



# ニュートリノ崩壊光探索のための SOI-STJの研究開発V

八木 俊輔、金 信弘、武内 勇司、武政 健一、永田 和樹、笠原 宏太、若狭 玲那、  
先崎 蓮、森内 航也、美馬 覚<sup>A</sup>、木内 健司<sup>A</sup>、新井 康夫<sup>B</sup>、倉知 郁生<sup>B</sup>、羽澄 昌史<sup>B</sup>、  
石野 宏和<sup>C</sup>、吉田 拓生<sup>D</sup>、加藤 幸弘<sup>E</sup>、松浦 周二<sup>F</sup>、川人 祥二<sup>G</sup>、池田 博一<sup>H</sup>、  
和田 武彦<sup>H</sup>、長瀬 晃一<sup>H</sup>、馬場 俊祐<sup>H</sup>、志岐 成友<sup>I</sup>、浮辺 雅宏<sup>I</sup>、藤井 剛<sup>I</sup>、  
大久保 雅隆<sup>I</sup>、Erik; Ramberg<sup>J</sup>、Mark Kozlovsky<sup>J</sup>、Paul Rubinov<sup>J</sup>、Soo-Bong Kim<sup>K</sup>

筑波大数理、理研<sup>A</sup>、KEK<sup>B</sup>、岡山大<sup>C</sup>、福井大<sup>D</sup>、近畿大<sup>E</sup>、関西学院大<sup>F</sup>、  
静岡大<sup>G</sup>、JAXA<sup>H</sup>、AIST<sup>I</sup>、Fermilab<sup>J</sup>、Seoul Nat'l. Univ.<sup>K</sup>

講演番号 : 21aSF-9

# 目次

- ニュートリノ崩壊光探索
- STJ (Superconducting Tunnel Junction)
  - 動作原理
- 極低温環境下で動作する前置増幅器
  - 極低温環境下で動作するトランジスタ -> SOI-FET
  - 極低温増幅器への要求
  - 回路デザイン
  - 極低温環境下( $\sim 300\text{mK}$ )での増幅試験

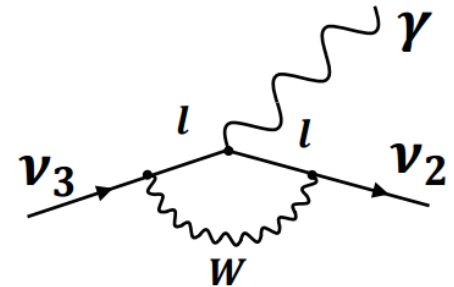
# ニュートリノ崩壊光探索

## ● ニュートリノ崩壊

崩壊に伴う光子のエネルギーと測定済みの  
質量自乗差から、ニュートリノ質量を決定できる。

精度よく測定  $E_\gamma = \frac{m_3^2 - m_2^2}{2m_3}$  ニュートリノ振動実験

ニュートリノ崩壊図



- ニュートリノは長寿命 ( $T > O(10^{12})$  年 : COBE+AKARI測定結果より)
  - ◇ 大量のニュートリノ源が必要となる。
    - 宇宙背景ニュートリノを用いる

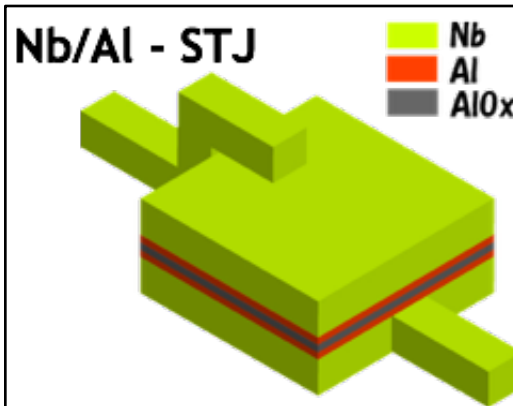
予想される崩壊エネルギーは、約25meV(波長換算 : 50 $\mu$ m)

- ・ テラヘルツ光検出可能な光検出器

**超伝導トンネル接合素子光検出器(STJ)の導入**

# STJ (超伝導トンネル接合素子光検出器)

超伝導トンネル接合素子 (Superconducting Tunnel Junction : STJ)



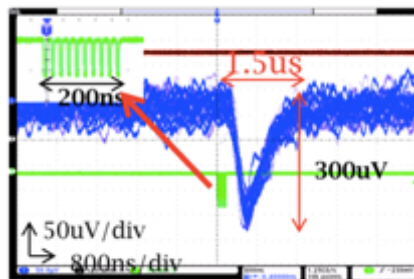
超伝導体 / 絶縁体 / 超伝導体のサンドイッチ構造

## STJの動作プロセス

1. 超伝導体に光子が入射
2. その光子がクーパ対を壊し、準粒子生成
3. 準粒子が絶縁膜をトンネルし、それを電流として観測

## STJの応答速度

200nsで10パルスの光が入射してきた場合、STJの信号幅は1.5μs



## Nb / Al STJ 準粒子生成個数

$$N_q = G_{al} \cdot \frac{E_0}{1.7 \times \Delta}$$

$G_{al}$  : トラッピングゲイン  
 $E_0$  : 放射線のエネルギー  
 $\Delta$  : 超伝導体のエネルギーギャップ

Nb / Al STJ (Al厚 : 70nm) の場合の  
25meVの1 photon検出の際の準粒子発生個数

$$N_q = 10 \cdot \frac{25meV}{1.7 \times 1.4meV} = 105e$$

# 極低温増幅器への要求

## STJ検出器

- ✓ リーク電流要求値 :  $< 100\text{pA}$
- 現状  $50\text{pA}$   
( $20\mu\text{m}$ 角 Nb/Al-STJ)
- リーク電流の要求は達成

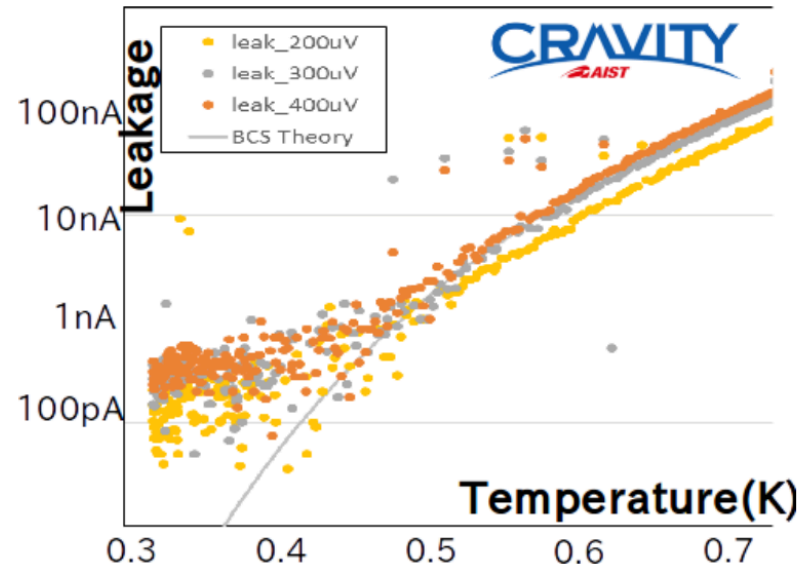
しかし、測定系雑音により、  
遠赤外1光子観測達成には至っていない

- 検出器直近(冷凍機内部 :  $< 3\text{K}$ )  
に増幅器を設置し、増幅

## 極低温増幅器に対する要求

- ✓  $300\text{mK}$ でも動作可能
- ✓ STJ検出器の信号増幅が可能 (※信号幅 : 数  $\mu\text{sec}$ )
- ✓ 冷凍機の配線容量負荷( $\sim$ 数百 $\text{pF}$ )の環境下でも信号伝送が可能
- ✓ 低消費電力 (※冷凍機の冷却能力 :  **$100\mu\text{W}$**  @ $300\text{mK}$  ,  **$0.25\text{W}$**  @ $4.2\text{K}$ )

Nb/Al-STJ リーク電流の温度依存性



M.Ukibe et al., Jpn. J. Appl. Phys. 51, 010115(2012)

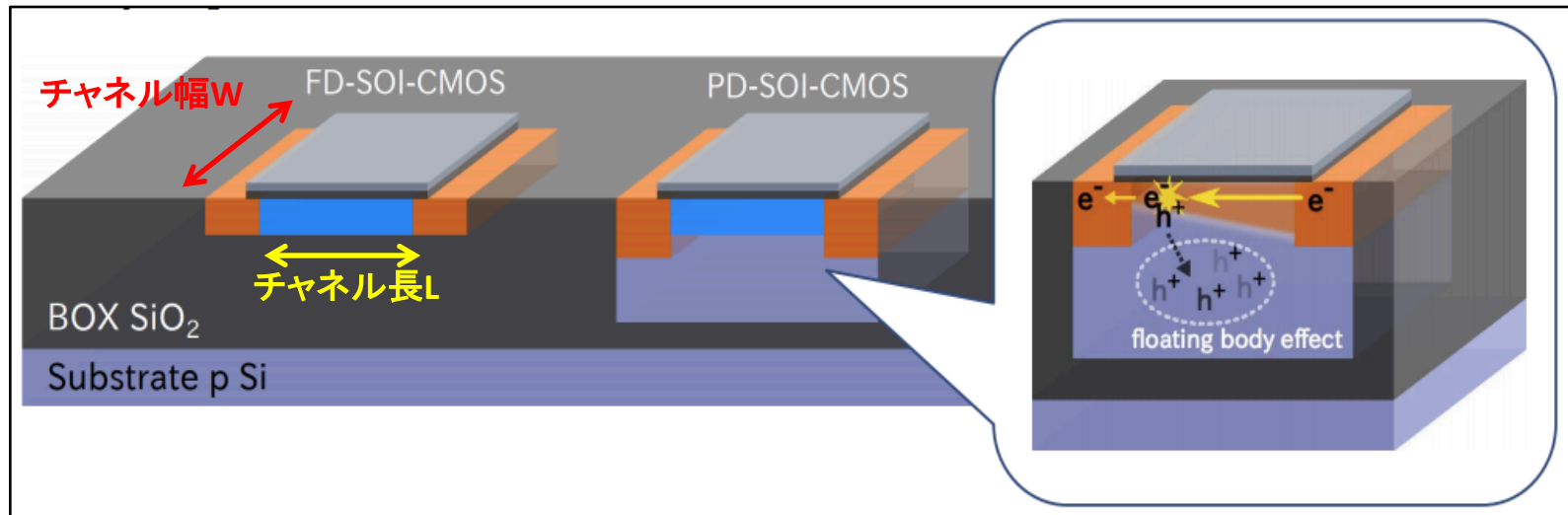
M.Ohkubo et al., IEEE Trans. Appl. Super, 24, 2400208(2014)

# 極低温環境下で動作するトランジスタ

## FD-SOI : Fully Depleted – Silicon On Insulator

- ✓ チャンネル層が非常に薄く形成されたSOI-MOSFET
  - ◆ キャリアの衝突イオン化によって生成されたイオンがボディに蓄積し、電圧異常を引き起こす浮遊帯効果の抑制
- ✓ 実際に、4K以下でも、FD-SOI-MOSFETが正常に動作することを確認

※JAXA/ISAS AIPC 1185,286-289(2009)参照

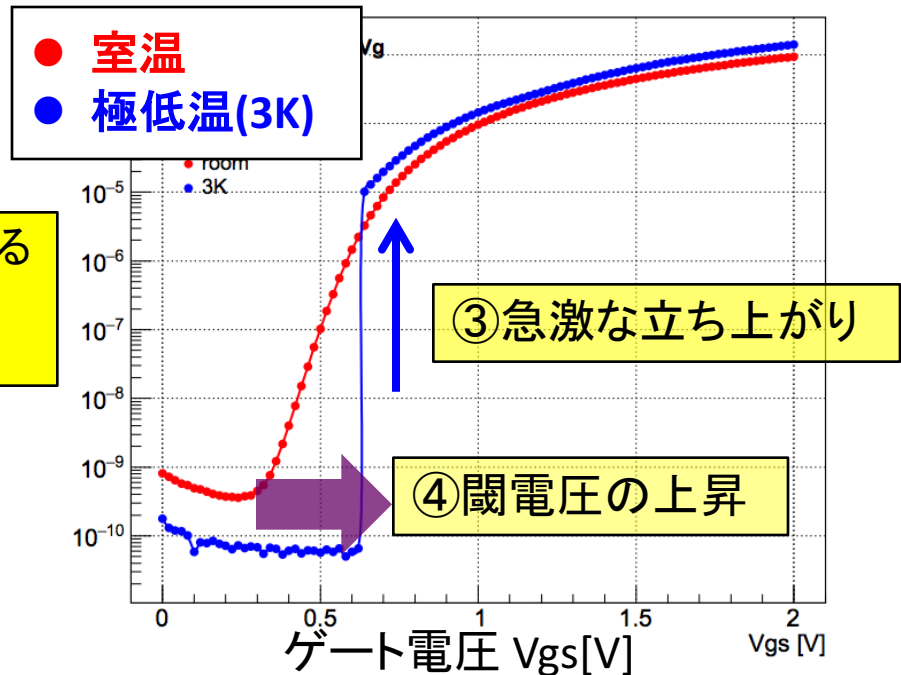
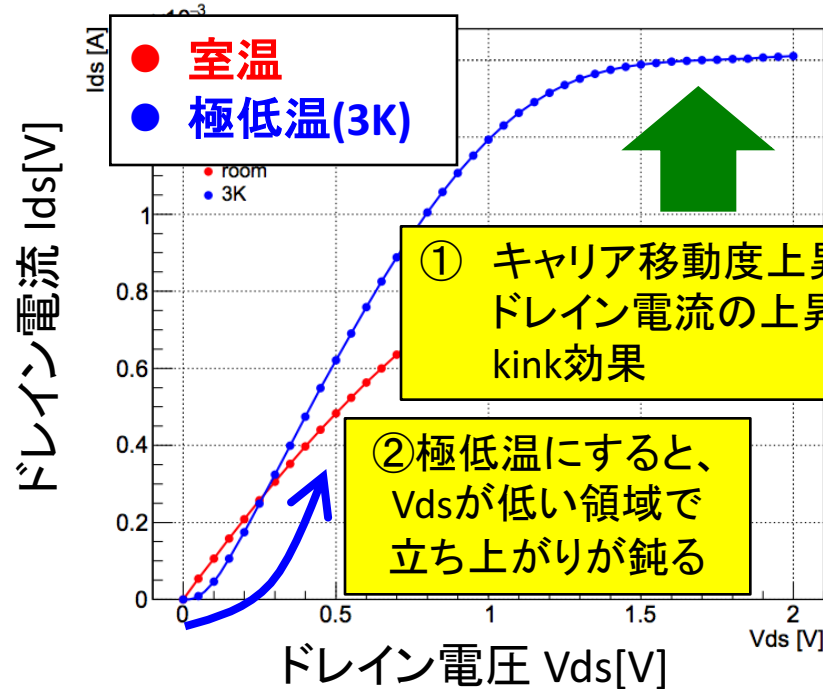


# 極低温環境下でのトランジスタの電気的特性

ex.) N型  $W/L = 10\mu\text{m} / 1.0\mu\text{m}$

ド레인電流のド레인電圧依存性 ( $V_{gs}=2\text{V}$ )

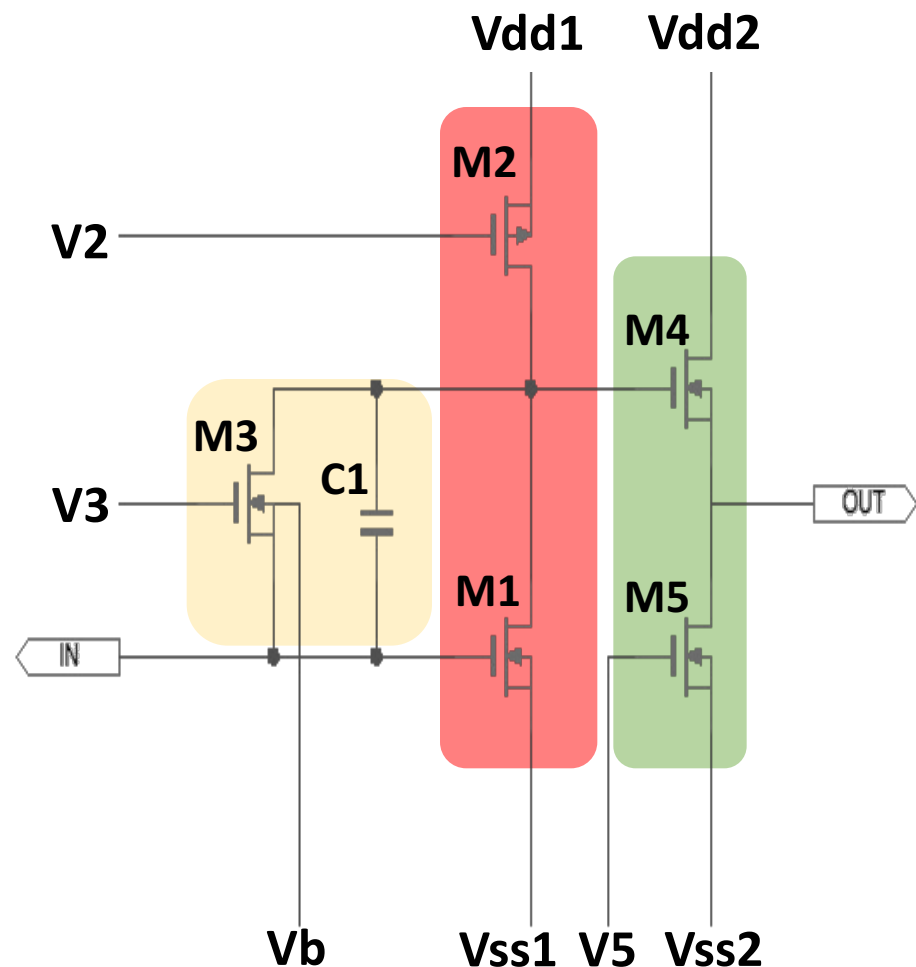
ド레인電流のゲート電圧依存性 ( $V_{ds}=1.8\text{V}$ )



以上のように、極低温環境下でFD-SOIFETの特性は常温環境下から大きく変化する  
しかし、冷却中(後)での致命的な劣化は見られず、これらの特性は、  
ゲート電圧でド레인電流を制御することによって、十分増幅器として用いることが可能

# 回路デザイン

## SOI-STJ4 (試作4号機)



### □ ソース接地増幅回路

- 抵抗負荷を飽和領域で動作するMOSFET

### □ フィードバック

- ソース接地回路の入出力間に可変抵抗としてMOSFETを導入  
バイアス電圧の安定化を図る

### □ ソースフォロワ回路(バッファ段)

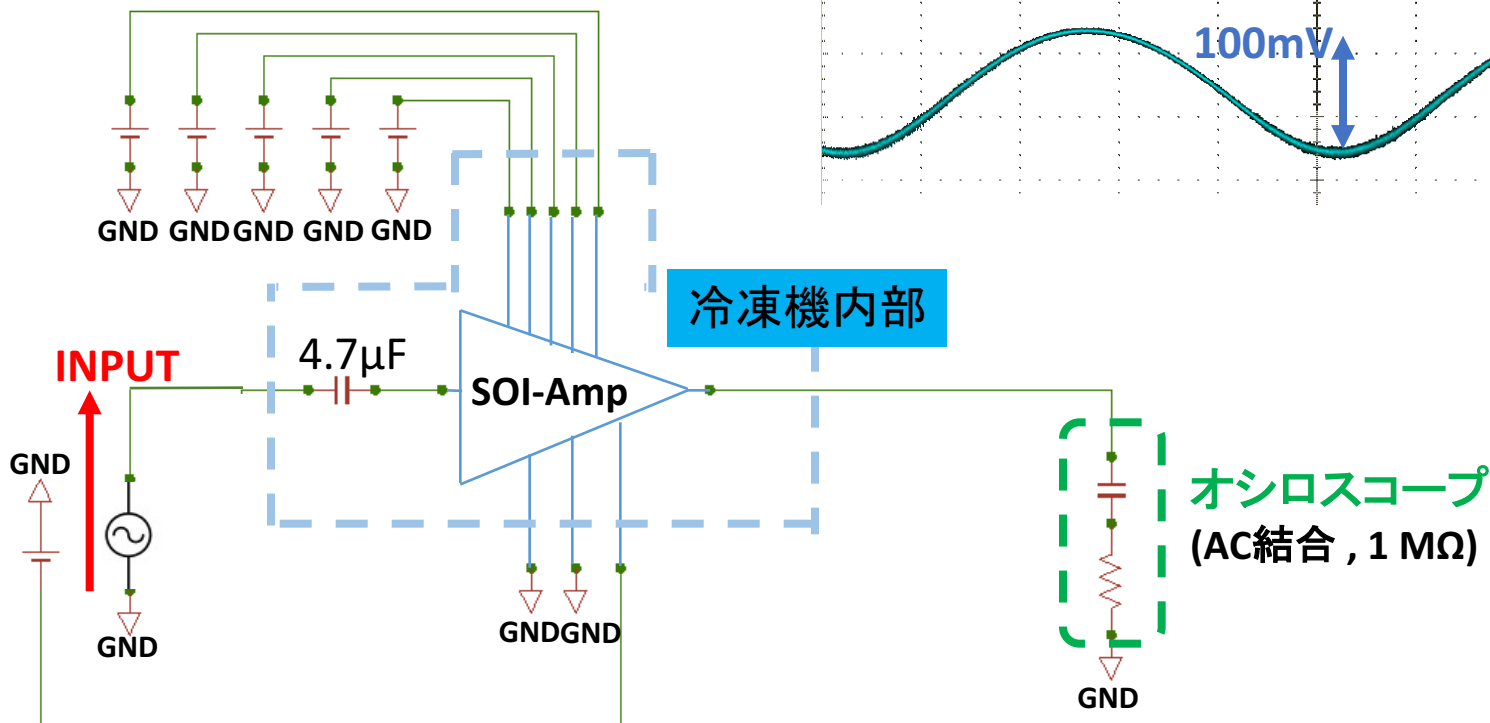
- 出力インピーダンスの低下

	Type	W [ $\mu\text{m}$ ]	L [ $\mu\text{m}$ ]
M1	Nch-CLst2	40	1
M2	Pch-CLst2	1	10
M3	Nch-CLst2	1.6	10
M4	Nch-CLst2	70	1
M5	Nch-CLst2	60	1
C2	MIM cap.	100 fF	

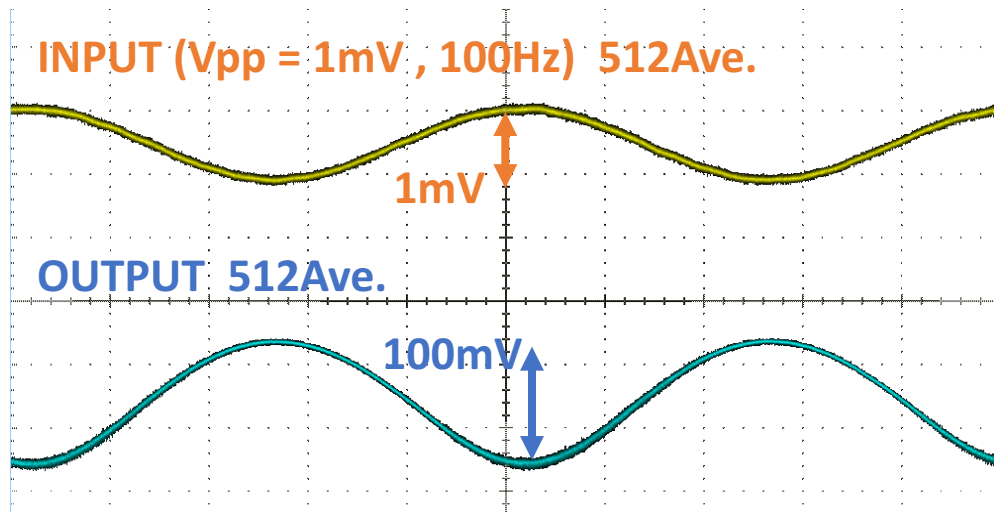


# SOI-STJ4の増幅試験 @300mK

- 入力 : 波高 1mV sin波
- SOI増幅器に印加するバイアス電圧を固定し、周波数を走査させながら増幅率の変化を調べる

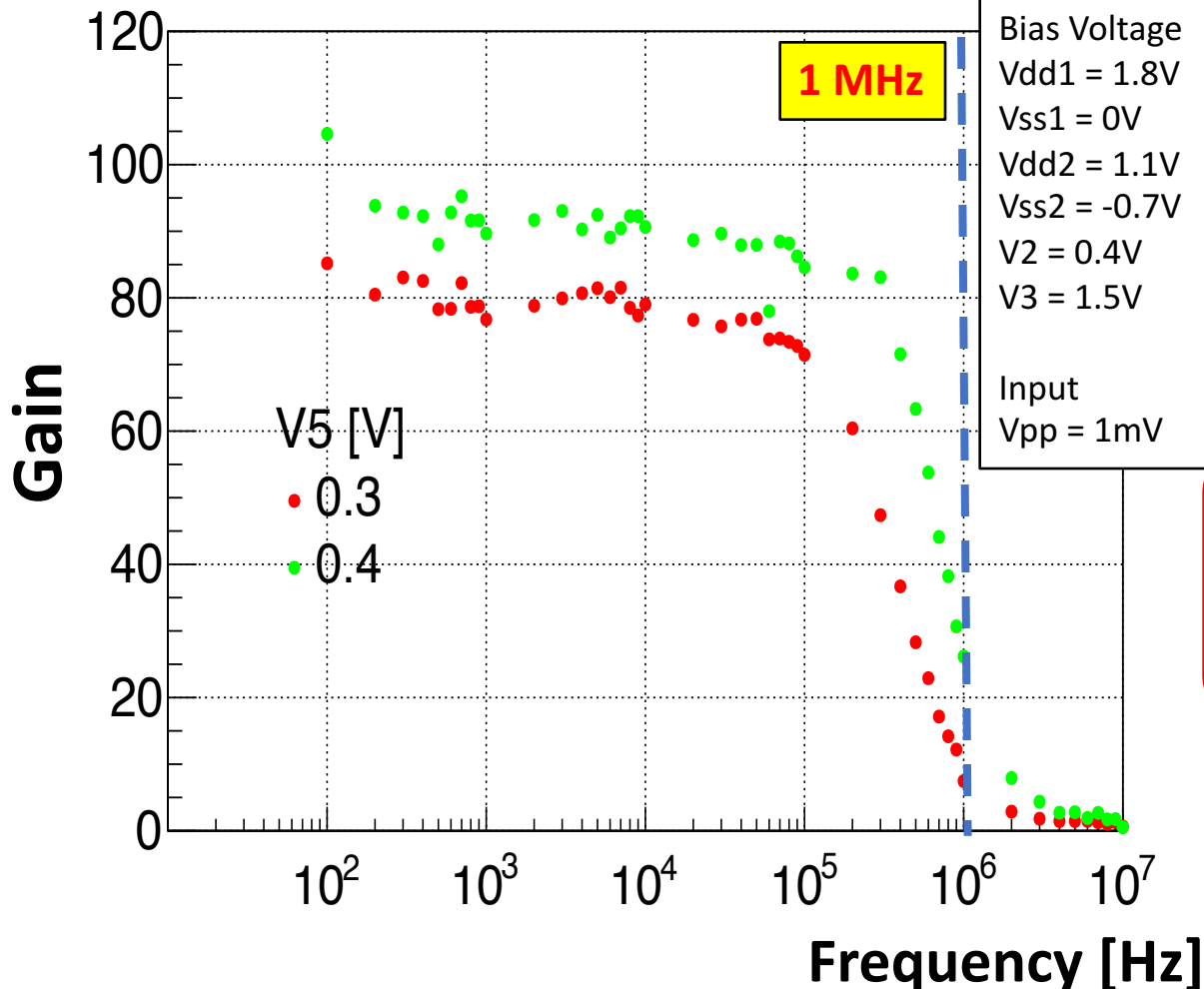


入力( $V_{pp}$  1mV 100Hz)に対する出力



# SOI-STJ4 利得の周波数特性

Frequency characteristic of cold pre-amplifier(SOISTJ4) @300mK



- Gainを稼げるように、V3(フィードバック)を調節
- 出力信号が飽和しないようにV2を微調整
- その後、V5を変化させ、周波数特性にどのような変化があるかを調べる

- 結果として、  
Input 1MHz  
Load cap. : 0.5nF  
に対して、利得30を獲得

**Best Record!!**

- 消費電力 : 230  $\mu$ W  
300mK環境下での  
冷凍機の冷却能力を上回る  
➤ 最低温維持は困難...

# INPUT 1MHz

INPUT (Vpp = 1mV Frequency 1MHz) 512Ave.

OUTPUT 512Ave.

位相のズレがみれるが、反転増幅を観測

1 1.00mV/V 2 10.0mV/V

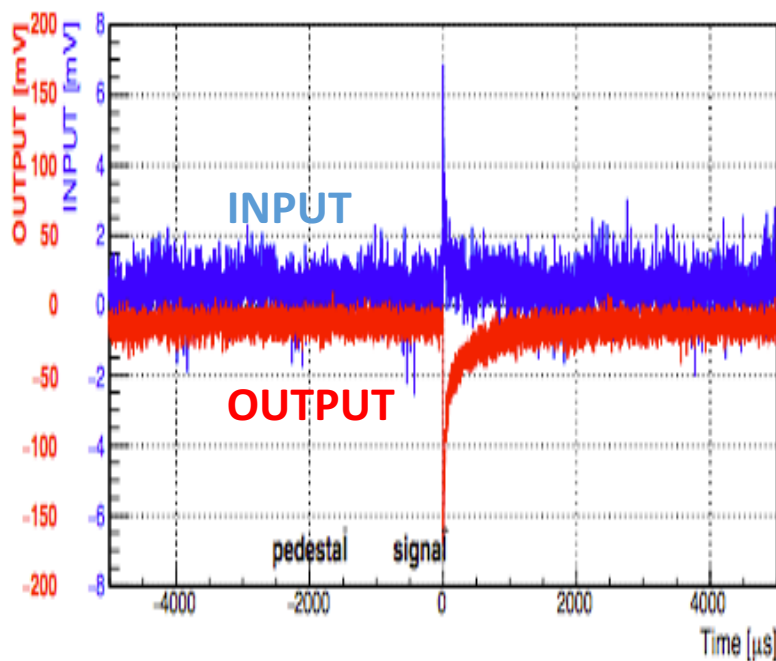
1.0μV  
0.2μsec

1.0μV  
0.2μsec

# 信号雑音比の向上

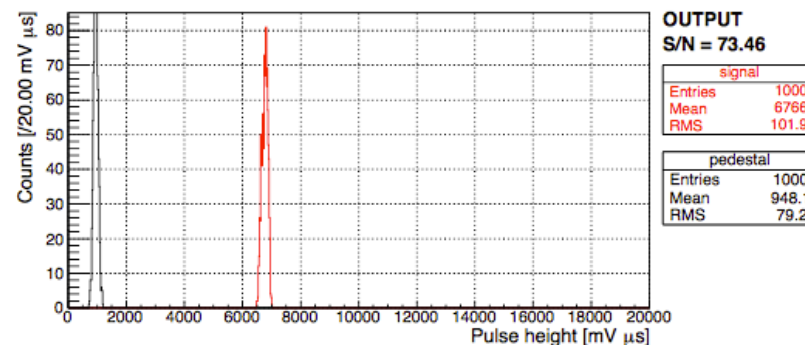
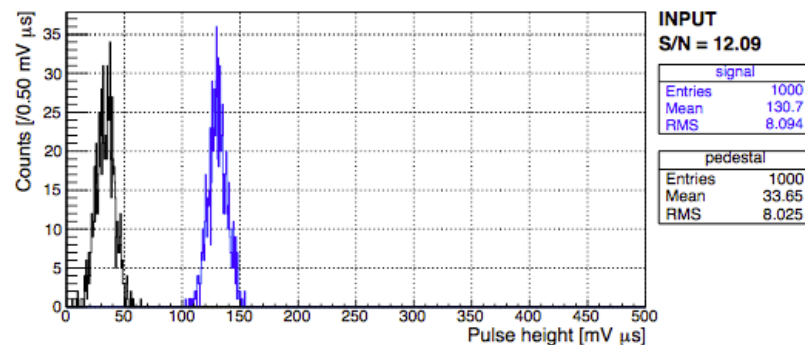
- Nb/Al-STJ検出器の信号を模した擬似信号をSOI増幅器に入力.
- 入力信号と増幅器の出力信号のそれぞれの信号雑音比を測定

入力波形と出力波形 @300mK



Bias [V]  
Vdd1 = 1.8  
Vss1 = 0.0  
V2 = 0.55  
V3 = 1.5  
Vdd2 = 1.1  
Vss2 = -0.7  
V5 = 0.2

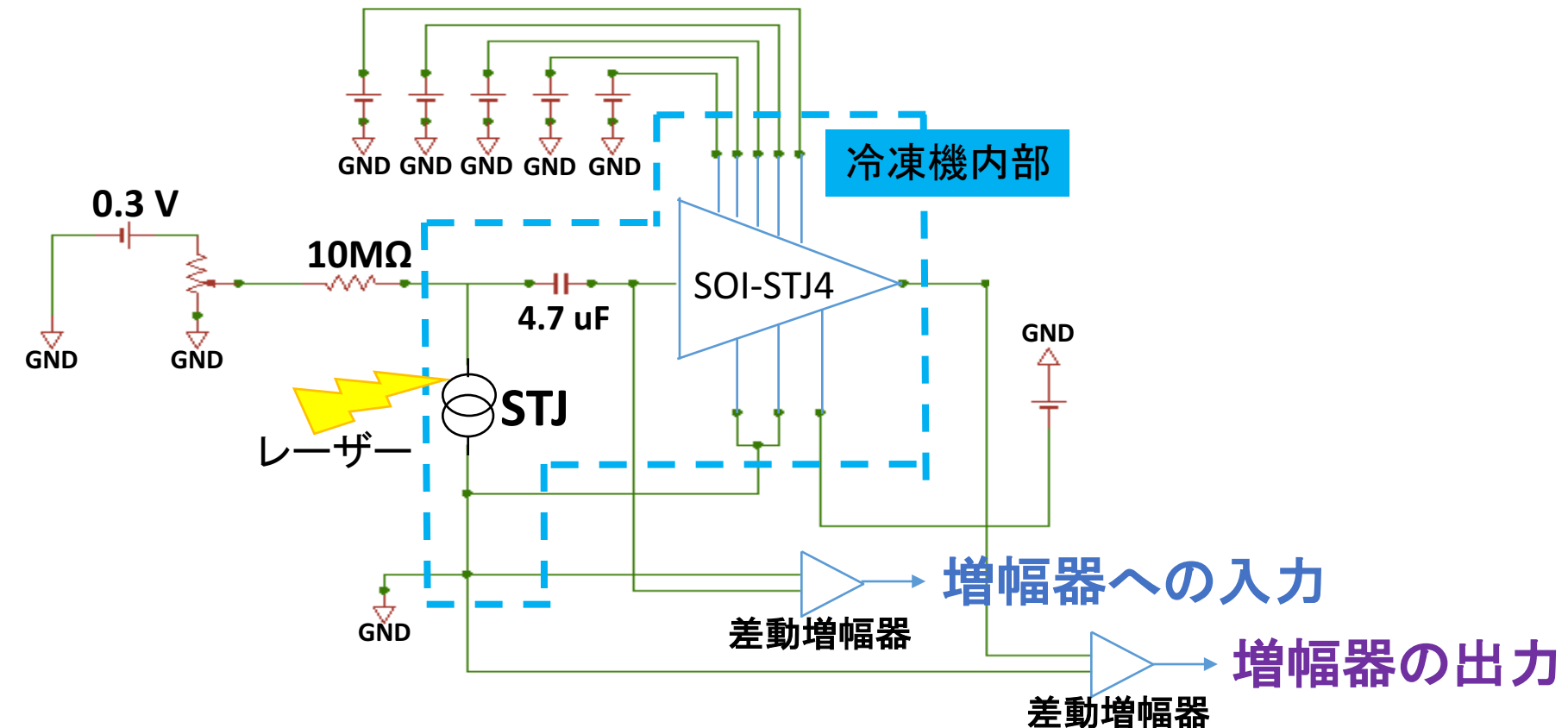
積分時間 : 60μsec



- ✓ 極低温増幅器を導入することにより、S/Nの向上を確認
  - 極低温環境下においても冷凍機内からの信号読み出しにSOI増幅器は有効！

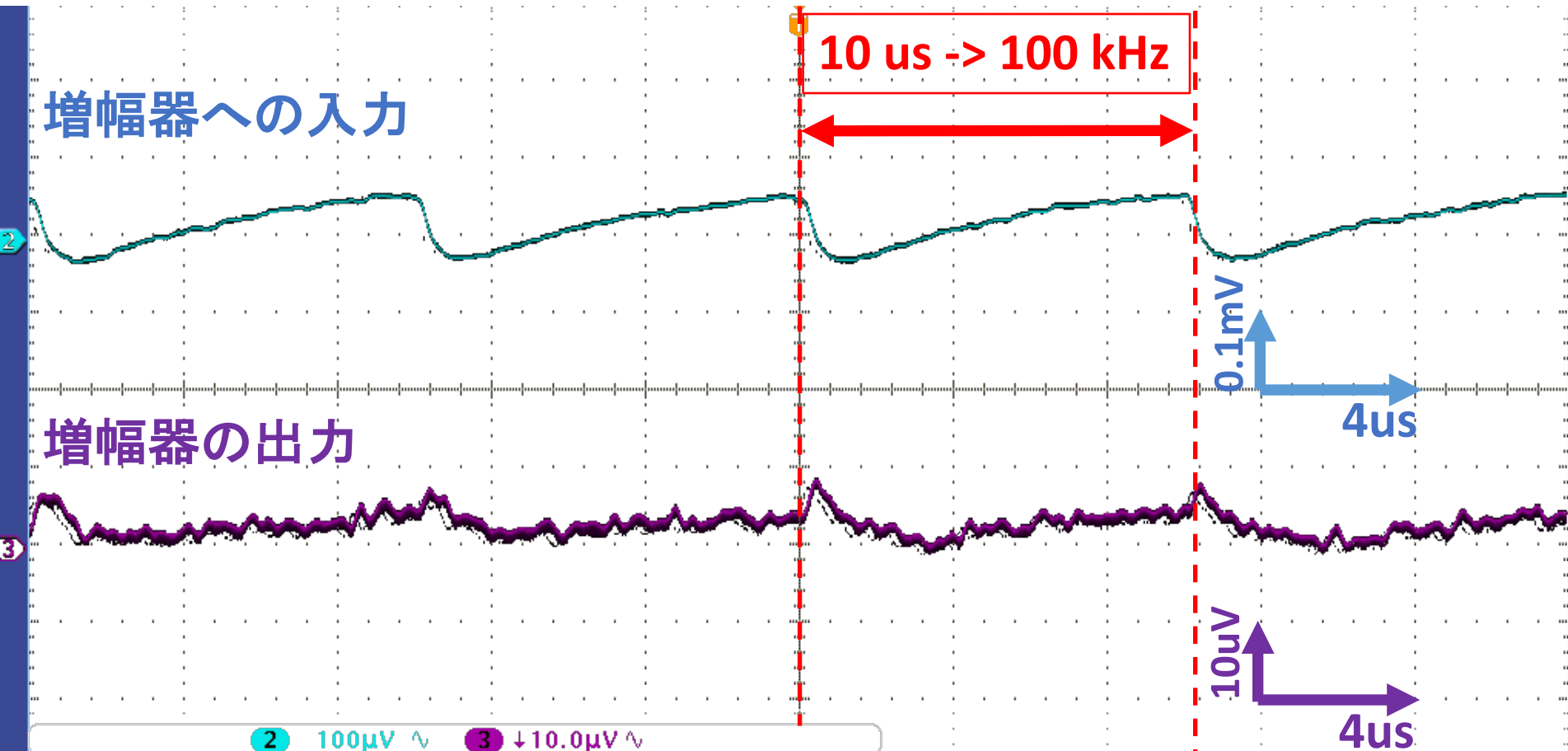
# STJ信号増幅試験

- STJにDC電圧を印加した状態でレーザー照射を行う
- STJ信号がSOI増幅器の方へ伝送されているか、また、伝送された信号が増幅されているか検証する



# STJ信号増幅試験

レーザー(波長 : 465nm パルス幅 : 59ps)出力 : 100 kHz に対する応答



□ STJ信号がSOI増幅器の方へ伝達していることを確認

□ しかし、SOIの出力は入力に比べ減衰

□ バッファ段が正常に動作してなかったのが発覚 再度増幅試験を行う予定

# まとめ

- ニュートリノ崩壊光探索のために  
超電導トンネル接合素子光検出器(STJ)と、  
検出器直近で動作可能な極低温前置増幅器(SOI-STJ)  
を開発している
- STJ検出器が動作する300mK環境下において、  
Load Cap. 0.5nF、入力信号 1MHz sin波に対して利得30を獲得
- SOI-STJ4増幅器を用いて冷凍機内から信号を読み出すことで、  
信号が向上することを確認
- STJとSOI-STJ4を同時に動作させ、STJに光を入射  
その結果、SOIの方に信号伝達したことを確認
- 今後、再度STJ信号をSOI-STJ4を用いて増幅試験を行う予定

# BACKUP

---

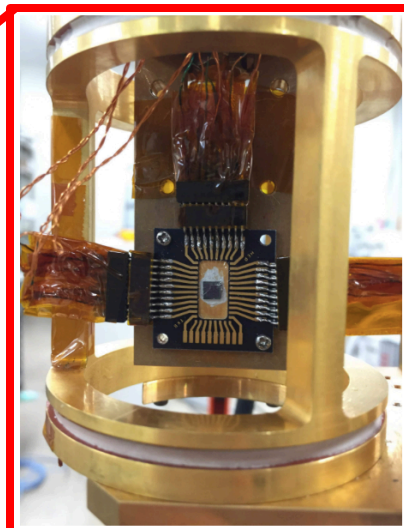
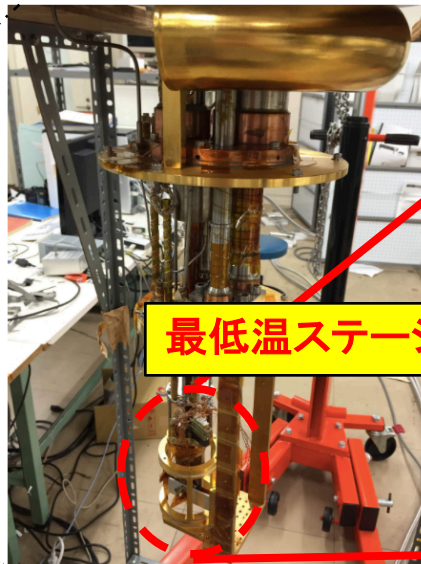


# 冷凍機のスペック

He3 Sorption冷凍機  
(Oxford Instrument製)



中を見ると

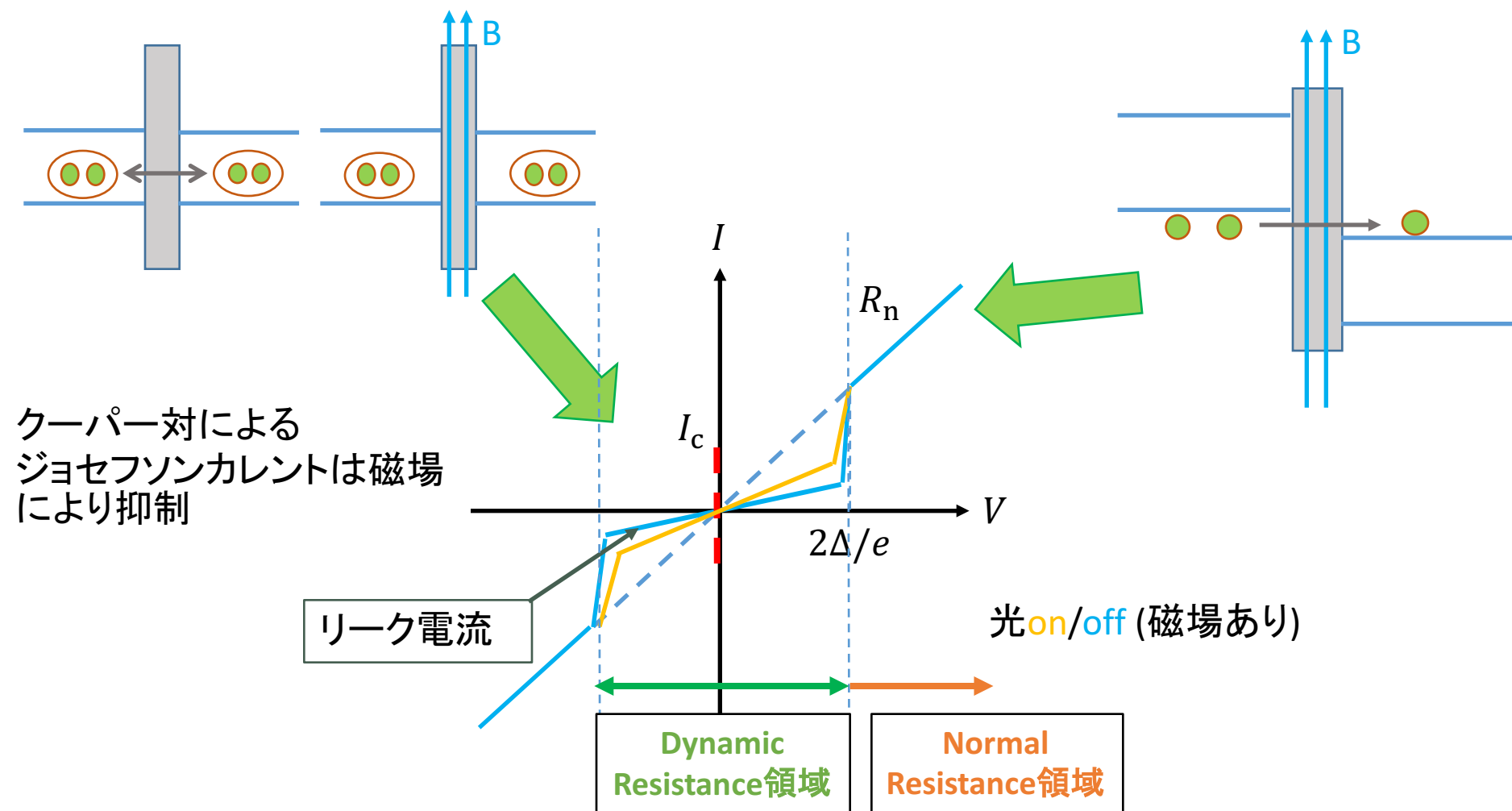


各ステージには  
熱輻射を防ぐために  
シールドがある

He<sup>3</sup>減圧冷凍機 冷却能力一覧

ステージ	最低到達温度[K]	冷却能力
60Kステージ	60	25W @65K
3Kステージ	2.8	0.7W @4.2K
最低温ステージ	0.3	100uW @350mK

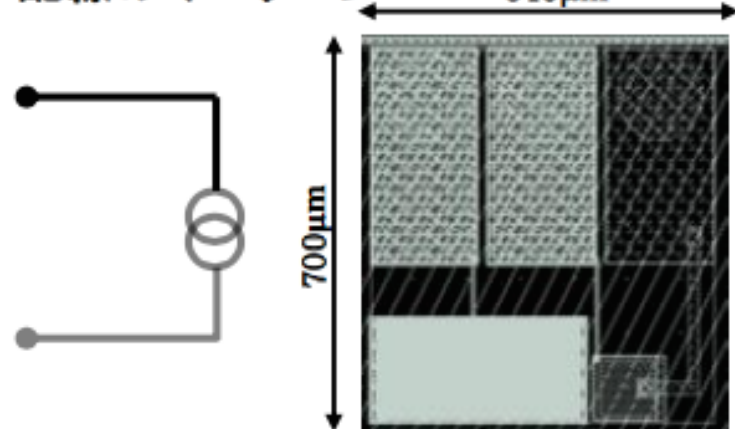
# STJ 電流・電圧特性



# SOI-STJ1

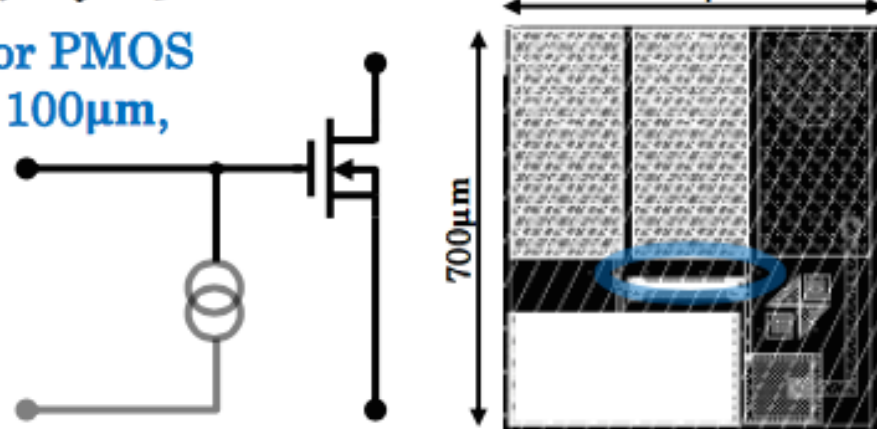
## SOI-STJ1 回路図

### 配線のみパターン



### FET込のパターン

NMOS or PMOS  
 $W=10 \times 100 \mu\text{m}$ ,  
 $L=1 \mu\text{m}$



## □ 配線のためのパターンでSOIウエハ上にSTJが正しく形成された

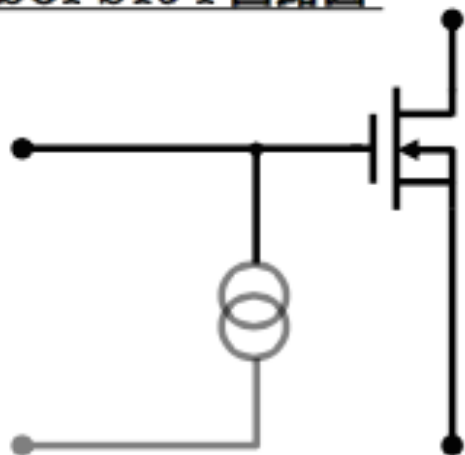
- ✓ Siウエハ上に生成したSTJ特有のI-V特性
- ✓ 456nmの可視光に対する光応答

## □ FET込みのパターンでFETの極低温環境下での動作を確認

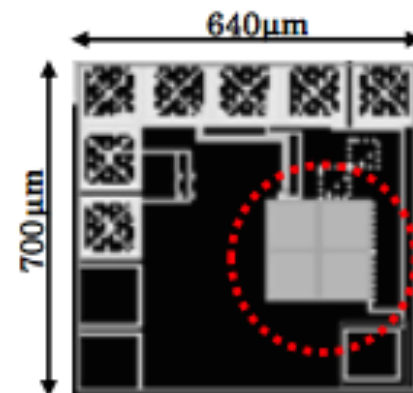
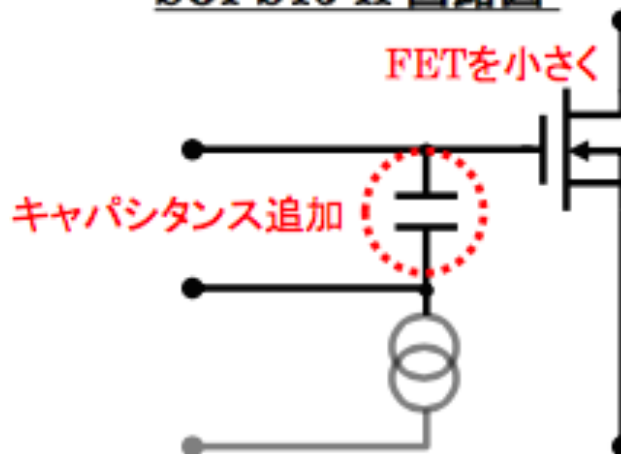
- ✓ SOI-FETの800mK以下での動作を確認

# SOI-STJ2

SOI-STJ I 回路図



SOI-STJ II 回路図

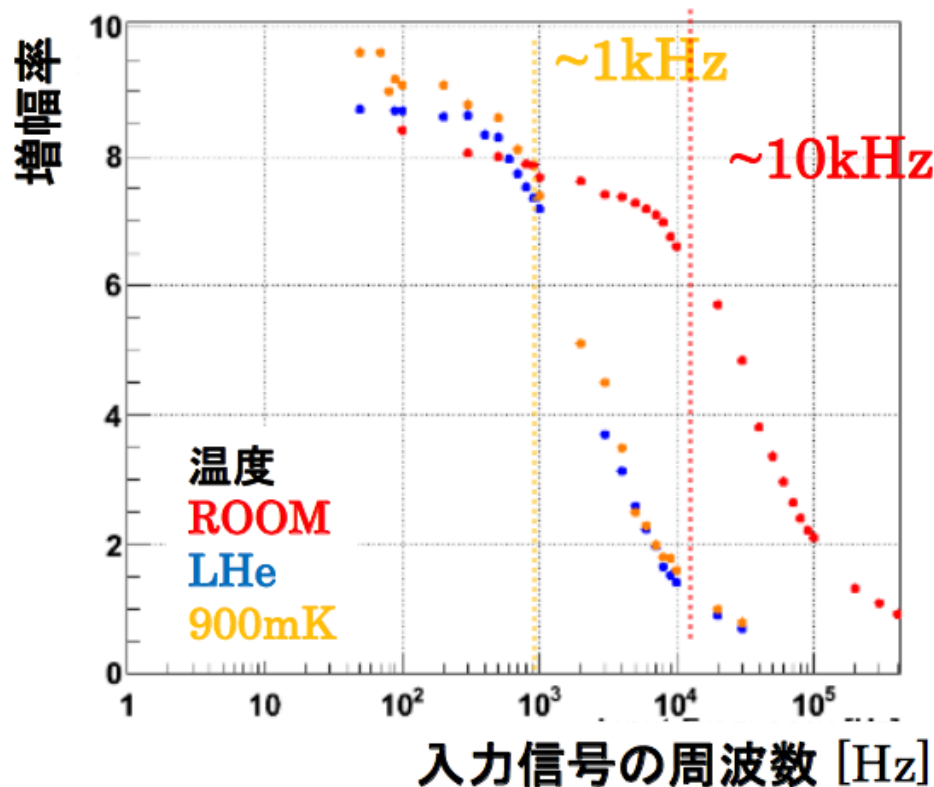


## SOI-STJ1での問題点をSOI-STJ2で解消

1. STJと回路層のそれぞれのバイアスを独立に印加することができない  
➤ STJと回路層の間にキャパシタンスを追加
2. FETのゲートキャパシタンスが大きく、STJの電荷を増幅することができない  
➤ FETのサイズを小さくする

# SOI-STJ2 問題点

## 増幅率の周波数依存性



- 周波数特性を測定
  - 数kHz程度までしか増幅不可 (STJ信号幅 : 数~10 usec)
  - ✓ [要求] MHz帯域まで対応 !

## SOI-STJ2の問題点

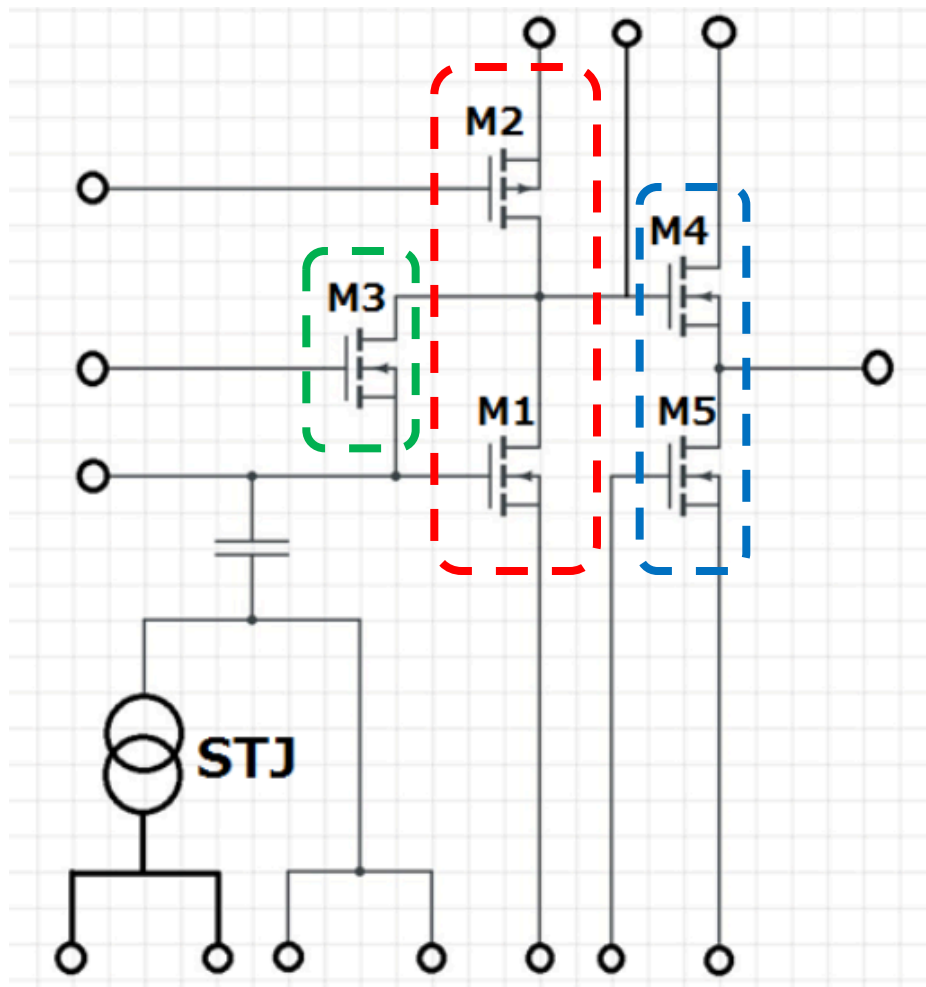
### □ 周波数帯域が狭い

増幅段のみでは、出力インピーダンスが高く、冷凍機配線などの高容量負荷がかかった状態で、高周波数での応答が得られない

### □ 負荷抵抗に限界がある

利得を稼ぐには高抵抗を用意  
ただ、それに伴い供給電圧も上昇  
SOI-FETの耐電圧を超えてしまう

# SOI-STJ3



## □ ソース接地増幅回路

- 抵抗負荷を飽和領域で動作するMOSFETに置き換える

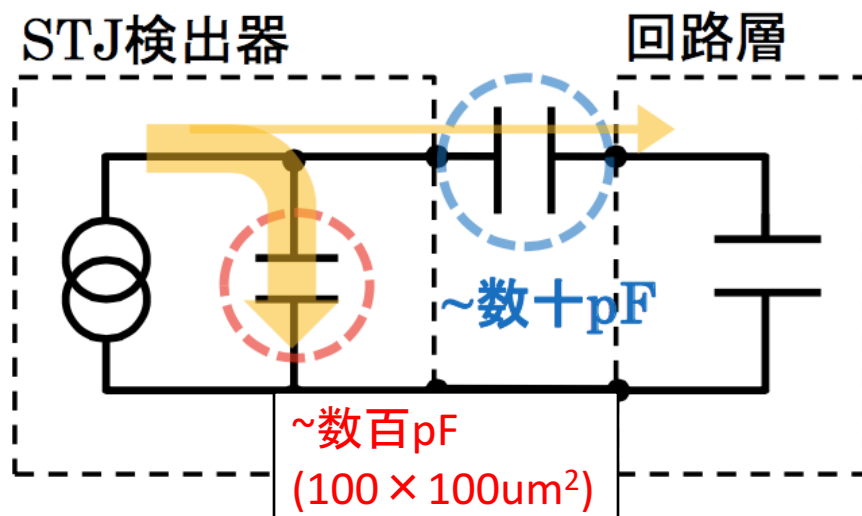
## □ フィードバック

- ソース接地回路の入出力間に可変抵抗としてMOSFETを導入  
バイアス電圧の安定化を図る

## □ ソースフォロワ

- 出力インピーダンスの低下

# SOI-STJ3の問題点



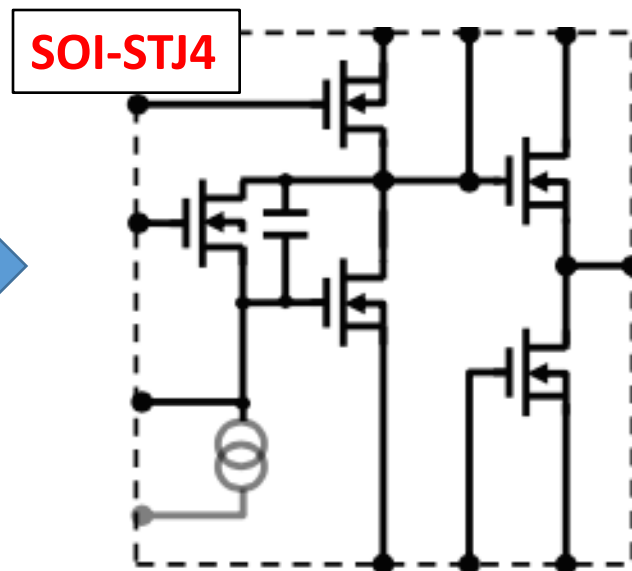
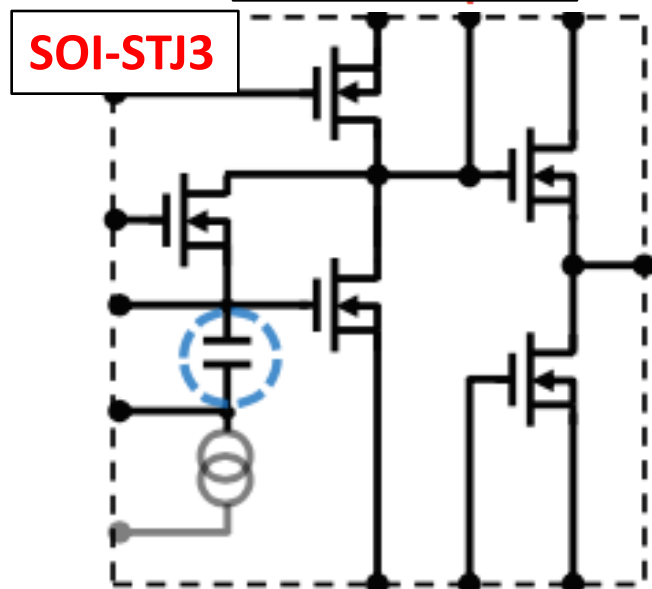
STJの静電容量 : 数百 pF

回路層の静電容量 : 数十 pF

➤ 回路層への信号入力が妨げられる !

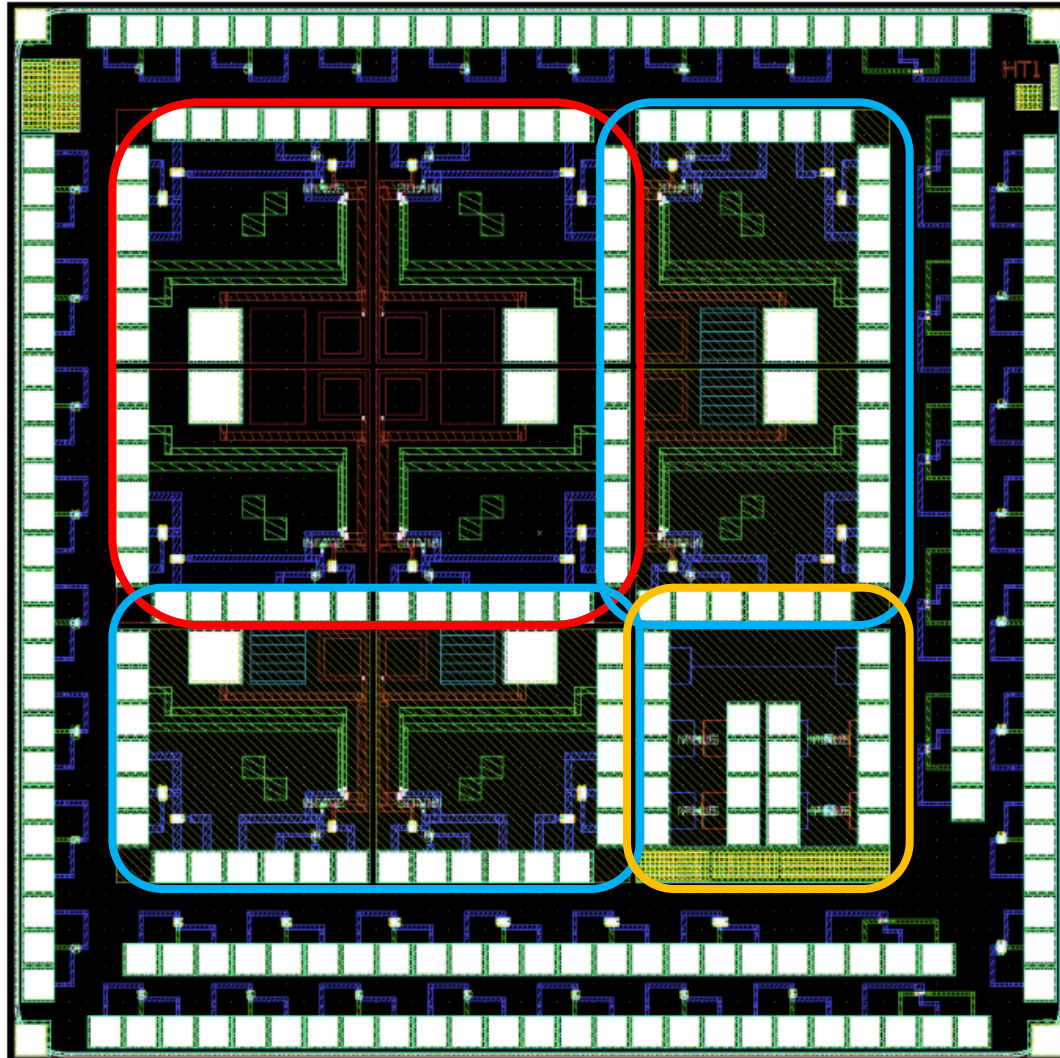
□ 回路層の静電容量を大きくするために  
カップリングコンデンサを除去

□ 増幅段を積分型に変更





# [SOI-STJ4] レイアウト



## □ TypeA

増幅段とバッファ段が一体型

## □ TypeB

増幅段とバッファ段が別  
それぞれ個別に性能評価を  
行った(先崎修論)

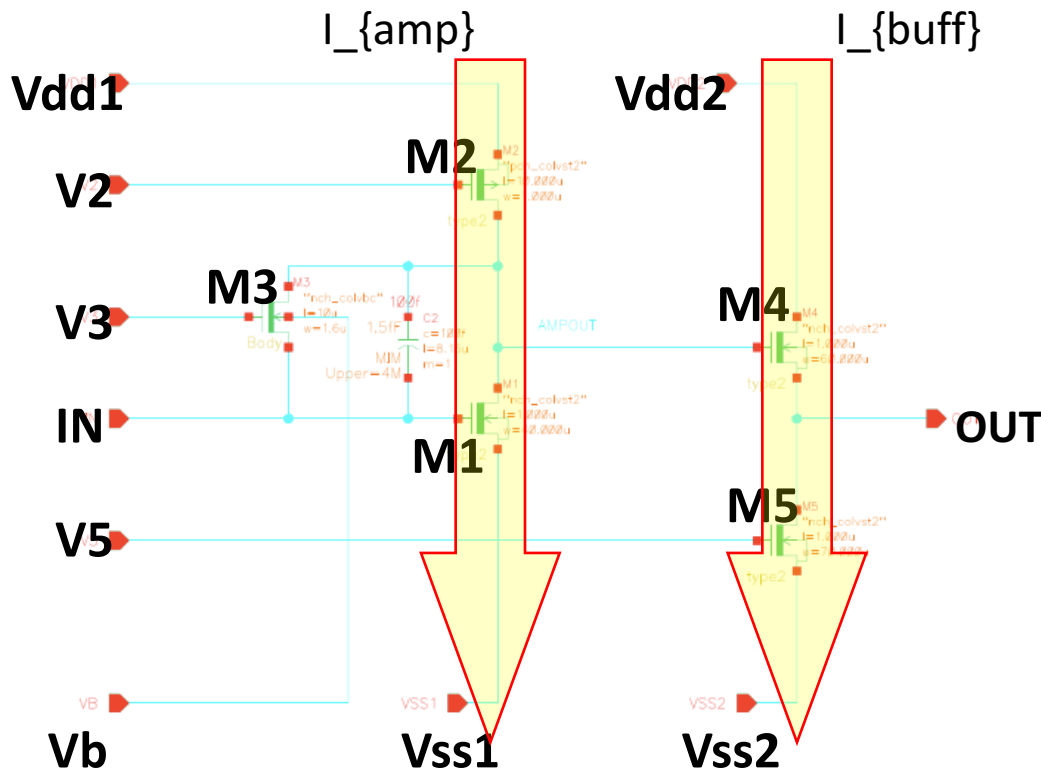
## □ Cap. + Resi.

各素子の低温特性を評価



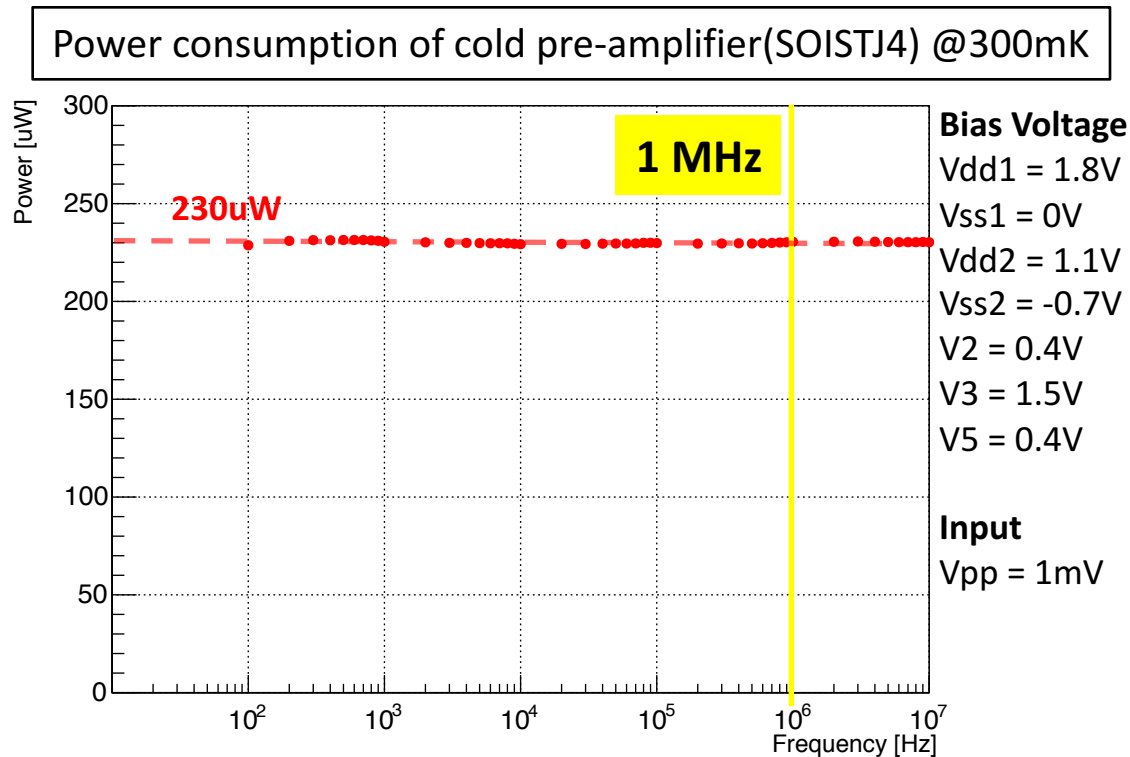
# 消費電力

利得の周波数依存性についての測定の最中、  
測定前に300mKだったのが、測定後700mK程度にまで温度が上昇している  
これを受けて、周波数特性を測定する際の消費電力を計算



- 各FETのGate電流は Drain電流に比べ微小であるため、無視
- Vdd、Vss間に流れる電流値は、Vdd側でしかモニターしていないため、例えば、電流がGND側に流れてしまっている可能性もある。

# 消費電力



- バッファ段 : ~120uA  
増幅段 : ~3uA  
バッファ段の消費電力が支配的
- 増幅段とバッファ段、それぞれの消費電力を足し合わせると、230uW
- 測定開始時のHe3potは、300mKであったのに対し、測定終了時の温度は、700mK程度まで上昇