

ニュートリノ崩壊からの遠赤外光探索のための SOI-STJ検出器の研究開発

日本物理学会 第70回年次大会
(佐賀大学)

講演番号 19pSG-4

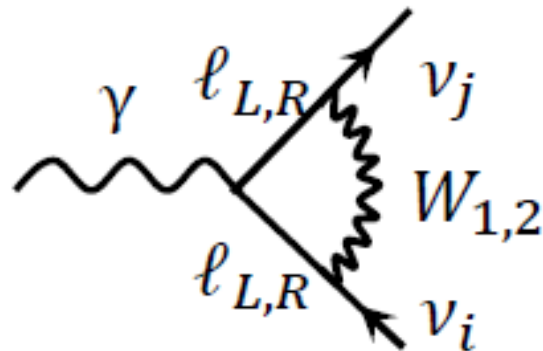
筑波大数理^A, 理研^A, KEK^B, 岡山大^C, JAXA^D, 総研大^E, Fermilab^F,
福井大^G, 近畿大^H

先崎蓮, 金信弘, 武内勇司, 武政健一, 笠原宏太, 奥平琢也, 市村龍哉, 金丸昌弘,
森内航也

佐藤広海^A, 美馬寛^A, 羽澄昌史^B, 新井康夫^B, 石野宏和^C, 松浦周二^D,
池田博一^D, 和田武彦^D, 長勢晃一^E, Erik Ramberg^F, 吉田拓生^G, 加藤幸雄^H

Motivation

ニュートリノ崩壊のFeynman図



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

ニュートリノ振動 \Rightarrow 質量2乗差

ニュートリノの絶対質量は求まっていない

ニュートリノ崩壊

- 崩壊光のエネルギーを精度よく測定出来れば
ニュートリノ質量を決定できる

$$E_{\gamma} = \frac{m_3^2 - m_2^2}{2m_3}$$

ニュートリノ振動実験から

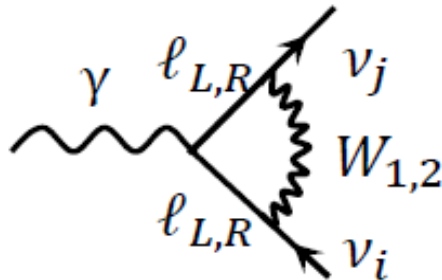
精度よく測定

$m_3 = 50\text{meV}, m_2 = 10\text{meV}$ とすると...

$$E_{\gamma} = 25\text{meV}(\sim 50\mu\text{m})$$

- \Rightarrow 高エネルギー分解能を持つSTJ検出器の開発

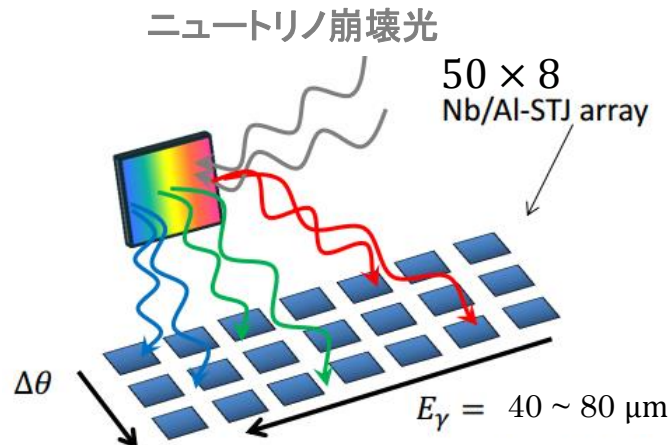
Motivation



ニュートリノ崩壊の寿命

- ニュートリノの寿命はL-R対象模型を仮定しても $\geq O(10^{17} \text{ year})$
- 標準模型では $\sim O(10^{43} \text{ year})$
- \Rightarrow 宇宙背景ニュートリノの探索

ニュートリノ崩壊光探索の概要図

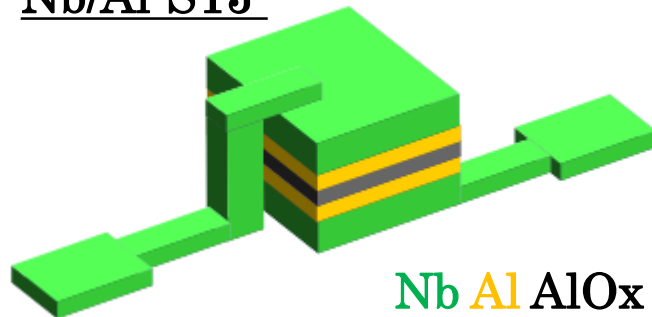


Nb/Al-STJ+回折格子で宇宙空間の遠赤外光スペクトルを測定予定

- ロケットに検出器、冷凍機を搭載して打ち上げ
- 40~80 μm の遠赤外光を分光
- 1photonカウント可能なNb/Al-STJ arrayでエネルギースペクトルを測定

Nb/Al-STJ

Nb/Al-STJ



生成準粒子数

$$N_q = G_{Al} E / 1.7 \Delta$$

E=25meVの光子に対しては

$$N_q = 95e^- @ G_{Al} \sim 10$$

STJ(Superconducting Tunnel Junction)

- 超伝導体/絶縁膜/超伝導体のジョセフソン接合素子
- 光子の入射によって生成された準粒子のトンネル電流を観測
- 高エネルギー分解能

	Si	Nb	Al
T_c [K]	-	9.23	1.20
Δ [eV]	1100	1.550	0.172

Nb/Al-STJで、遠赤外光1photon測定には至っていない

- 冷凍機外への長い配線からのノイズが原因と考えられる

⇒ 冷凍機内(<3K)で動作する低温アンプの導入 (SOI-STJ, HEMT Amp)

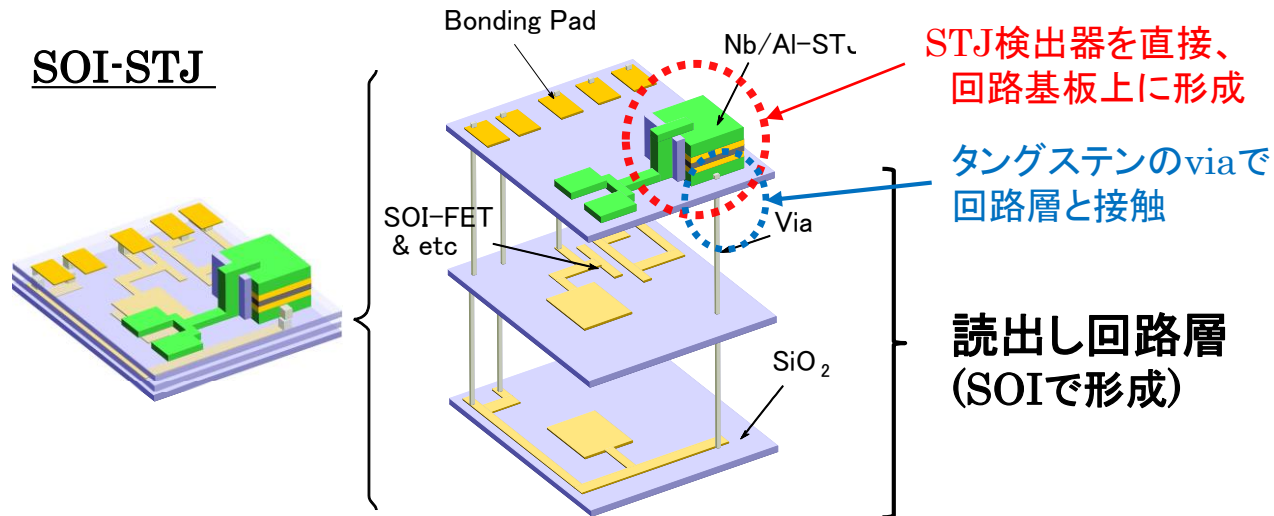
SOI-STJ

SOISTJ

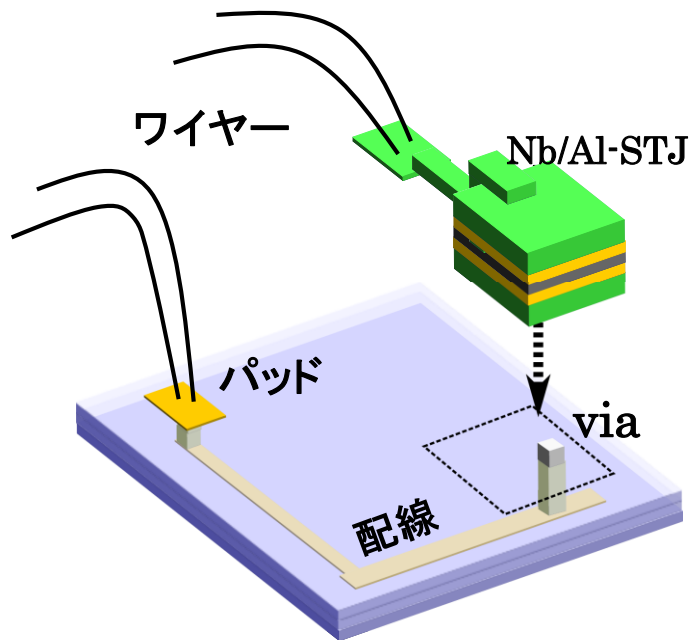
- SOI技術で形成された読出し回路基板上に直接STJを形成する読出し回路一体型の検出器

利点

- STJからの読出し配線が不要
- よいS/N比
- STJのArray化にも対応



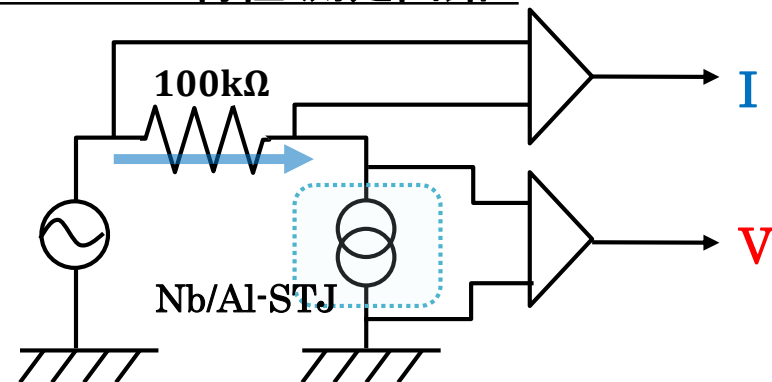
SOI基板上に作成したSTJ



Via, 配線, 読出しパッドのみを形成したSOI基板上に直接 $50 \times 50 \mu\text{m}^2$ Nb/Al-STJを形成

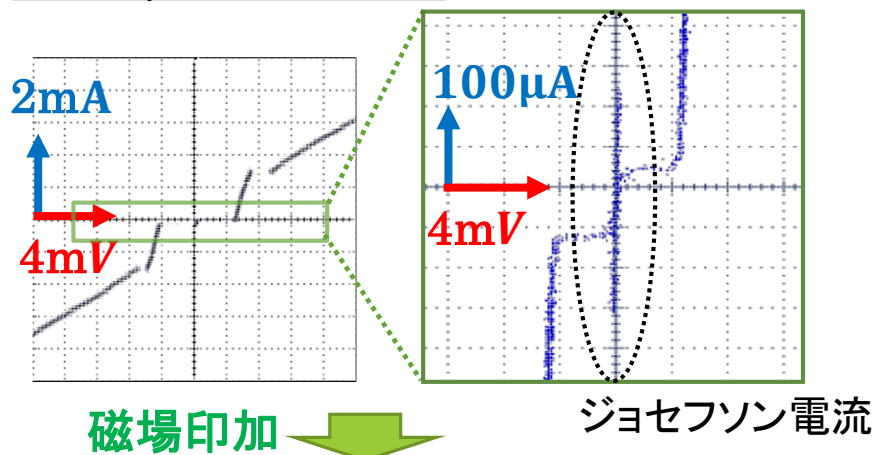
SOI基板上に形成したSTJのI-V特性を評価した

STJのI-V特性 測定回路

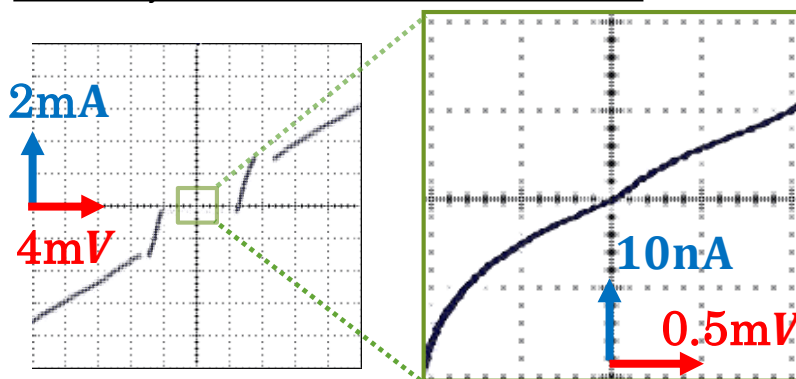


SOI基板上に作成したSTJ

$50 \times 50 \mu\text{m}^2$ SOI-STJ I-V



$50 \times 50 \mu\text{m}^2$ SOI-STJ I-V @35 Gauss



ジョセフソン接合素子特有の
I-V特性を確認

磁場の印加でジョセフソン電
流が消失することを確認

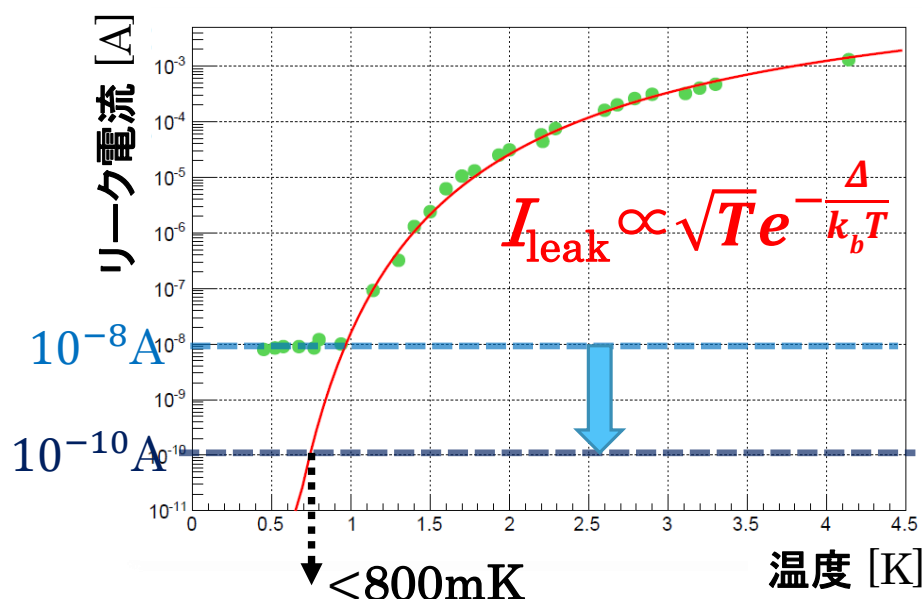
リーク電流 $\sim 6\text{nA}@0.5\text{mV}$

- Siウェハ上に形成した
Nb/Al-STJ($100 \times 100 \mu\text{m}^2$):
リーク電流 $\sim 10\text{nA}@0.5\text{mV}$

Siウェハ上に形成したSTJと
ほぼ同様のクオリティを持つ
ことを確認

SOI回路層への要求

Nb/Al-STJ ($100 \times 100 \mu\text{m}^2$)のリーク電流の温度依存



STJで遠赤外光1photonを 3σ 以上で観測

- リーク電流 $< 10^{10} \text{ A}$

リーク電流

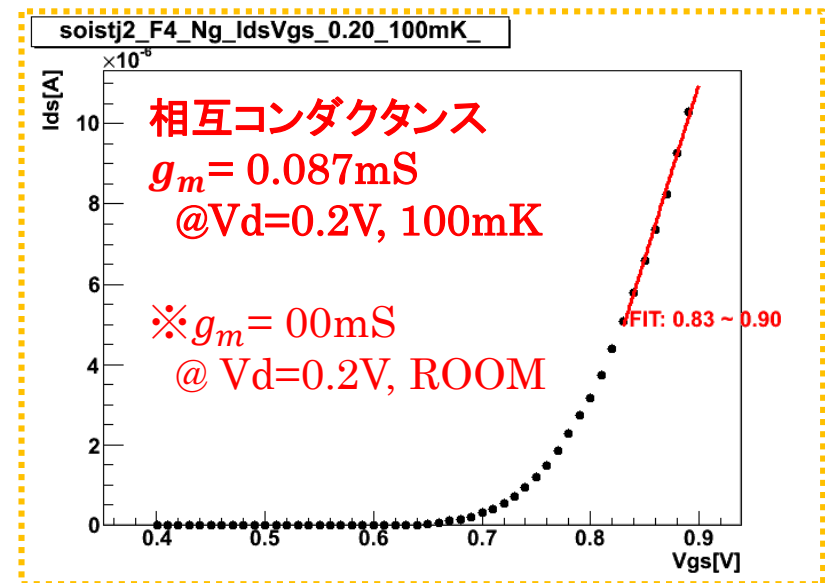
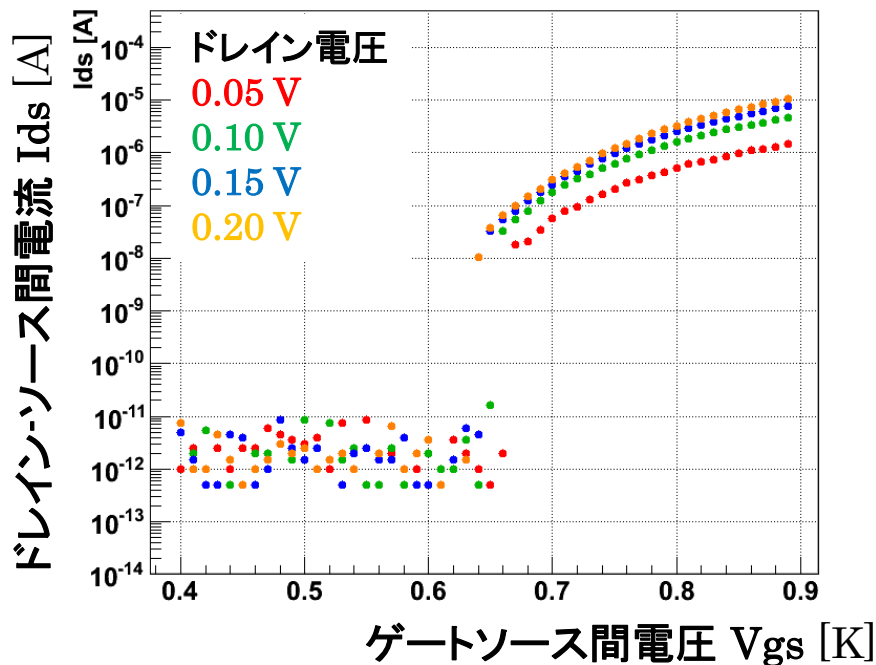
- 熱励起起因
- 温度を下げることで抑制
- 不完全なジャンクション起因
- ジャンクションサイズを小さくすることで抑制(検証中)

リーク電流の要請から800mK以下で回路層が動作することが必要

SOI回路層への要求

FETの低温でのI-V特性

W/L=4 μ m/1 μ m ,NMOS S-tie type I_{ds} - V_{gs} @100mK



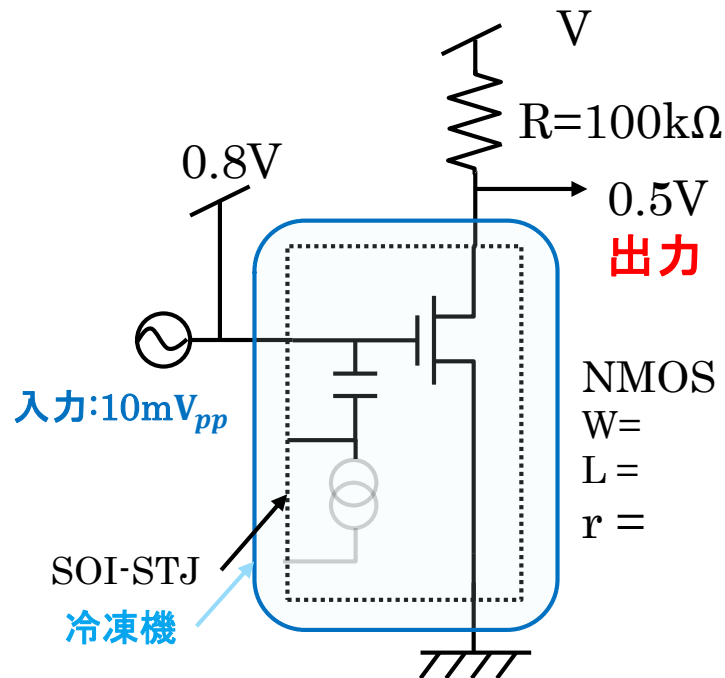
800mK以下でMOSFETのI-V特性が確認できた

相互コンダクタンスも室温時に比べ大きな変化はなく、増幅器として導入可能

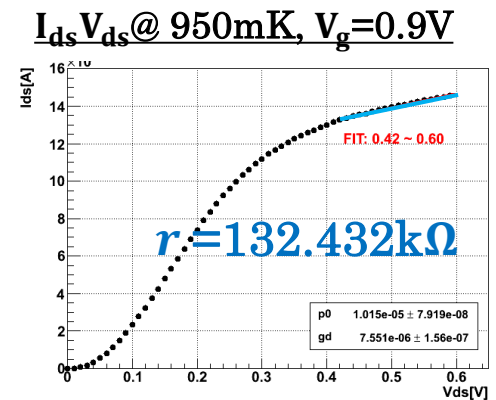
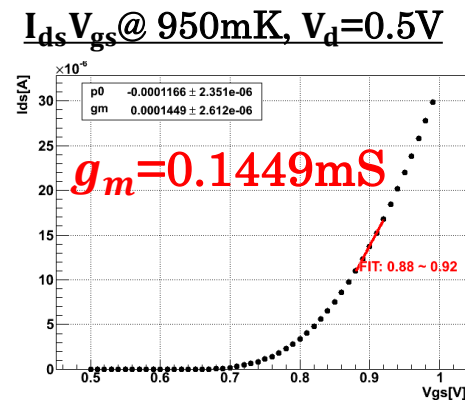
SOI回路層への要求

低温での増幅回路としての動作

測定回路



SOI-FETを用いてソース接地型の増幅回路を組み、ファンクションジェネレーターからの信号を増幅させた

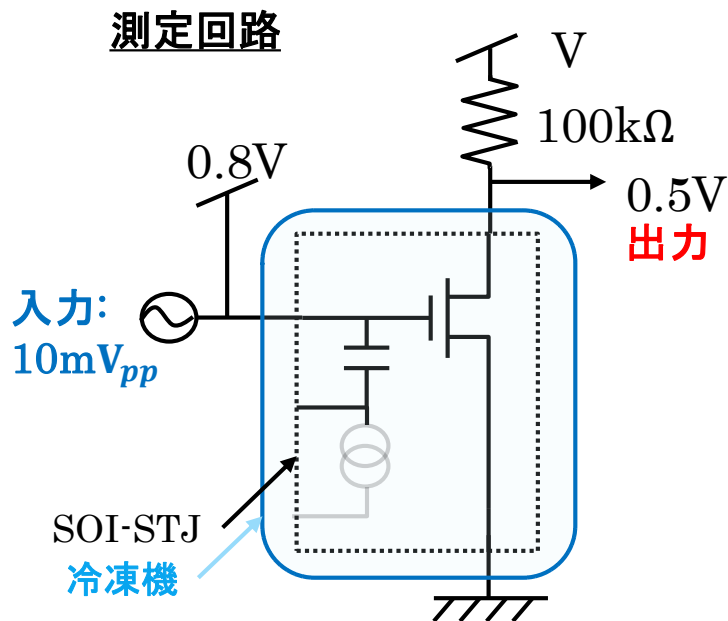


予想される増幅率は

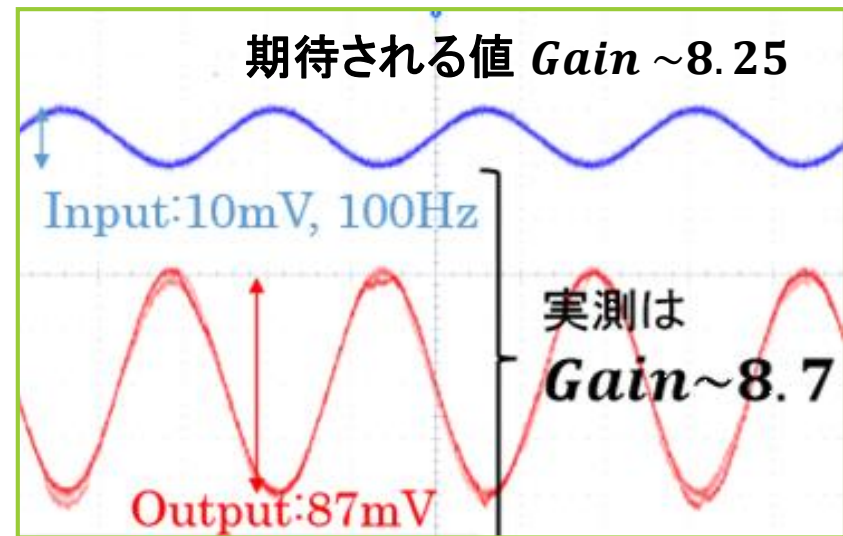
$$Gain = g_m(R || r_o) \sim 8.25$$

SOI回路層への要求

低温での増幅回路としての動作



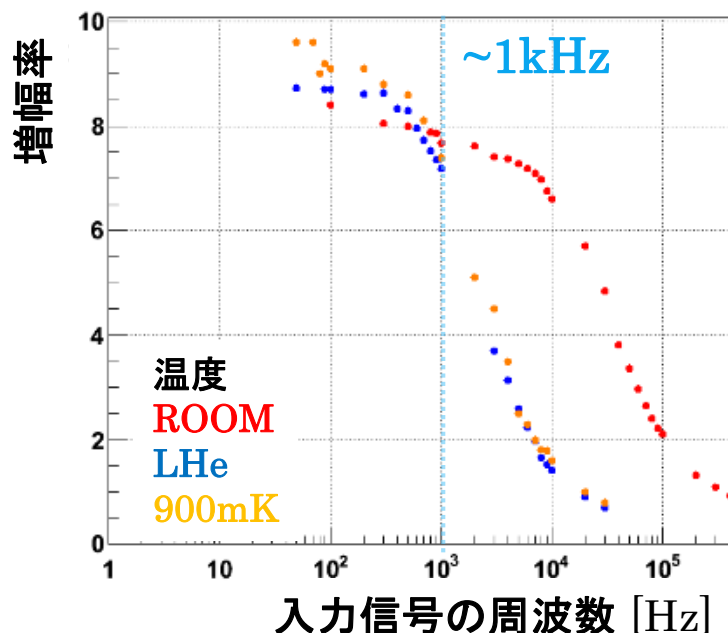
測定された波形



期待された通りの信号増幅を確認した。

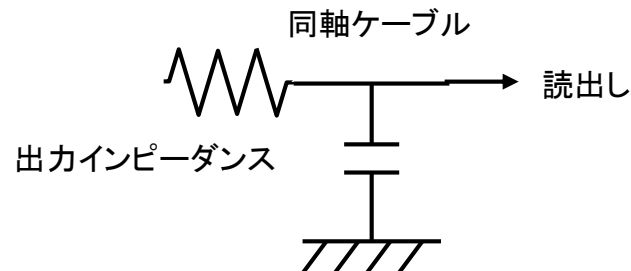
バッファ回路の導入

増幅率の周波数依存性



しかしながら、周波数応答は $\sim 1\text{kHz}$

- 出カインピーダンスが数百 $\text{k}\Omega$ と高いため同軸ケーブルで読み出そうとすると周波数応答が悪くなる

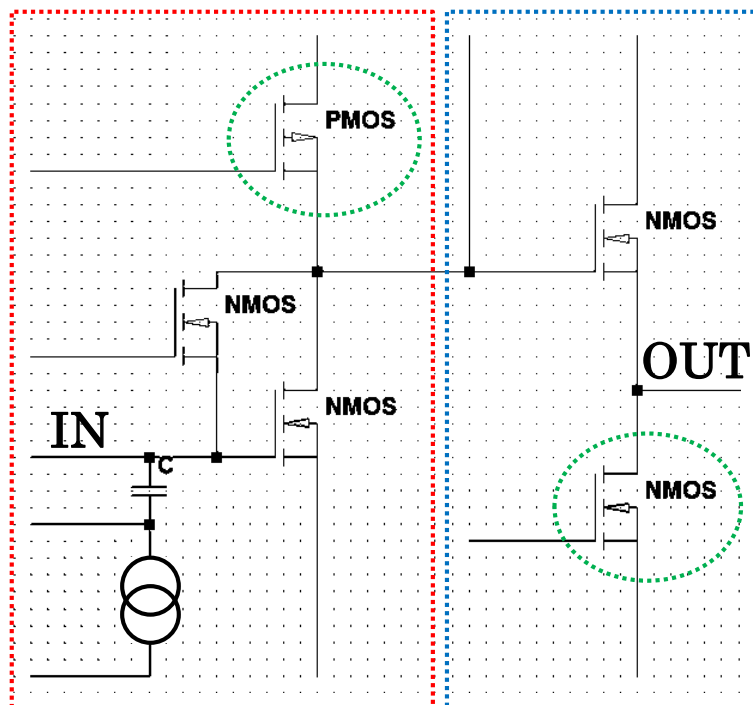


STJの信号幅は数 μs

- $\rightarrow \sim \text{MHz}$ の周波数応答が必要

\Rightarrow 出カインピーダンスを下げるため、バッファ回路を導入する必要

バッファ回路の導入



増幅段

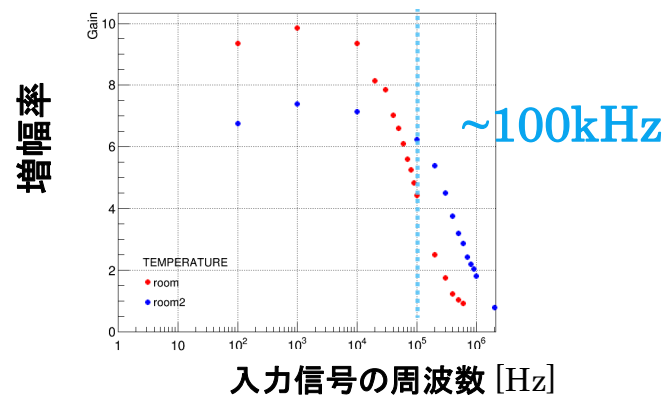
バッファ段

負荷抵抗の代わりにFETを用いる

- 高抵抗→高い増幅率
- バias電圧をFETの耐圧以下で使用可
- → 省電力

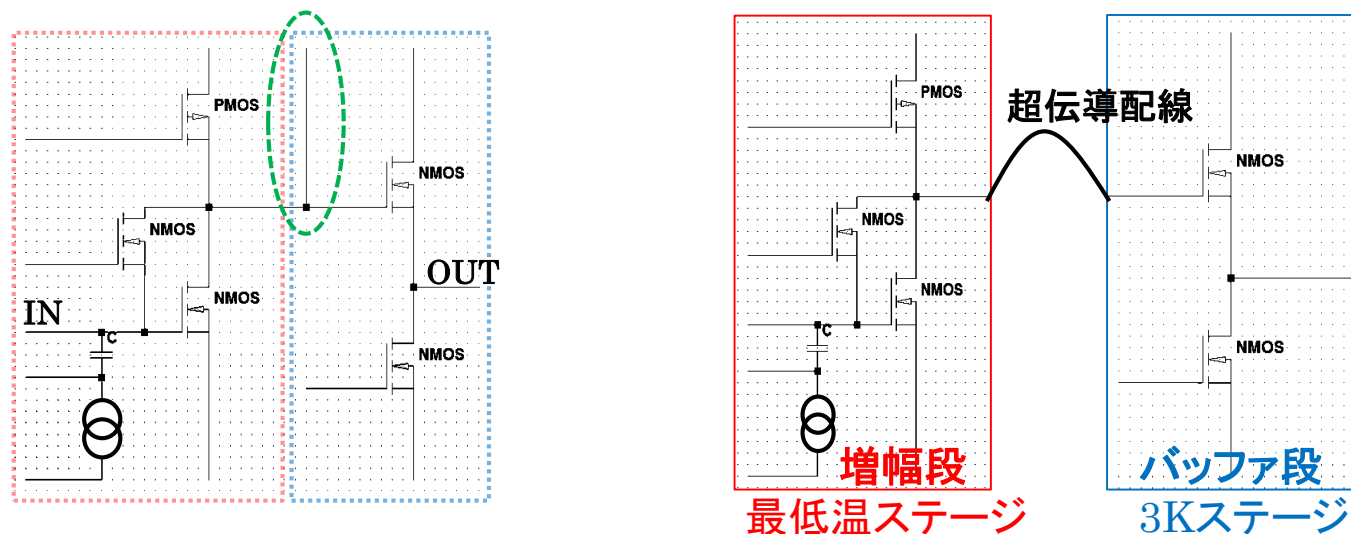
バッファ段で出力インピーダンスを下げる

増幅率の周波数依存性 @ROOM



室温での周波数応答の改善を確認、今後、低温での評価を行う

今後



増幅段、バッファ段間の配線等を取り除き、寄生容量を減らす
増幅段、バッファ段を分け、それぞれ冷凍機の別ステージに設置

産総研と共同研究を開始。産総研に歩留りの良いNb/Al-STJの作成を依頼

- STJを含めた読出し回路一体型検出器としての評価する予定

まとめ

ニュートリノ崩壊光探索のため、波長 $50\mu\text{m}$ の遠赤外1光子を測定可能なNb/Al-STJの開発を行っている

現在、Nb/Al-STJでの1光子観測には至っておらず、冷凍機内で動作する検出器一体型の極低温アンプ(SOI-STJ)の開発を行っている

800mK以下の極低温でSOI-FETが動作することを確認した

STJからの信号増幅のため、バッファ回路を導入し周波数応答の改善を図る

今後は歩留りのよいSTJを導入し、STJと回路層を同時に動作させ、検出器一体型のアンプとしての評価を行う

Buck up

Nb/Al-STJの分解能

Nb/Al-STJの分解能

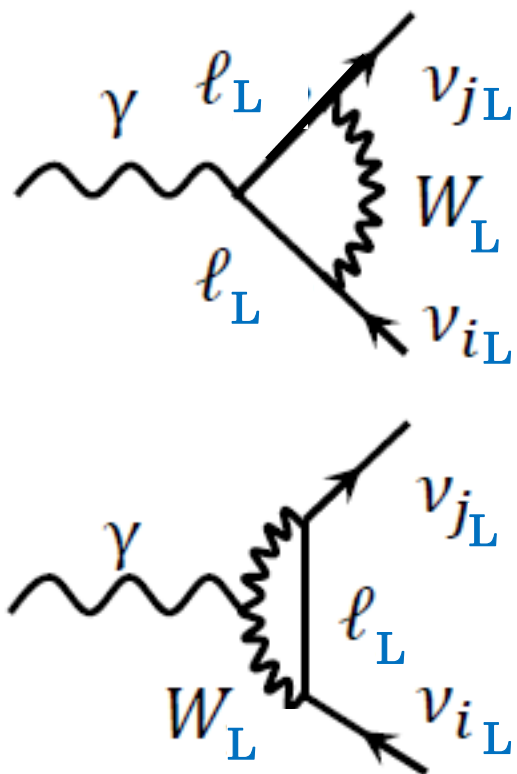
$$\delta E_{\text{FWHM}} = 2.35\sqrt{(1.7\Delta)FE}$$

- $E = 25\text{meV}$ の光子に対して

$$\begin{aligned}\frac{\delta E_{\text{FWHM}}}{E} &= 2.35\sqrt{\frac{(1.7\Delta)FE}{E}} \\ &= 22\%\end{aligned}$$

ニュートリノ崩壊

ニュートリノ崩壊のFeynman図



ニュートリノと光子の相互作用:磁気モーメント

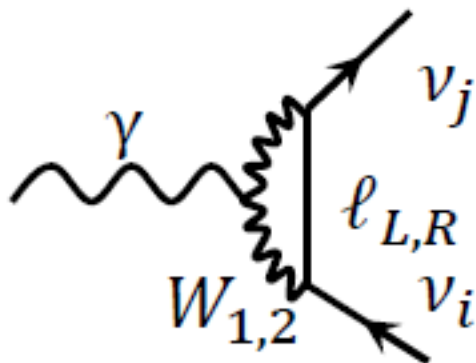
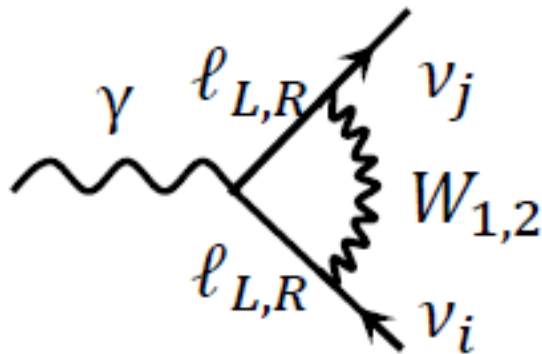
標準模型では

- W は左巻きカイラリティのみ
→ 始(終)状態のニュートリノ:左巻き
→ 磁気モーメントの寄与: $\bar{\nu}_j i \sigma_{\mu\nu} q^\nu \nu_i = 0$
- ニュートリノ質量項も小さい

⇒ 崩壊の寿命は $\sim 10^{43} \text{ year}$

ニュートリノ崩壊

ニュートリノ崩壊のFeynman図



L-R対象模型($SU(2)_L \otimes SU(2)_R \otimes U(1)$)

- Wは W_L, W_R の混合状態

$$\begin{pmatrix} W_1 \\ W_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \zeta & -\sin \zeta \\ \sin \zeta & \cos \zeta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} W_L \\ W_R \end{pmatrix}$$

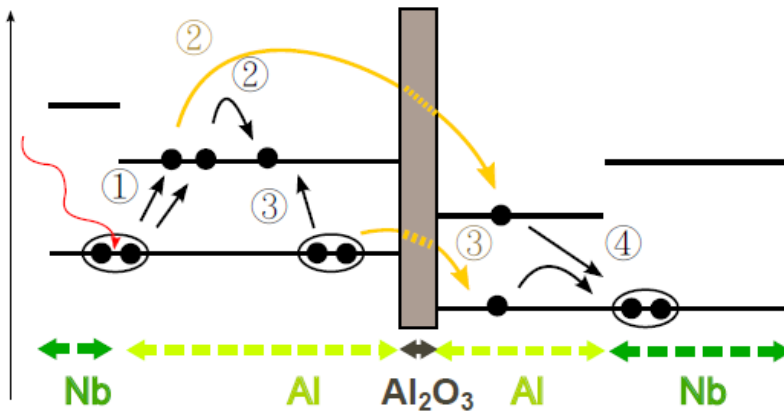
- Wはカイラリティの異なるニュートリノ間を飛べる
- 磁気モーメントの寄与 $\neq 0$
- 荷電レプトンの質量項の寄与

⇒ 寿命は $\sim 10^{17} \text{ year}$

(測定下限値 $M_{W_2} > 1.8 \text{ TeV}/c^2, \zeta < 0.013$)

バックトンネリング

バックトンネリング現象



- ① クーパー対が破壊
 - ② 準粒子は絶縁膜をトンネルし、Al層にトラップされる
 - ③ トラップした準粒子はクーパー対に戻ろうと別のクーパー対を破壊
- これを繰り返すことでトンネル電流が増加

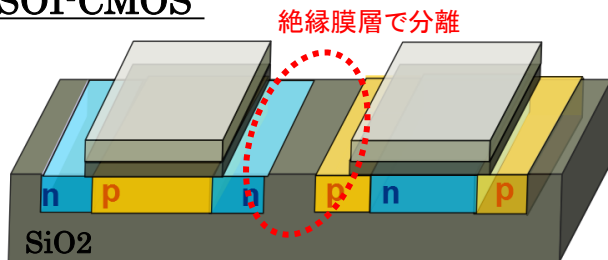
これによる準粒子数の増加率

→ トラッピングゲイン G_{Al}

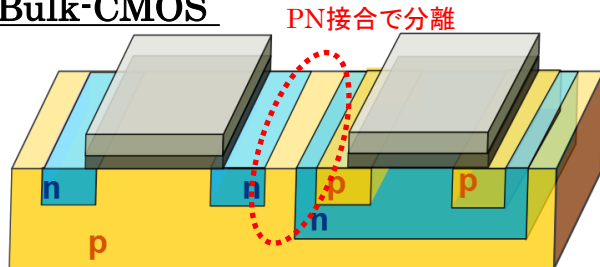
値がどれくらいのものかは正確に測定されていない

SOI

SOI-CMOS



Bulk-CMOS



SOI(Silicon On Insulator)技術

- 酸化膜上に半導体素子を形成する技術
- 素子間は酸化膜層で分離されるため、クロストークが小さく集積化に優れる
- → array化にも対応

JAXAがFD-SOIプロセスで形成されたMOSFETが4Kで動作すると報告

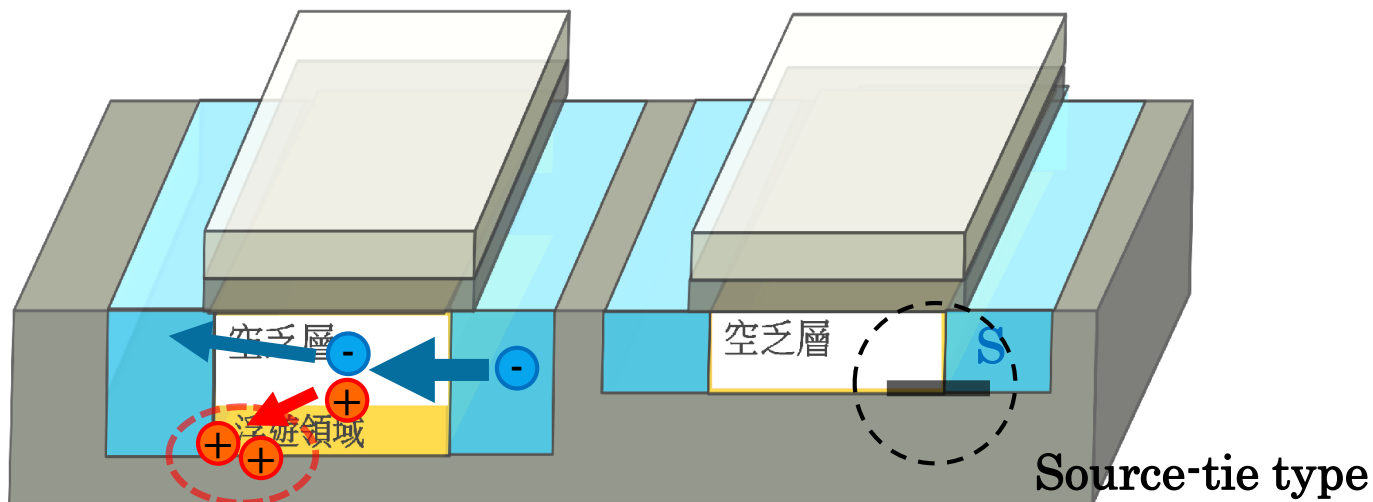
- 極低温下ではキャリアの移動度が上昇
- → 浮遊帯効果など誤作動の原因
- チャンネル層が薄いFD(Full Depleted)-SOIでは上記の誤作動が抑制

⇒ SOI-FETを用いた極低温アンプの導入

FD-SOI

PD(Partially Depleted)-SOI

FD(Fully Depleted)-SOI

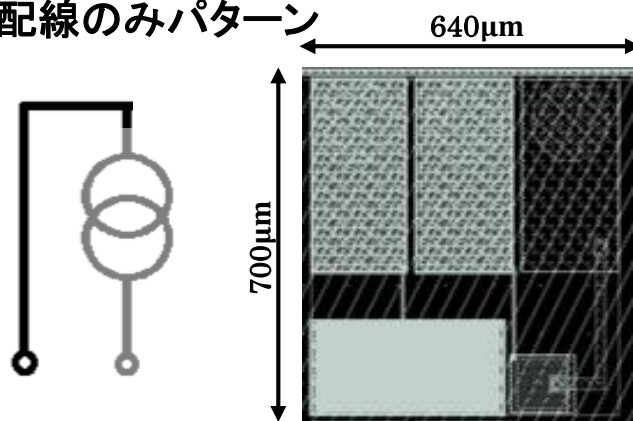


- PD-SOIプロセスではチャネル層が全空乏化せず浮遊領域に電荷が溜まる（浮遊帯効果）
- Body-Sourceを電氣的に接続するsource-tie typeを用いることでbody領域に電荷が溜まることを防ぐ
- Body-tie typeでは弱いヒステリシス特性が見られる(JAXAの報告)

SOI-STJ I

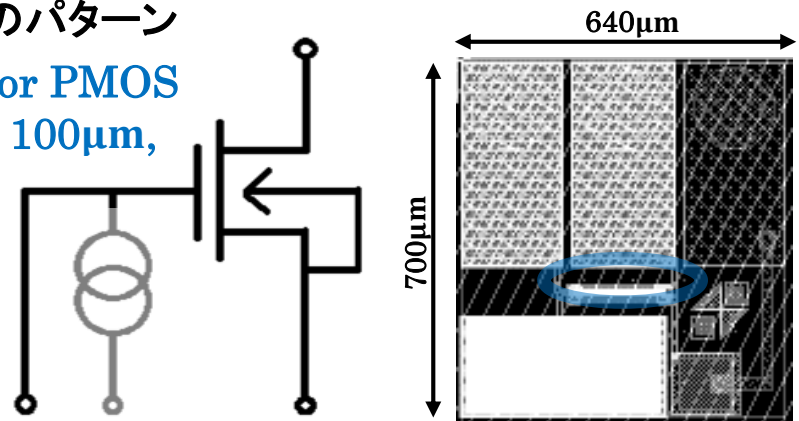
SOI-STJ1 回路図

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ウェハ上のSTJの特性を確認

- Siウェハ上に生成したSTJと同様のリーク電流
- 456nmの可視光に対する光応答も確認

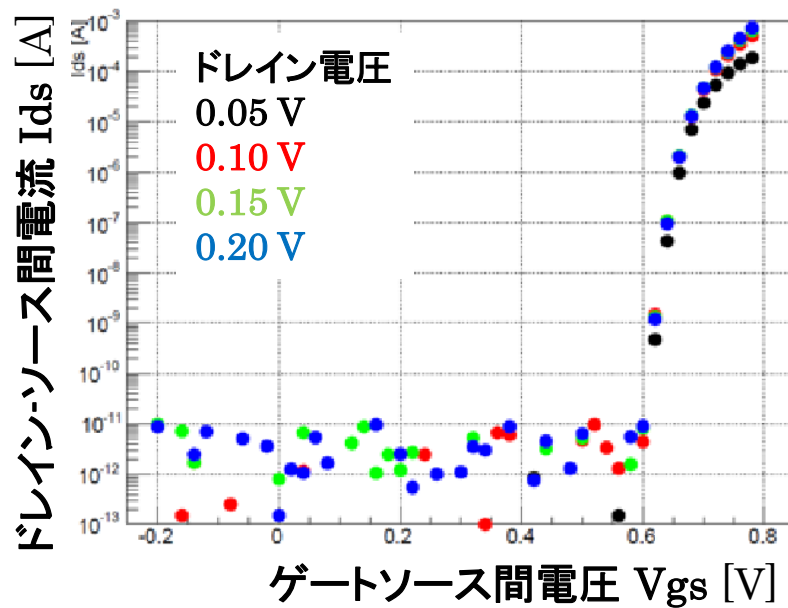
FET込のパターンでFETの極低温の動作を確認

- SOI-FETが800mK以下で動作することを確認

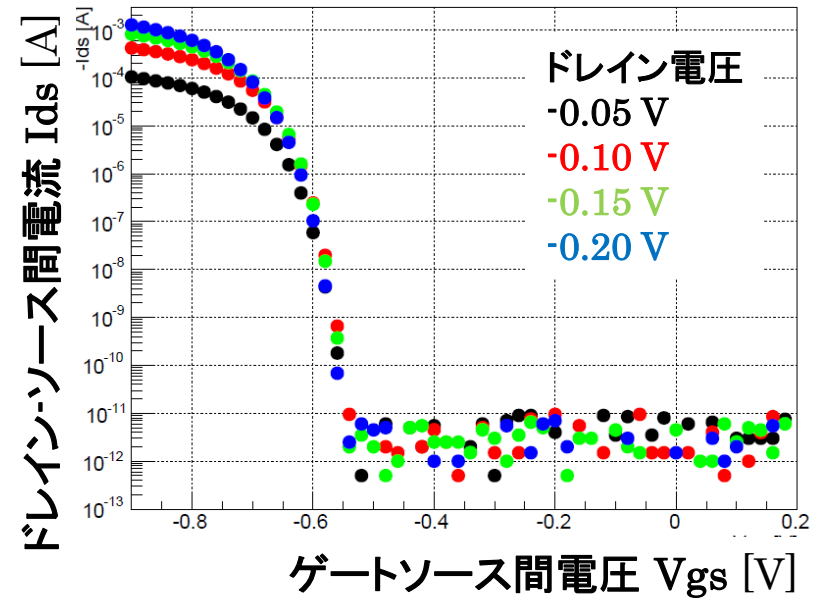
SOI-STJ I

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

NMOS S-tie type $I_{\text{ds}}\text{-}V_{\text{gs}}$ @ 690~720mK



PMOS S-tie type $I_{\text{ds}}\text{-}V_{\text{gs}}$ @ 750mK

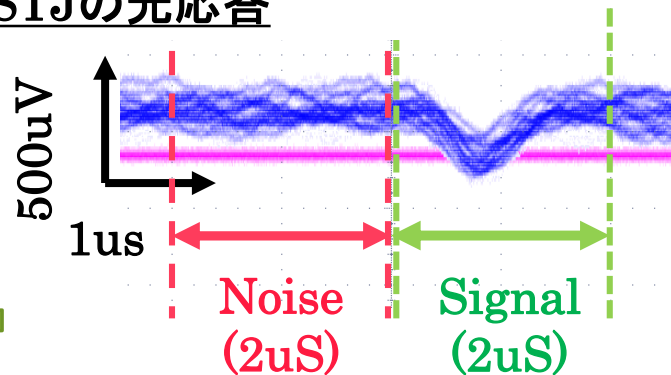


FET込のパターンでFETの極低温の動作を確認

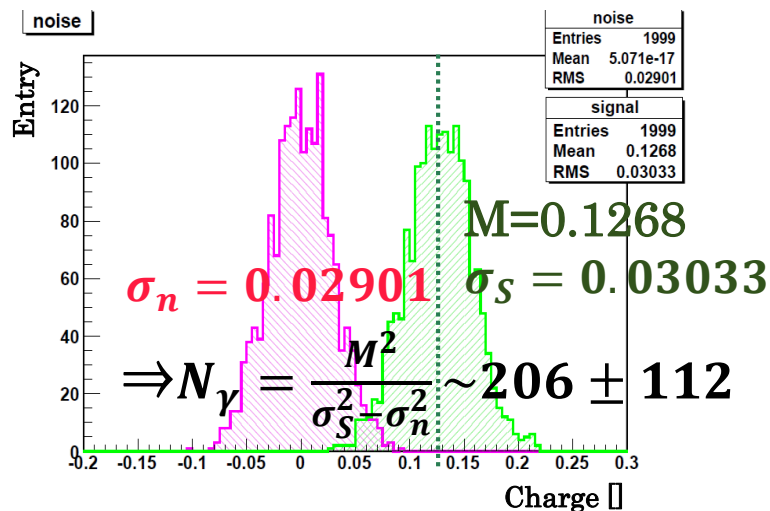
- SOI-FETが800mK以下で動作することを確認

SOI-STJ I

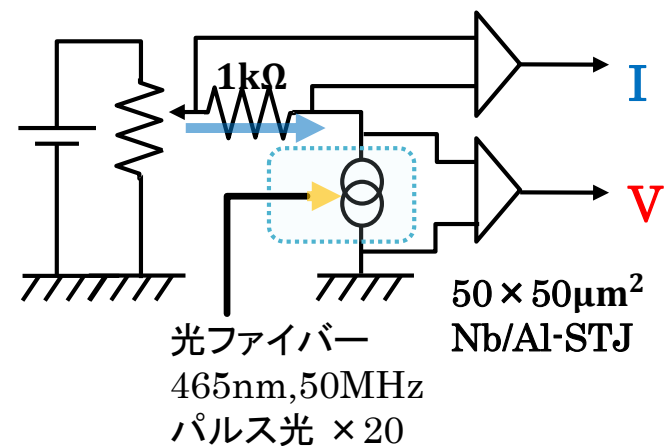
STJの光応答



ADC



STJの光応答 測定回路



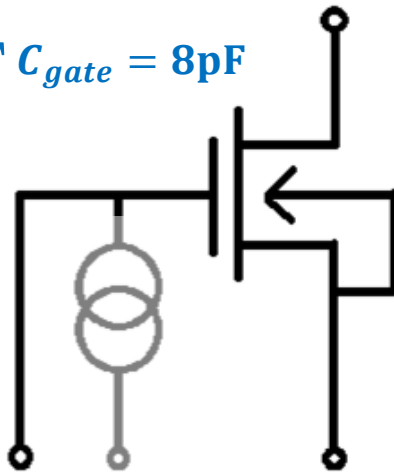
配線のためのパターンでSOIウェハ上のSTJの特性を確認

→ 456nmの可視光に対する光応答も確認

SOI-STJ I

FET込のパターン

FET $C_{gate} = 8\text{pF}$



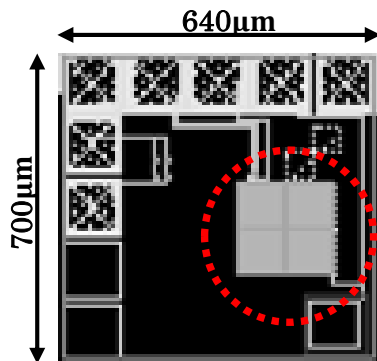
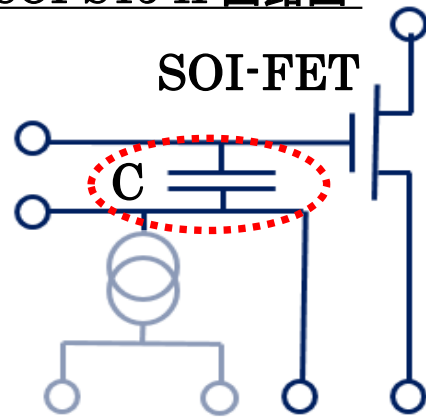
SOISTJ1の問題点

- STJの発生電荷量に対してゲートキャパシタンスが大きく、ゲート電圧の変化が不十分
- ゲート電圧とSTJバイアスをそれぞれ独立に決められない

⇒ SOISTJ IIの導入へ

SOI-STJ II

SOI-STJ II 回路図



パターン	C	FETの大きさ	C_{gate}
II-i	60 pF	$W = 4 \times 10 \mu\text{m}$, $L = 1 \mu\text{m}$	320 fF
II-ii	18 pF	$W = 4 \times 1 \mu\text{m}$, $L = 1 \mu\text{m}$	32 fF
II-iii	1.5 pF	$W = 1.42 \mu\text{m}$, $L = 0.4 \mu\text{m}$	4.5 fF
II-iv	-	$W = 1.42 \mu\text{m}$, $L = 0.4 \mu\text{m}$	4.5 fF
I	-	$W = 10 \times 100 \mu\text{m}$, $L = 1 \mu\text{m}$	8 pF

変更点

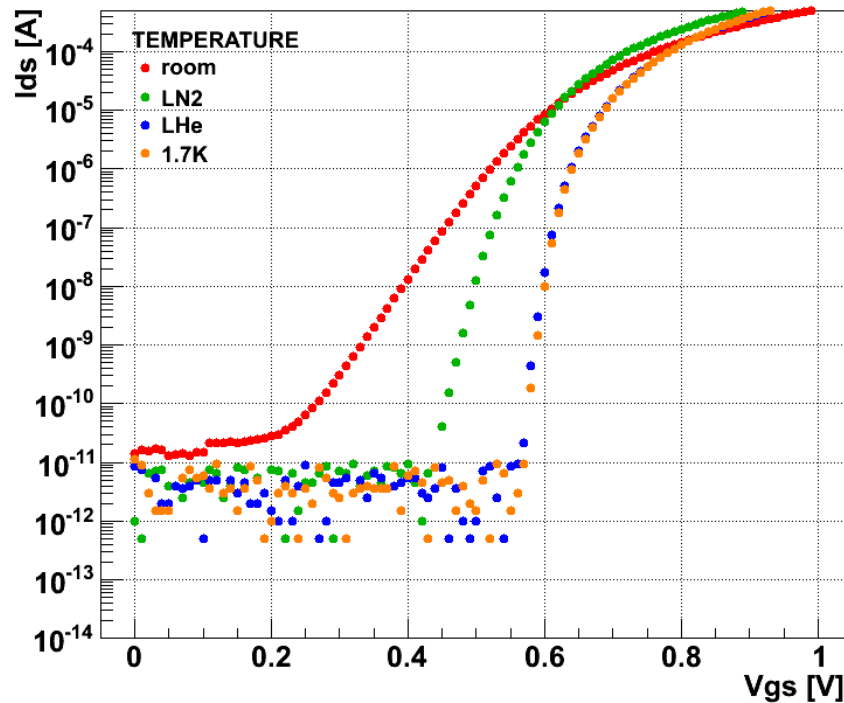
- ゲートキャパシタンスを小さく
- STJとFET間にコンデンサを挟み、独立にバイアス電圧を印加

900mKでFET単体での増幅機構を確認

SOI-STJ II

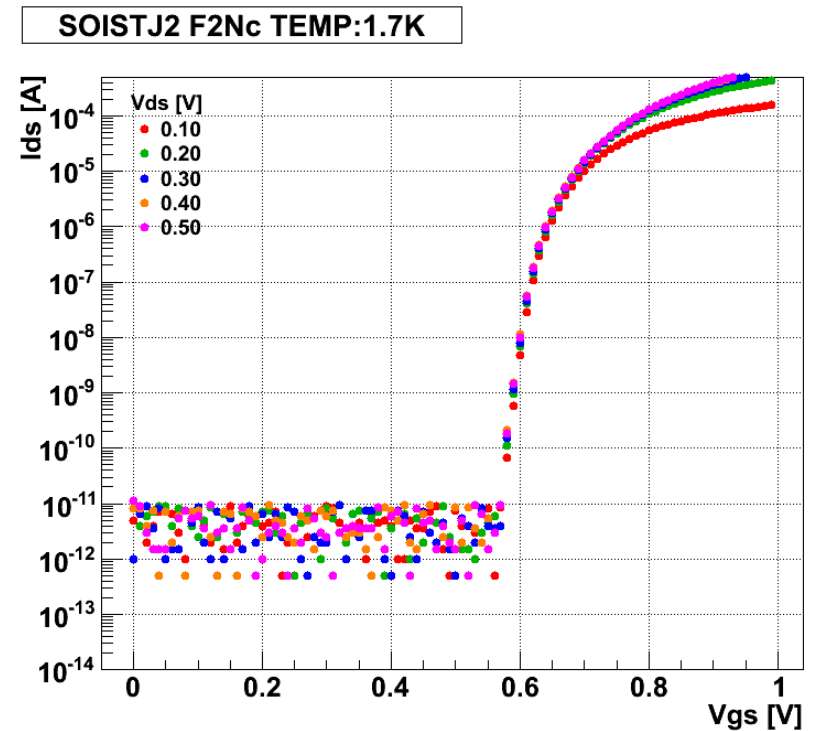
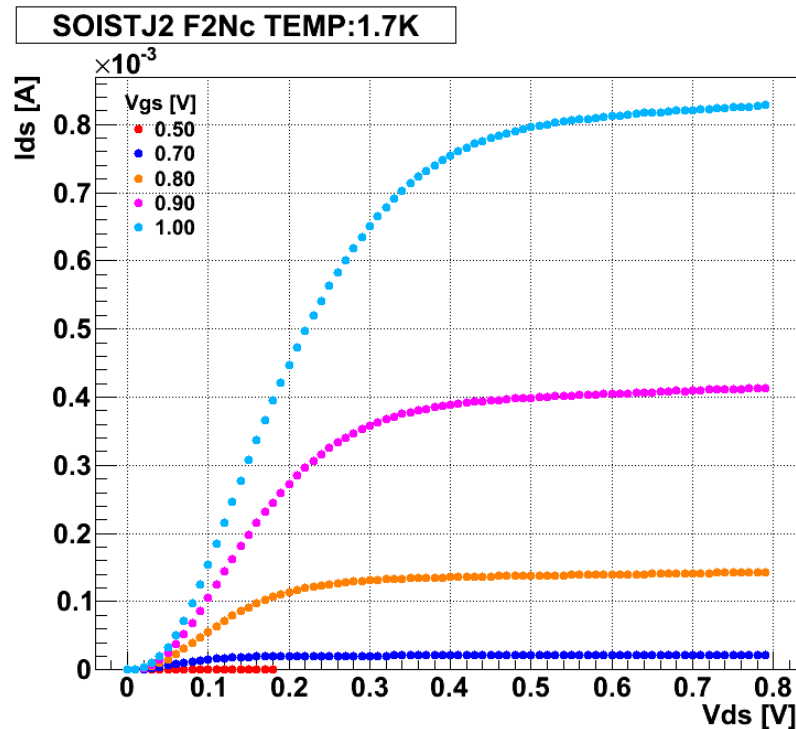
SOI-FETの極低温での温度依存性
 $W=4\times 10\mu\text{m}$, $L=1\mu\text{m}$, NMOS

SOISTJ2 F2Nc $V_d=0.50\text{V}$

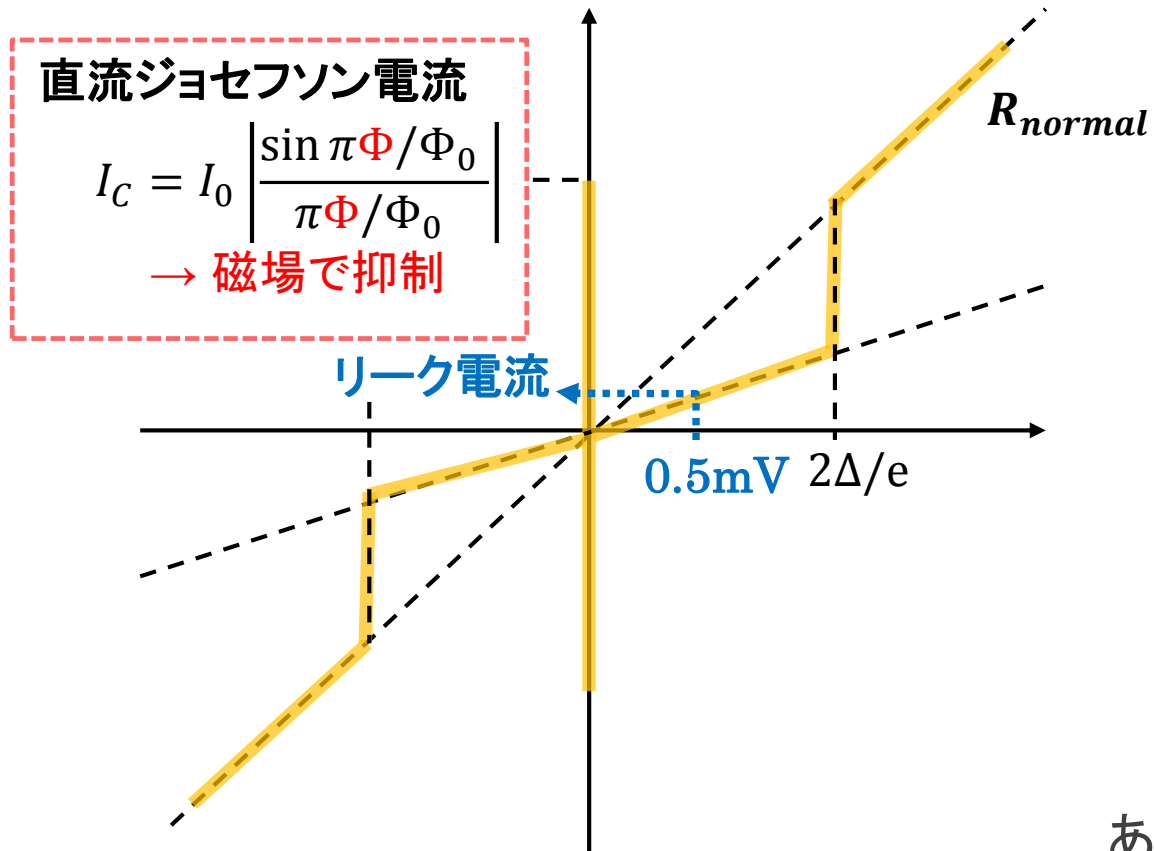


SOI-STJ II

SOI-FETの極低温でのバイアス依存性
 $W=4\times 10\mu\text{m}$, $L=1\mu\text{m}$, NMOS



STJ-IV特性



ああ

Nb/Al-STJのリーク電流への要求

波長50nmの遠赤外光子1photon ($E = 25\text{meV}$)
に対するNb/Al-STJの発生準粒子数は

$N_Q \sim 100e^-$ (収集効率100%, $G_{Al} \sim 10$ を仮定)

リーク電流による発生電荷数のゆらぎが1phpton
信号による発生電荷数の3倍以下になるには

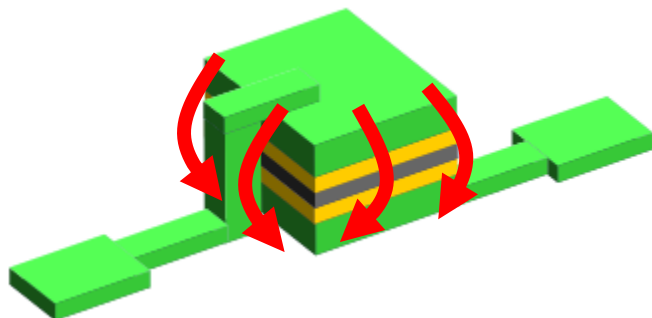
$$\delta N_{leak} = \sqrt{N_{leak}} = \frac{1}{3} N_Q$$

$$N_{leak} = I_{leak} \times (\text{信号幅: } \sim 1.5\mu\text{s})$$

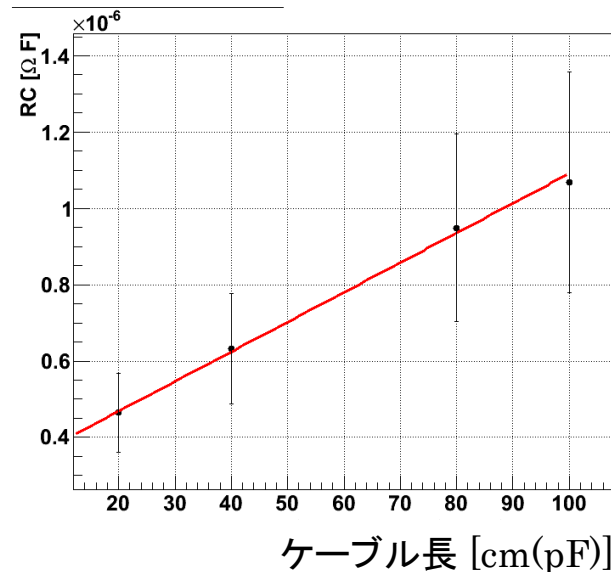
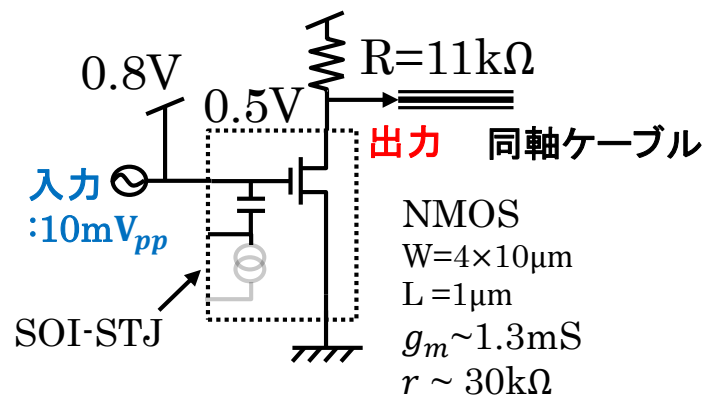
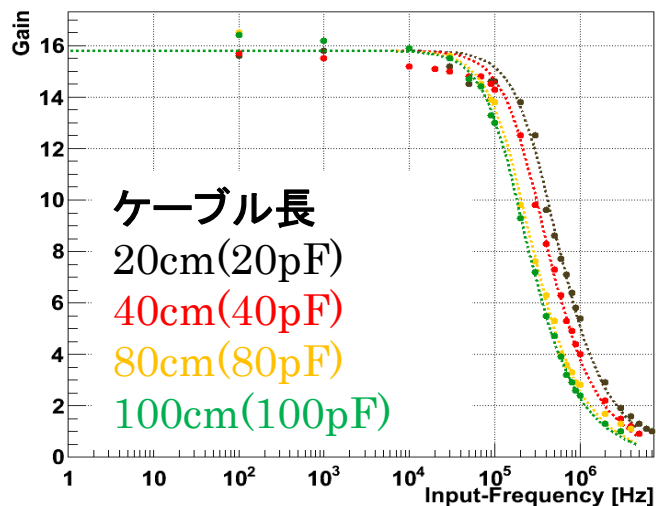
$$\Rightarrow I_{leak} \sim 7.4 \times 10^8 e^- \sim 100\text{pA}$$

現在のリーク電流は $10\text{nA} @ 100 \times 100\mu\text{m}^2$

リーク電流が主に側面からのものとするば、ジャンクションサイズを100倍小さくすれば達成できると考えられる



周波数応答の C_{cable} 依存



ケーブルが長いほど周波数応答は悪くなる

