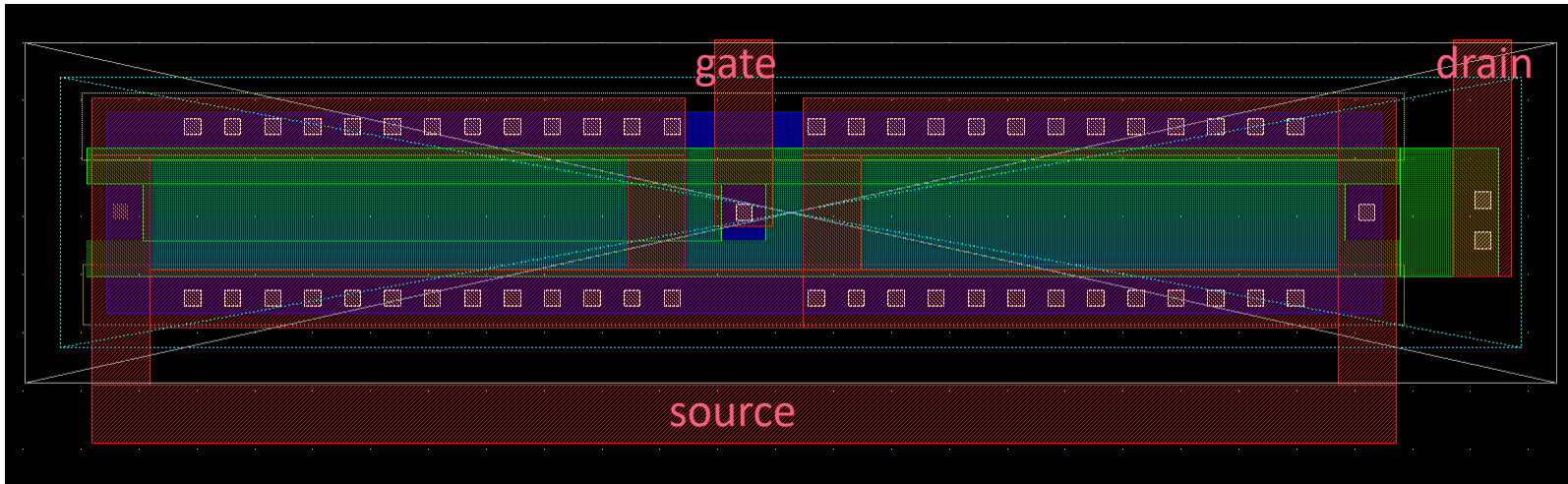
- Nb/Al-STJでは $G \sim 10$

H字ゲートMOSFET

一般的なMOSFET W/L=16 μ m/0.4 μ m



H字ゲートMOSFET W/L=10 μ m/2 μ m

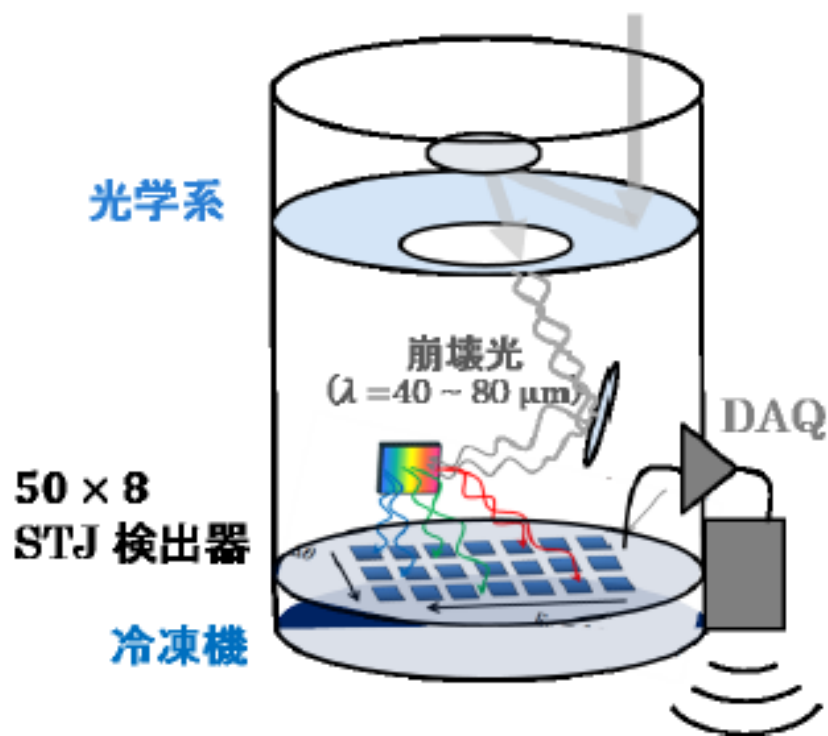


- ボディとのコンタクトを増やし、浮遊キャリアが出ないように工夫

ロケット実験

ニュートリノ崩壊光探索の概要図

高度200km, 約5分の観測



- データ収集
 - 上空200km
 - 収集時間200sec
- 50×8の検出器を使用
 - 検出器としてNb/Al-STJを使用
 - 遠赤外光が入射したかを検出
- ^3He ソーブション減圧冷凍機を使用
 - 到達温度: 0.4K
- ニュートリノの寿命の下限値を修正
 - $\tau > 10^{14}$ years
 - 有意度 5σ

NEP

- $F_{\text{conversion}}$ の定義

- ニュートリノの崩壊光 E_γ 、崩壊光によって生じるSTJの電荷 Q 、SOI-STJ5の出力の時定数 τ より

$$\frac{Q \times \tau}{E_\gamma} = 0.4 \left[\frac{\text{W}}{\text{C}} \right]$$