



# COBAND実験におけるSOI-STJ開発 1

筑波大学 素粒子実験研究室

修士2年 八木 俊助

## 内容

- ニュートリノ崩壊光探索実験(COBAND実験)
- STJ (Superconducting Tunnel Junction)
  - 動作原理
- 極低温環境下で動作可能な前置増幅器
  - 極低温増幅器への要求
  - 極低温環境下で動作するトランジスタ=FD-SOI-MOSFET
  - 回路デザイン
  - 極低温環境下でのSTJ検出器信号増幅試験

# COsmic BAckground Neutrino Decay Search

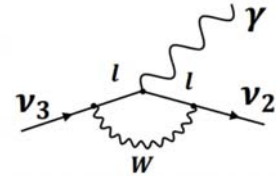
## ニュートリノ崩壊

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。

measure precisely !

$$E_\gamma = \frac{m_3^2 - m_2^2}{2m_3} \quad \text{Neutrino oscillation}$$

Neutrino Decay



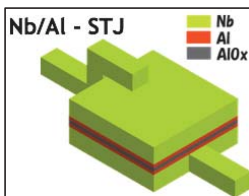
- ニュートリノは長寿命 ( $T > O(10^{12})$  年 : COBE+AKARI測定結果より)
- ✧ 大量のニュートリノ源が必要となる → 宇宙背景ニュートリノを用いる

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)



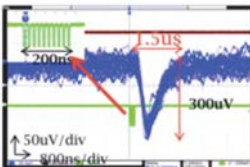
超伝導体 / 絶縁体 / 超伝導体のサンドイッチ構造

### STJの動作プロセス

1. 超伝導体に光子が入射
2. その光子がクーパー対を壊し、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1.5 $\mu$ s



### Nb / Al STJ 準粒子生成個数

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

Gal : トラッピングゲイン  
 E<sub>0</sub> : 放射線のエネルギー  
 Δ : 超伝導体のエネルギーギャップ

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

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

# Nb/Al-STJの研究開発

Our Nb/Al – STJ is fabricated at AIST CRAVITY facility.

[structure]

Nb / Al / AlOx / Al / Nb

-> 100nm / 70um / 1nm / 70nm / 200nm

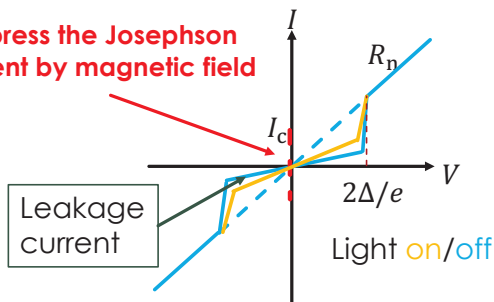
## Nb/Al-STJ 構造



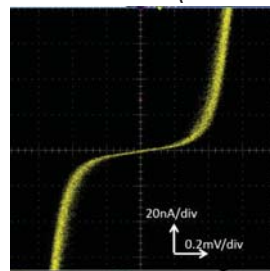
	Nb	Al
$T_c$ [K]	9.23	1.12
$\Delta$ [meV]	1.550	0.172

[General IV characteristic of STJ]

Suppress the Josephson current by magnetic field



STJ IV – curve (100um $\square$ )



Nb/Al-STJ リーク電流 最高記録@筑波大

Size	$I_{leak}$ @0.4mV
100um $\square$	2 nA
50um $\square$	300 pA
20um $\square$	100pA

# 極低温増幅器の導入と要求

## STJ検出器の現状

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

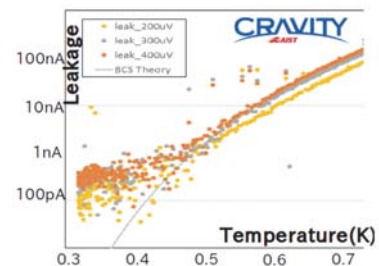
しかし、測定系雑音により、  
遠赤外 1 光子観測達成には至っていない

➢ 検出器直近(冷凍機内部 : < 3K)に増幅器を設置し、増幅 !

## 極低温増幅器に対する要求

- ✓ 300mKでも動作可能
- ✓ STJ検出器の信号増幅が可能 (※信号幅 : 数  $\mu$ sec)
- ✓ 冷凍機の配線容量負荷(〜数百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 $\mu$ W** @300mK , **0.25W** @4.2K)

Nb/Al-STJ リーク電流の温度依存性



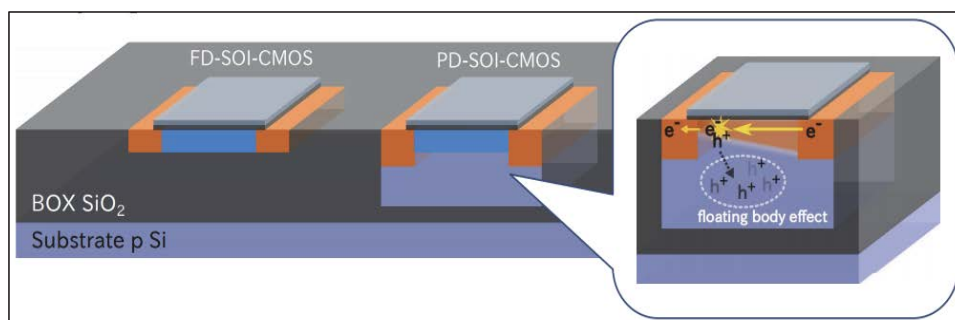
M.Ukibe et al., Jpn. J.Appl. Phys. 51, 010115(2012)  
M.Ohkubo et al., IEEE Trans. Appl. Super. 24, 2400208(2014)

# 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

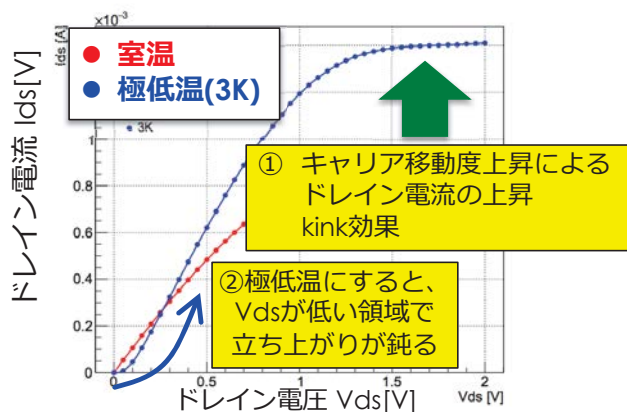
※JAXA/ISAS AIPC 1185,286-289(2009)参照



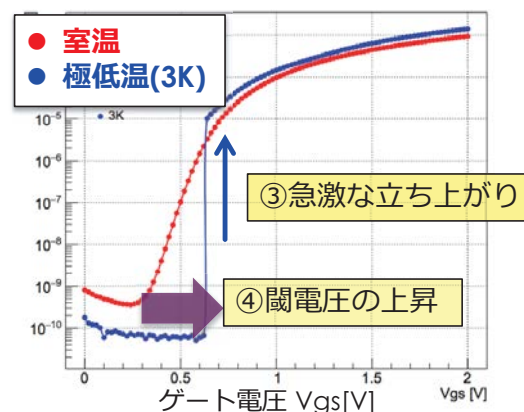
## FD-SOI-MOSFETの電気的特性

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

ドレイン電流のドレイン電圧依存性 (V<sub>gs</sub>=2V)



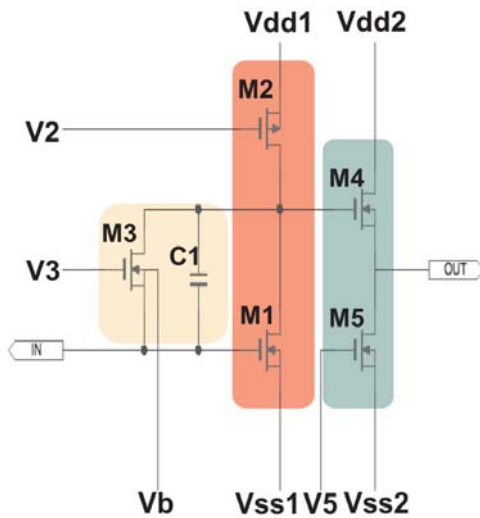
ドレイン電流のゲート電圧依存性 (V<sub>ds</sub>=1.8V)



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、  
 ゲート電圧でドレイン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

# 極低温前置増幅器 デザイン

## SOI - STJ4 (the 4<sup>th</sup> trial Unit)



### □ ソース接地増幅回路

➢ Using MOS-FETs instead of resistance

### □ フィードバック回路

➢ Self bias voltage

### □ ソースフォロア回路

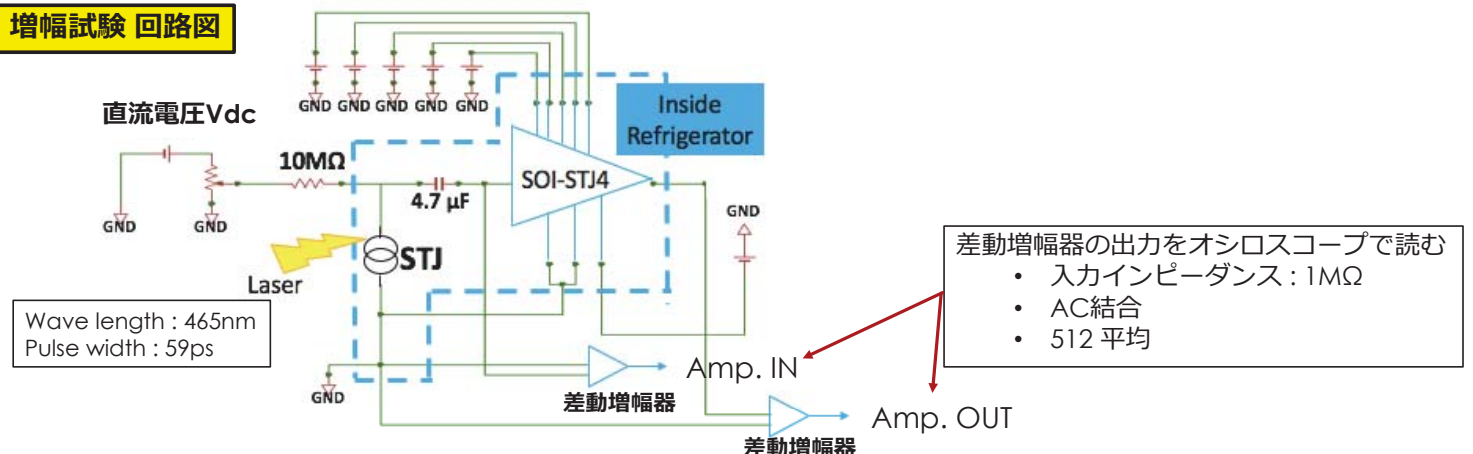
➢ Output impedance is decreased

	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を用いたSTJ信号増幅試験

- STJ検出器に定電流を流した状態で可視光レーザーを照射する
- 本実験では、以下の2つを検証する
  1. STJ検出器信号がSOI-STJ4の方へ伝送されているか
  2. 伝送された信号が増幅されているか

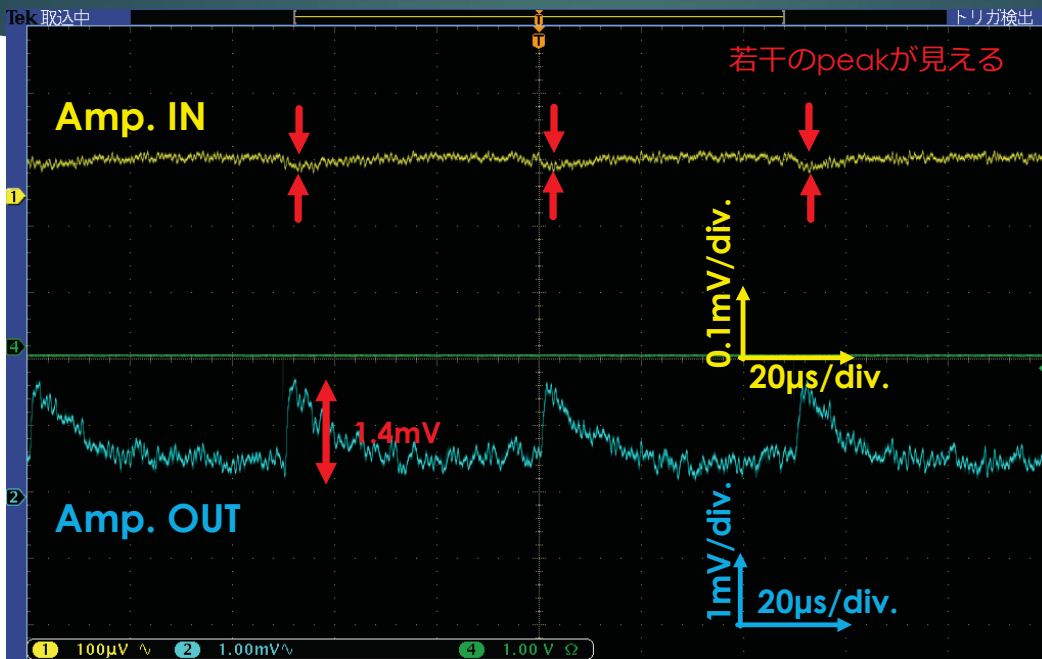
## 増幅試験 回路図



Wave length : 465nm  
Pulse width : 59ps

差動増幅器の出力をオシロスコープで読む  
 • 入力インピーダンス : 1M $\Omega$   
 • AC結合  
 • 512 平均

[Lazar 20kHz] Vdc = 0.43V 512Ave.

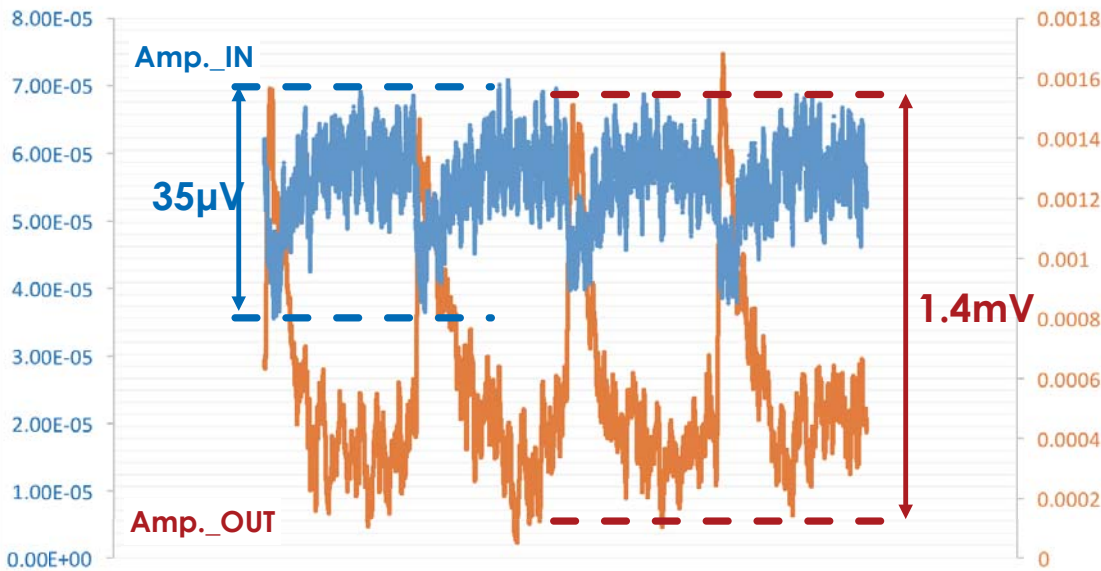


Ampへの入力を見ると、若干のpeakが見える (次項に拡大図のせます)

Ampに伝送されたSTJ信号は負にpeakを持つ それに対して、Ampの出力は反転増幅しており、ampの機能を果たしている

[Lazar 20kHz] Vdc = 0.43V 512Ave.

LazarResponse@300mK (frequency = 20kHz)



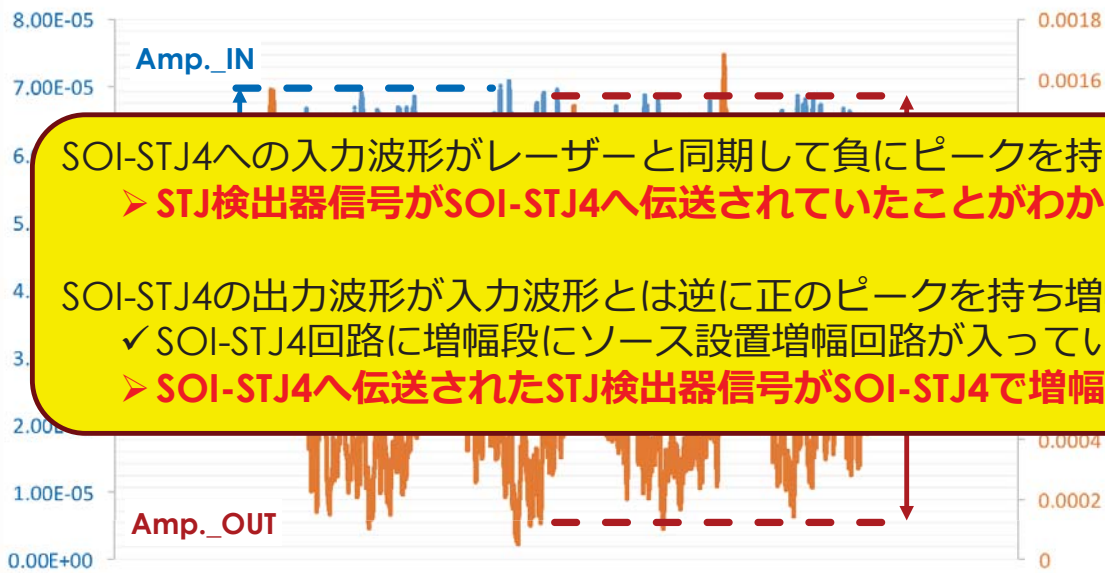
INPUT : Vpp = 35uV  
OUTPUT : Vpp = 1.4mV

Gain ~ 40

Ampの周波数依存性を測定した時、1MHz sin波に対して、Gainは約40倍。

[Lazar 20kHz]  $V_{dc} = 0.43V$  512Ave.

LazarResponse@300mK (frequency = 20kHz)



SOI-STJ4への入力波形がレーザーと同期して負にピークを持つ

➤ STJ検出器信号がSOI-STJ4へ伝送されていたことがわかる！

SOI-STJ4の出力波形が入力波形とは逆に正のピークを持ち増幅している

✓ SOI-STJ4回路に増幅段にソース設置増幅回路が入っている

➤ SOI-STJ4へ伝送されたSTJ検出器信号がSOI-STJ4で増幅されたことがわかる！

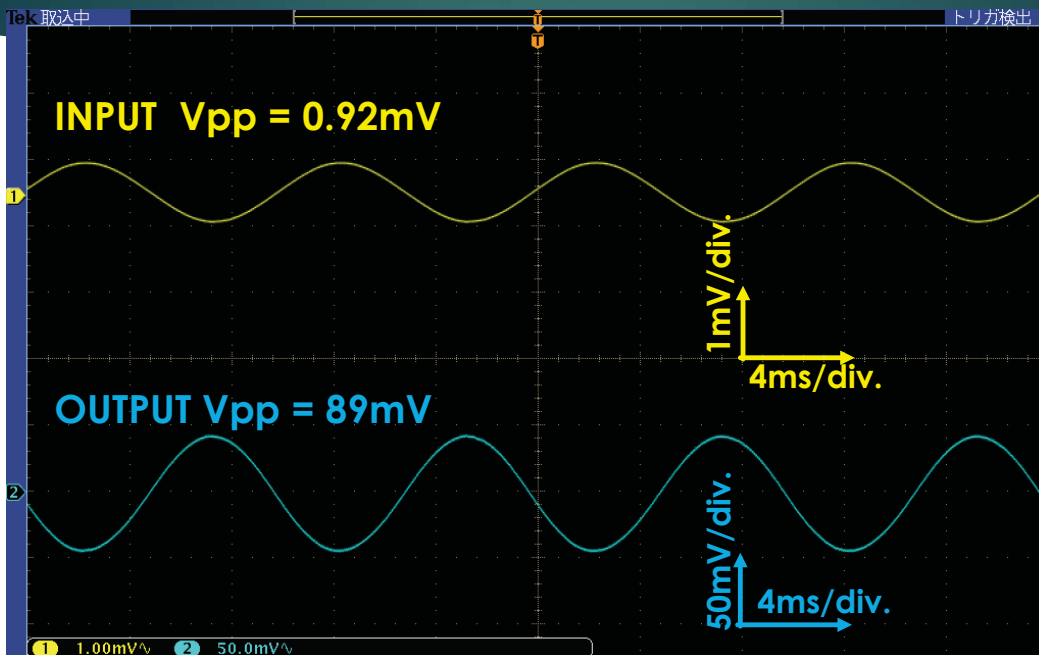
## まとめ

- ニュートリノ崩壊光探索実験(COBAND実験)に向けて、Nb/Al-STJ光検出器と極低温前置増幅器の研究開発をしている
- 極低温環境下で動作するトランジスタとしてFD-SOI-MOSFETがあり、実際300mK環境下でも動作可能
- 昨年度設計した極低温前置増幅器(SOI-STJ4)を用いたSTJ信号増幅試験を行った。
- 増幅試験の結果、
  1. STJ検出器信号がSOI-STJ4へ伝送されたこと
  2. SOI-STJ4へ伝送されたSTJ検出器信号が増幅されたこと を実証することができた
- 本実験から、SOI回路を用いた極低温増幅器は300mK環境下でも信号増幅、読み出しが可能であり、我々素粒子実験分野に捉われず、低温読み出しを行う他分野への応用も期待される

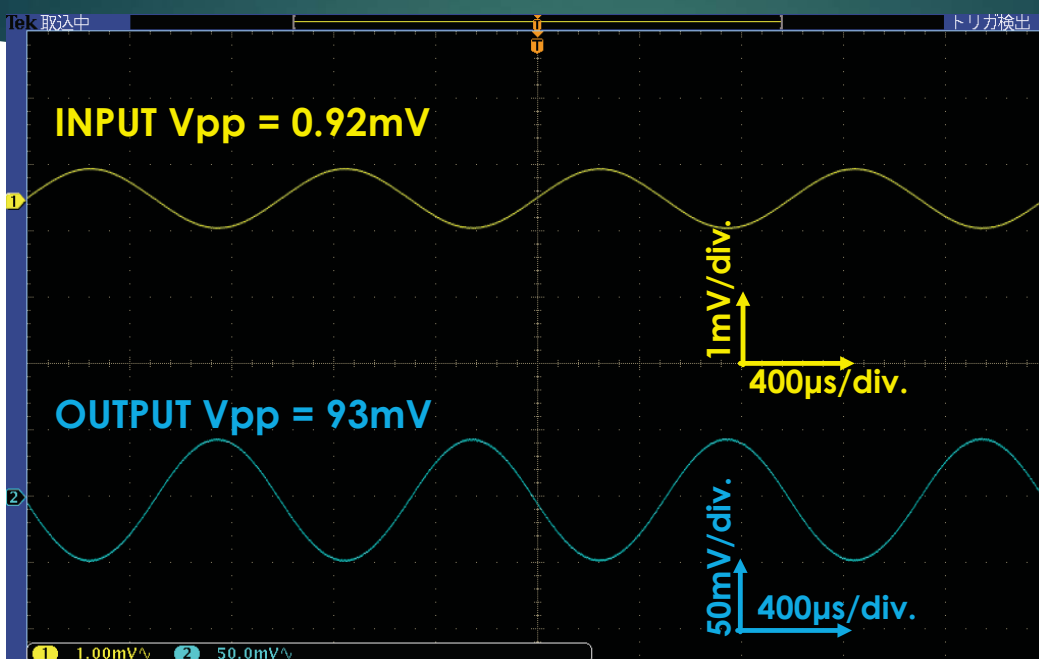




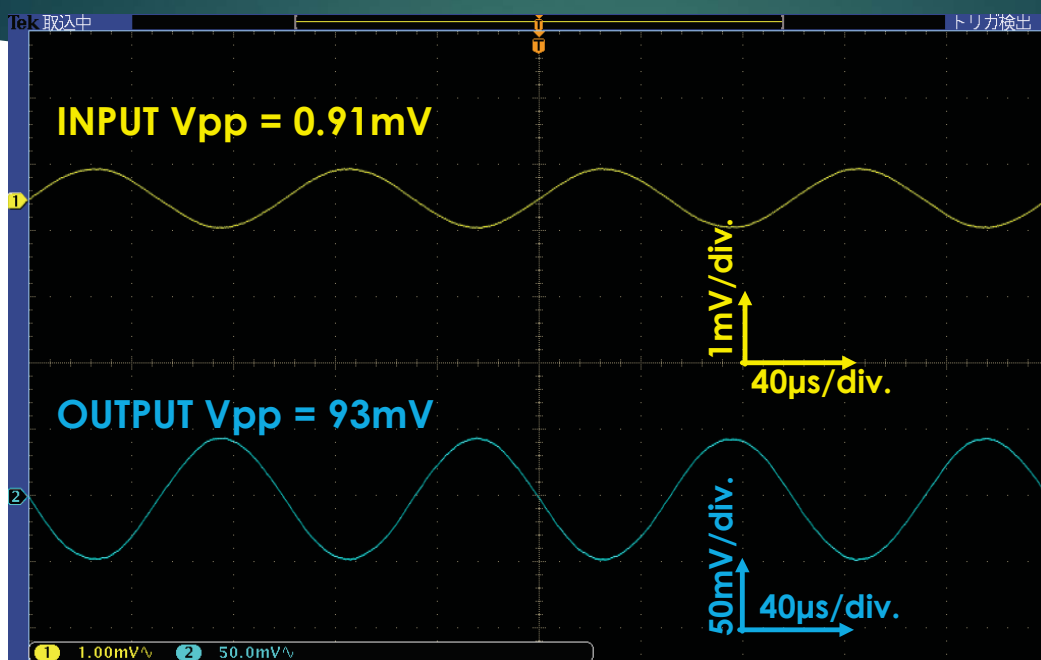
# INPUT 100Hz (512Ave.)



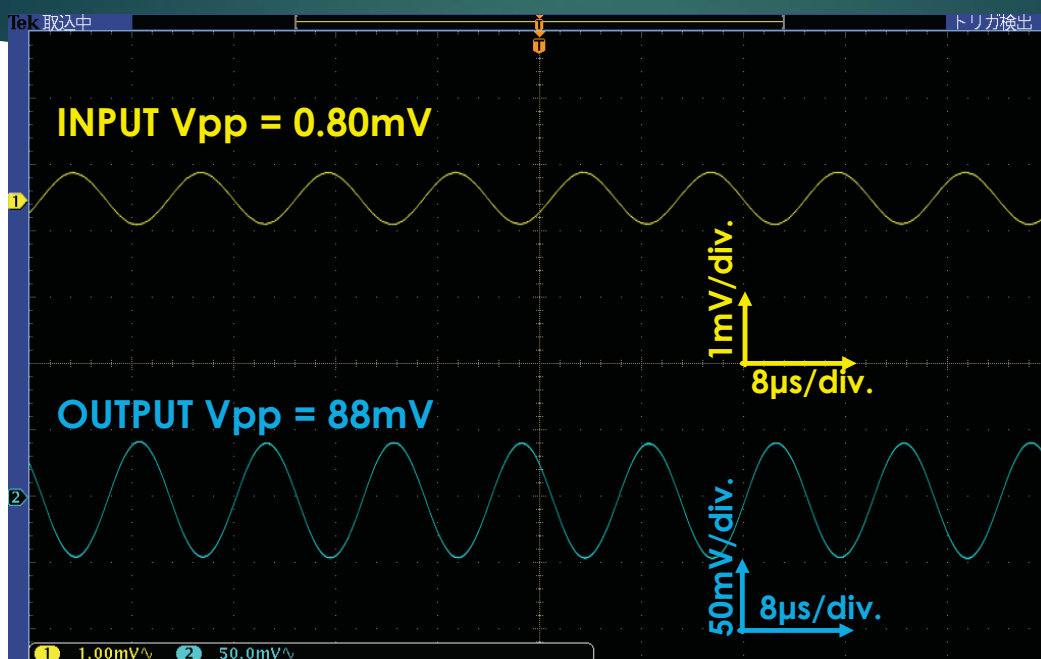
# INPUT 1kHz (512Ave.)



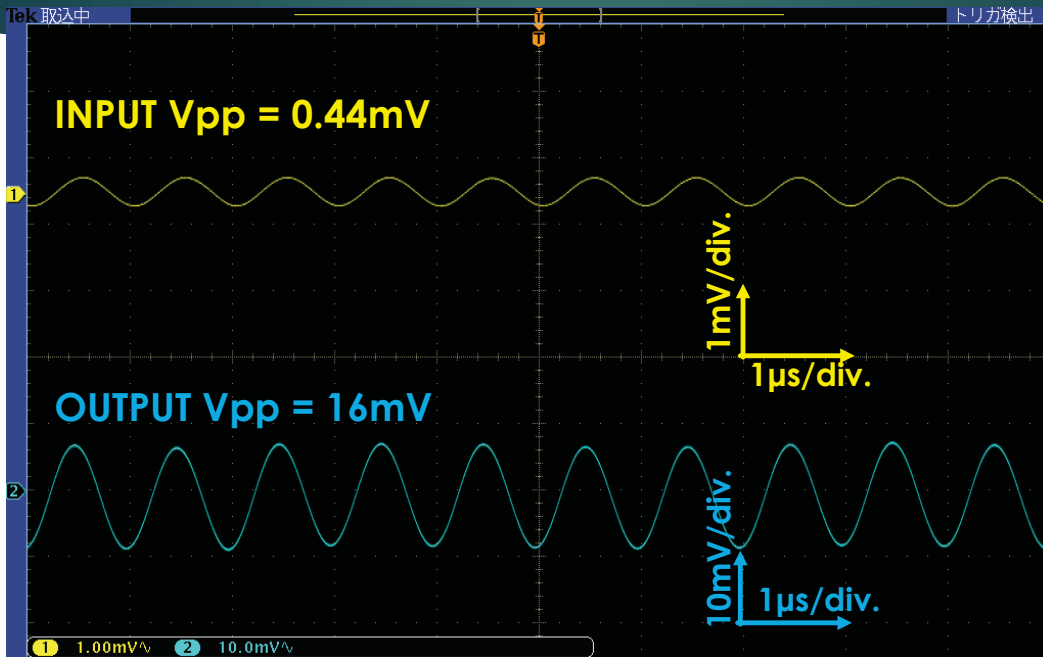
## INPUT 10kHz (512Ave.)



## INPUT 100kHz (512Ave.)



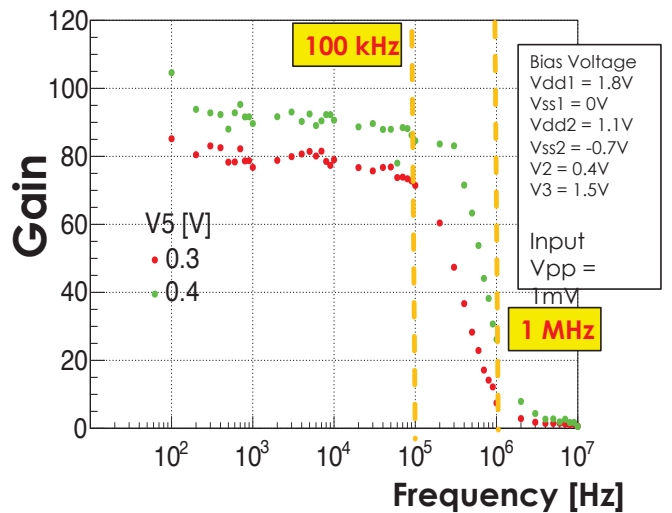
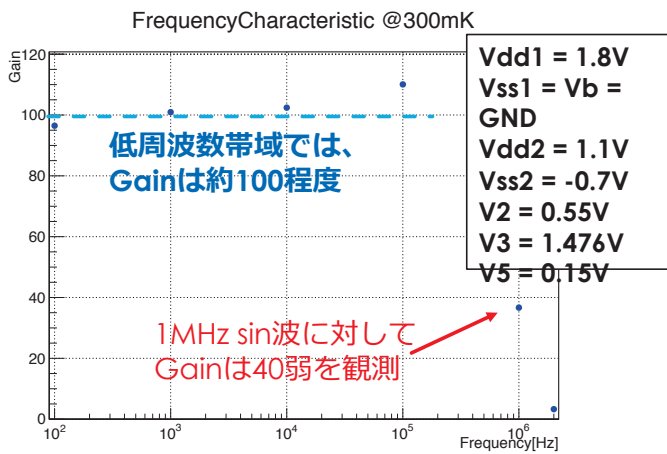
# INPUT 1MHz (512Ave.)



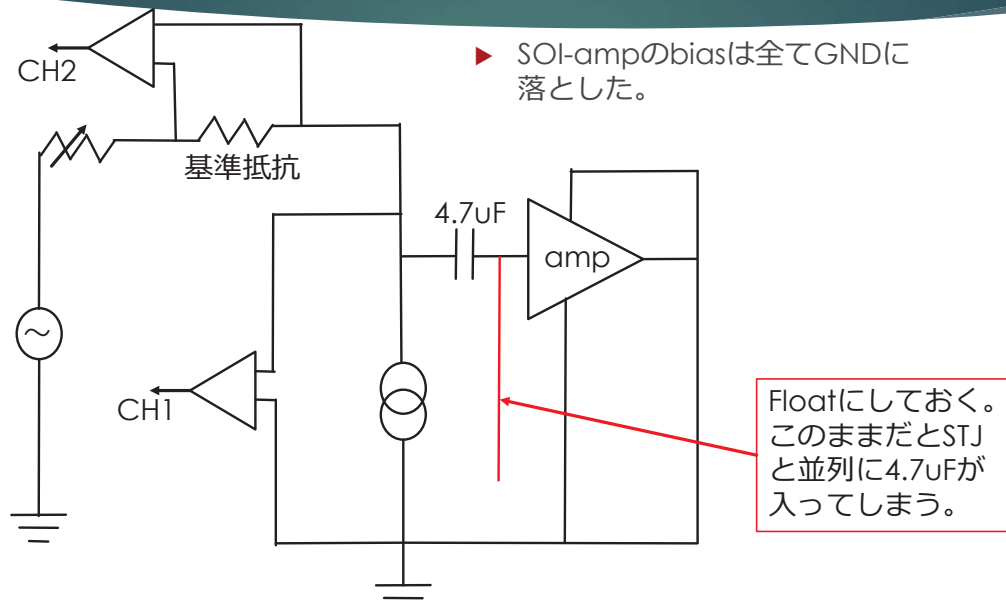
# 利得の周波数依存性

今回測定した周波数特性

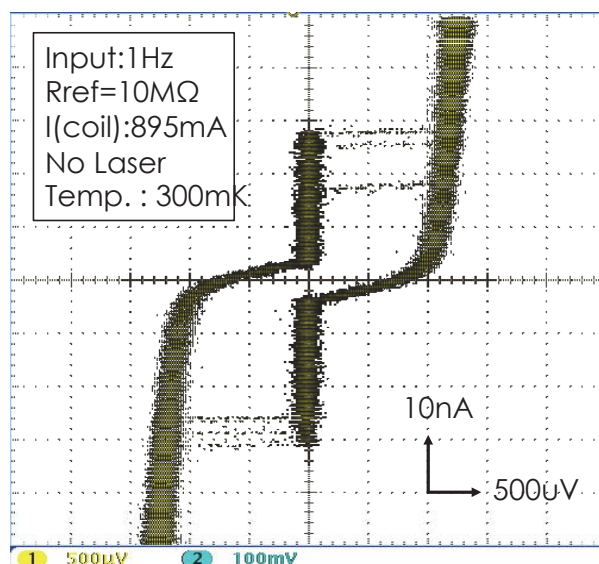
Frequency characteristic of cold pre-amplifier(SOISTJ4) @300mK



# Nb/Al-STJ(w/ SOI) IV測定



# IV測定の結果



# IV測定しながらレーザー照射実験

If we try to observe the Laser response, the current which flow through STJ should be about 40nA.

