

COBAND実験におけるSOI-STJ開発2

Tsukuba Univ.

M1 Rena Wakasa



目次

- ニュートリノ崩壊光探索
- 超伝導トンネル接合素子
- 極低温で動作する増幅器の開発
- 極低温での増幅器の信号増幅試験の結果
- まとめ

ニュートリノ崩壊探索

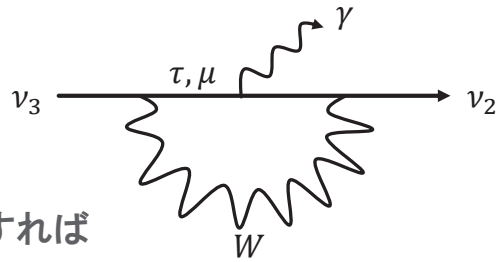
■ ニュートリノ崩壊

- 崩壊に伴う光子のエネルギーは

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

これより、崩壊光のエネルギーを測定すればニュートリノの質量も決定できる。

- ニュートリノの寿命はとても長いため、大量のニュートリノ源が必要。



ニュートリノ振動により決定

$$\Delta m_{32}^2 = (2.44 \pm 0.06) \times 10^{-3} \text{eV}^2$$

$$\Delta m_{21}^2 = (7.52 \pm 0.18) \times 10^{-5} \text{eV}^2$$

➔ 宇宙背景輻射ニュートリノ

■ 予想される崩壊光エネルギー

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

➔ 超伝導トンネル接合素子検出器(STJ)

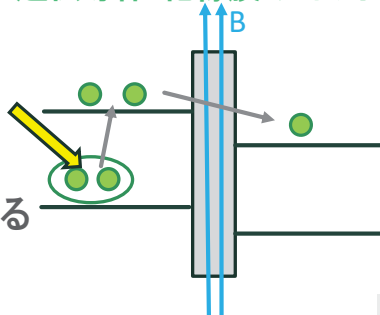
3

Superconducting Tunnel Junction (STJ)

■ STJ検出器の動作原理

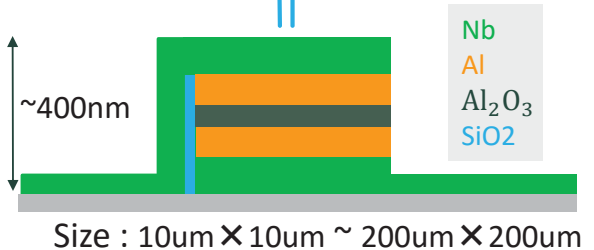
- クーパー対が光子を受け取ることで、準粒子を生成
- 上部超伝導体から下部超伝導体へ電圧を印加することで、トンネルした準粒子によるトンネル電流を測定

超伝導体 絶縁膜 超伝導体



■ Nb/Al-STJ

- Nb単体よりも転移温度が下がる
- エネルギーギャップも小さくなるためエネルギー分解能に優れる
- 絶縁膜付近の準粒子の存在確率が大きくなる



✓ 生成電荷数 $N = \left(\frac{G_{Al}}{1.7\Delta} \right) \cdot \frac{E_\gamma}{1.7\Delta}$

バックトンネリング効果

	Nb	Al
T_c [K]	9.23	1.12
Δ [meV]	1.550	0.172

4

極低温増幅器の開発

■ 極低温増幅器導入

- STJの信号はとても小さいため、熱によるノイズや熱アンカーのための長い配線による寄生容量が気になってくる。

➡ STJの直近で信号を増幅すればよい

■ 極低温増幅器への要求

- 極低温で動作可能
- 信号幅 $<10\mu\text{s}$ のSTJの信号を増幅できるだけの応答速度
- 冷凍機の冷却能力を上回らない低消費電力

➡ FD-SOI-MOSFETを使用した増幅器

	@3K	@300mK
冷却能力	250mW	100 μ W

5

Fully Depleted Silicon-On-Insulator (FD-SOI)



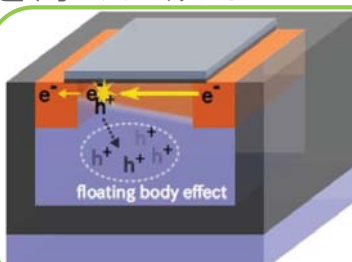
■ SOIは酸化膜上にFETを形成

- MOSFET間の寄生容量がとても小さい
- 消費電力が小さい

■ FD-SOIはボディを薄く形成したSOI

- 浮遊帯効果を抑制

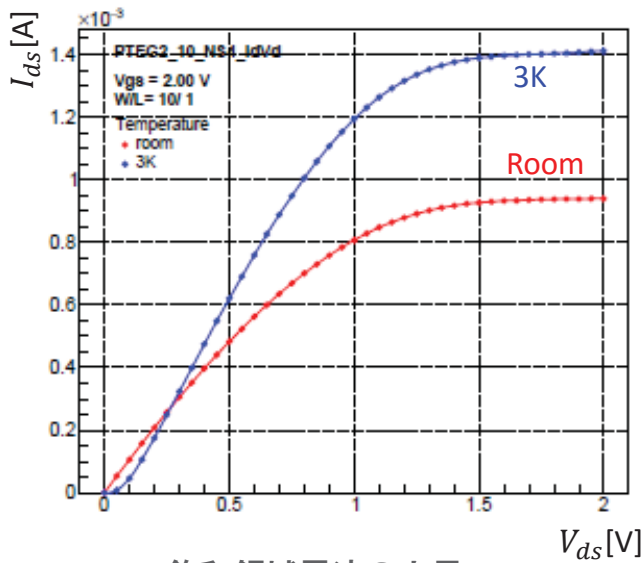
※JAXA/ISASにより
4Kでの動作が
確認されていた。



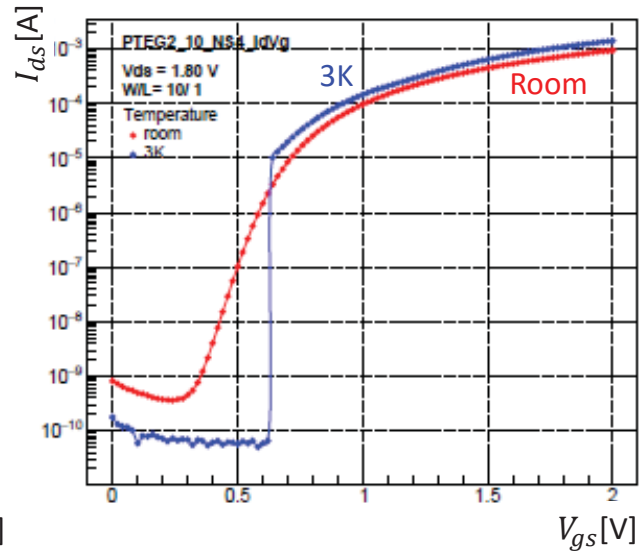
移動度の高い電子がSi原子に衝突し、電子-正孔対が生成される。
全空乏化されていないと正孔がボディに溜まってしまう

6

極低温でのFD-SOI-MOSFETの電流電圧特性



■ 飽和領域電流の上昇



■ 閾値電圧の上昇

■ サブスレッシュヨルドリークの減少

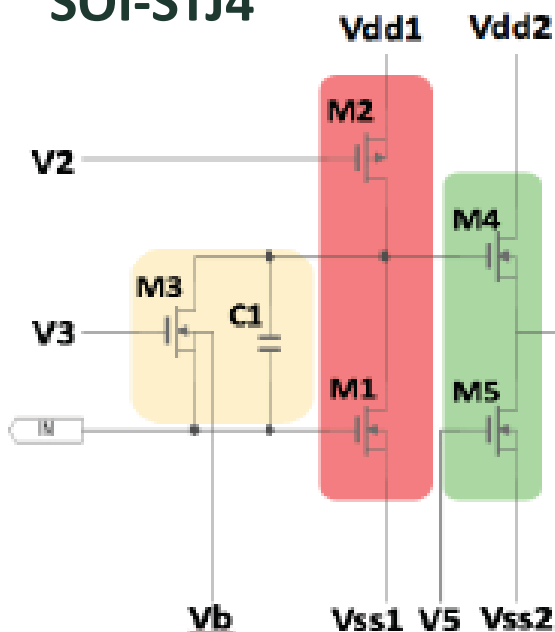


極低温下で電流電圧特性は大きく変化するが、MOSFETとしての動作自体は可能

7

FD-SOIを使用した極低温増幅器の開発

SOI-STJ4



ソース接地増幅段

抵抗の代わりにMOSFETを使用。

フィードバック回路

ソース接地のバイアスを固定する。

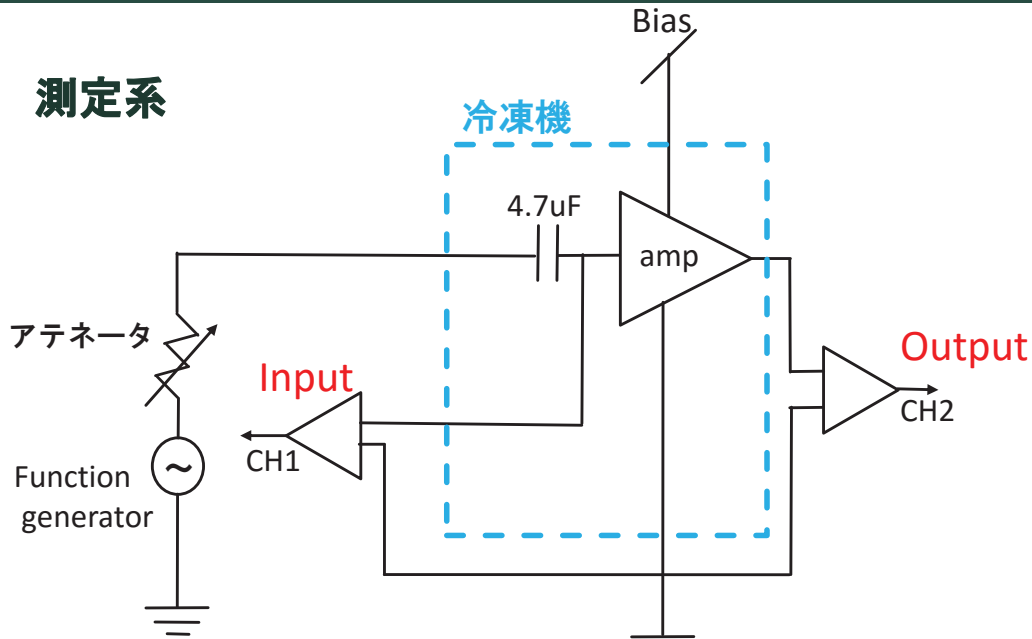
バッファ回路

Outputインピーダンスを下げる。

8

SOI-STJ4増幅器によるsin波増幅試験

測定系

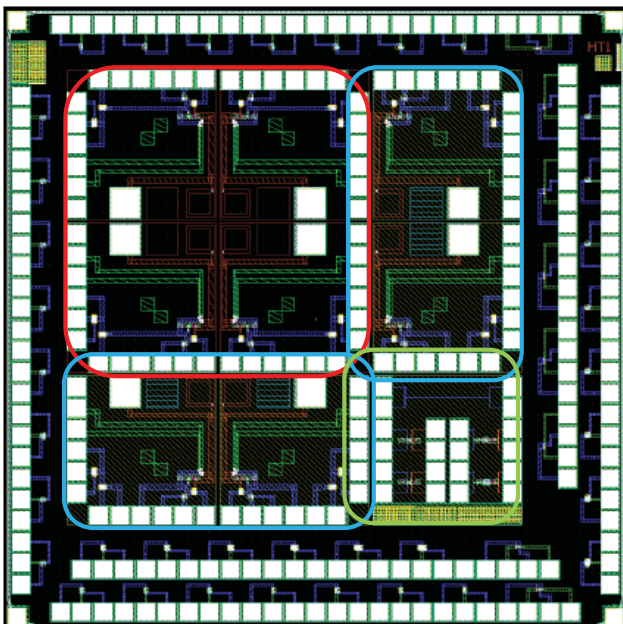


- アテネータを介して Function generatorから信号入力
 - $V_{pp} \sim 1\text{mV}$ のsin波

- Input, Outputは外付け差動増幅器を使用し、オシロで波形を測定

9

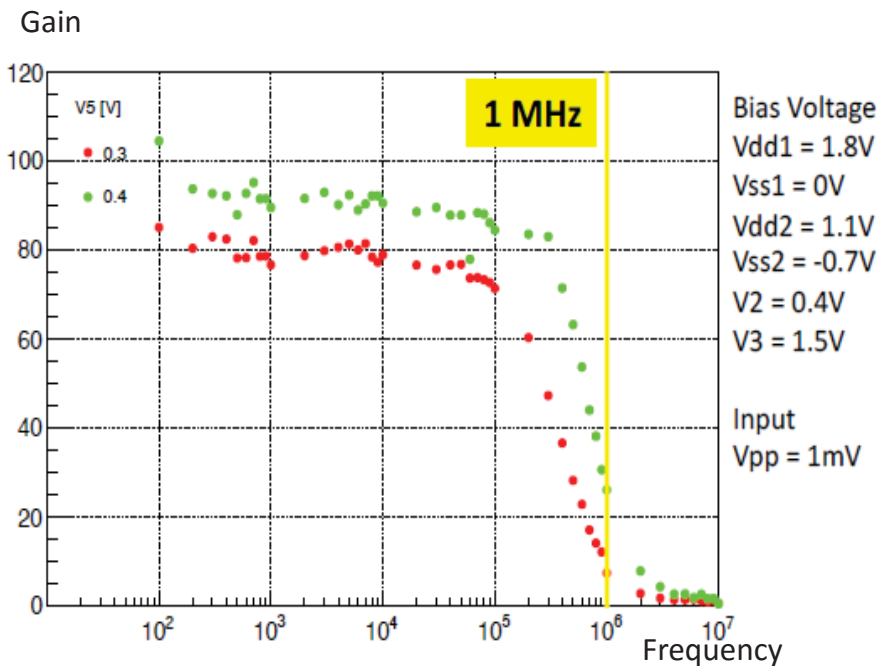
SOI-STJ4のMASKデザイン



- 増幅段・Buff段一体型
- 増幅段・Buff段分離型
- キャパシタンス・抵抗

- 4.7 μF のキャパシタンスはチップキャリアにハンダ付けしワイヤーボンディングでSOI-STJ4増幅器のInputと接続
- STJの信号を増幅させる時は一体型のアンプを使いワイヤーボンディングでSTJとアンプのInputを接続して測定

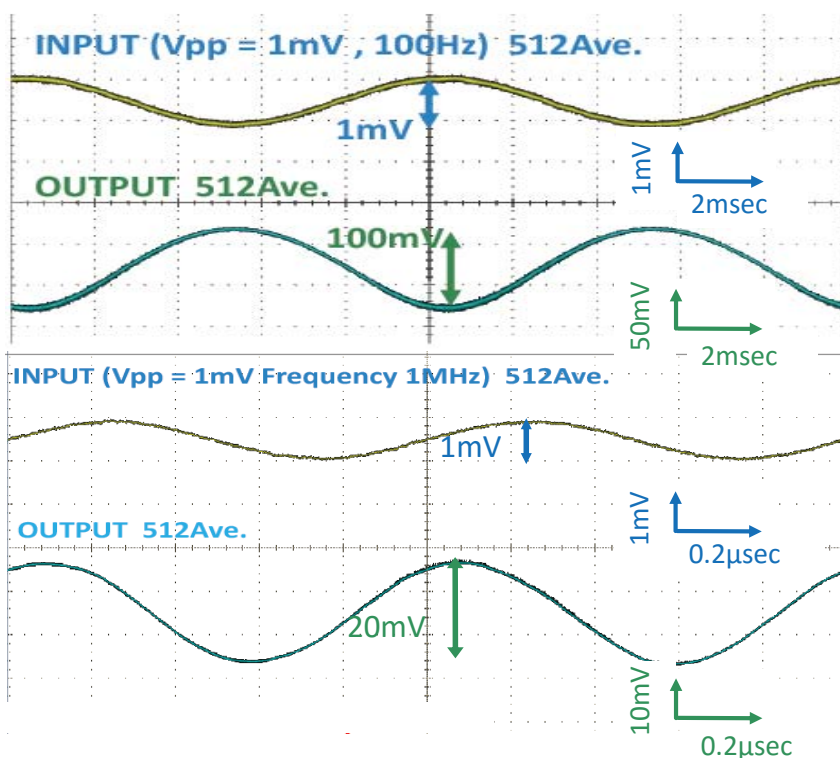
SOI-STJ4増幅器の利得-周波数特性@300mK



- 増幅器に印加するBiasは固定し、周波数を変えながら利得の変化を見た。
- Buff段下のFETのゲート電圧を上げるにより周波数特性がよくなる。
- SOI-STJ4増幅器はSTJの信号を増幅可能
 - STJの応答速度 $<10\mu s$

11

SOI-STJ4によるsin波増幅試験@300mK



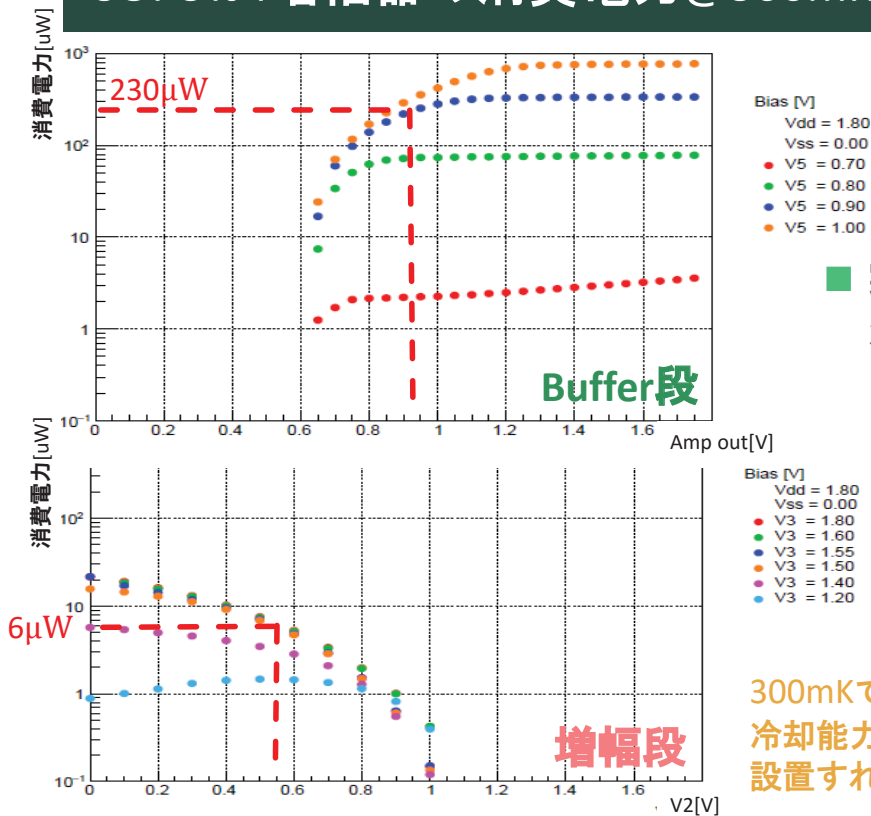
- Input: 100Hz
 - 反転増幅が確認できる
 - Gain~100
- Input: 1MHz
 - 位相はずれているが増幅の確認ができる
 - Gain~20

実際に印加したBias

$V_{dd1} = 1.8V, V_{dd2} = 1.1V,$
 $V_2 = 0.55V, V_{ss1} = V_b = 0V,$
 $V_{ss2} = -0.7V, V_3 = 1.5V,$
 $V_5 = 0.2V$

12

SOI-STJ4増幅器の消費電力@300mK



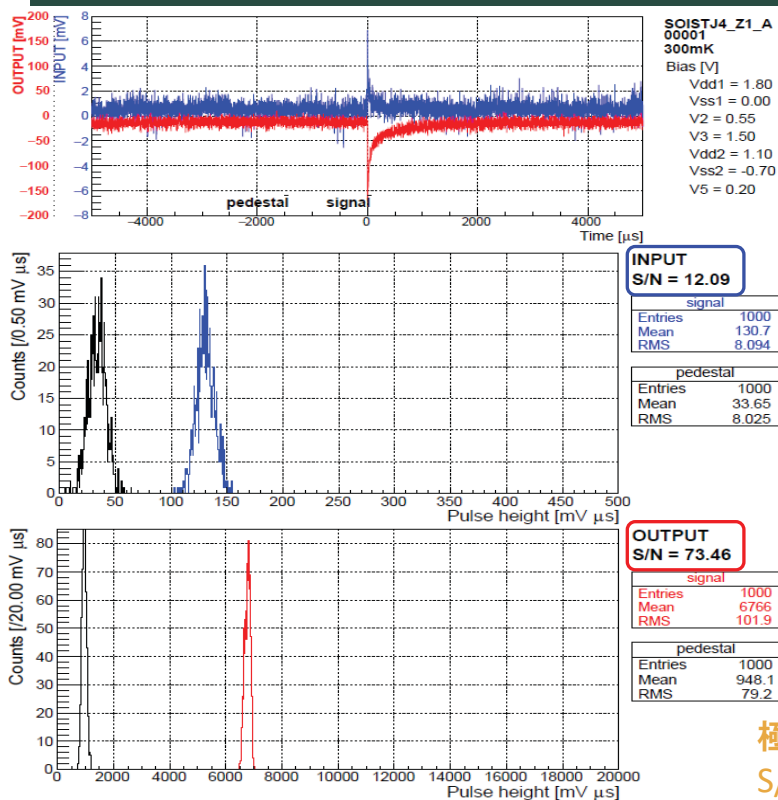
■ 実際の測定で使用したBias
消費電力~236μW

- $V_{dd1} = 1.8V, V_{dd2} = 1.1V,$
 $V_{SS2} = -0.7V, V_2 = 0.55V,$
 $V_5 = 0.2V, V_{SS1} = V_b = 0V,$
 $V_3 = 1.5V$



300mKでの冷却能力は約100μWだが、冷却能力が約100mWの3Kステージに設置すれば問題ない

パルス応答試験@300mK



■ Nb/Al-STJの擬似信号を入力

■ 信号雑音比を測定

➢ $S/N = \frac{(M_s - M_n)}{RMS_n}$

✓ M_s : 信号波高分布

✓ M_n : 雑音波高分布

✓ RMS_n : M_n の二乗平均平方根

➢ 積分時間は60μs

■ $S/N_{INPUT} = 12.09$
 $S/N_{OUTPUT} = 73.46$



極低温においてSOI-STJ4増幅器はS/Nを向上させた。

まとめ

- ニュートリノ崩壊光エネルギーを測定するために、
極低温増幅器の開発を行っている。
- SOI-STJ4増幅器の極低温での動作を確認
 - STJの信号を十分増幅できるだけの周波数特性を示した。
 - 消費電力は現在の300mKにおける冷却能力を上回る。
 - ➡ SOI-STJ4増幅器を3Kステージに設置することで解決可能
 - 極低温においてSTJ信号の読み出しに有効なS/Nの向上が見られた。

15

BACK UP

16

パルス応答試験@300mK

$V_5[V]$	$ID1[\mu A]$	$ID2[\mu A]$	$P[\mu W]$	$T[K]$	$V_p[mV]$	$\tau[\mu s]$
0.00	3.29	1.19	8.06	~ 3	51.5	607
0.10	3.30	51.1	103	~ 3	153	82.0
0.30	3.30	472	856	~ 3	170	45.2
0.00	3.15	1.71	8.75	~ 0.315	102	521
0.10	3.21	55.1	105	~ 0.368	164	116
0.20	3.24	219	400	< 0.490	162	67.0
0.30	3.27	471	854	≥ 0.515	152	60.0

■ Nb/Al-STJの擬似信号を入力

■ 信号雑音比を測定

$$\triangleright S/N = \frac{(M_s - M_n)}{RMS_n}$$

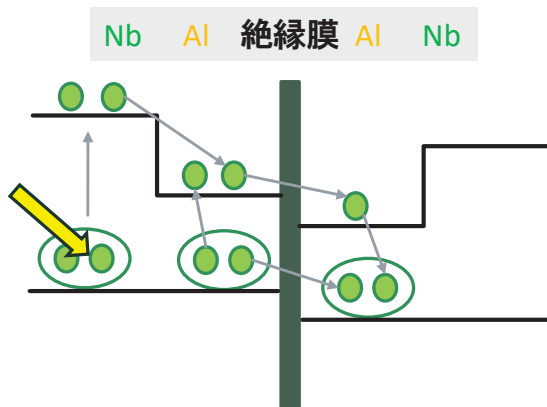
✓ M_s : 信号波高分布

✓ M_n : 雑音波高分布

✓ RMS_n : M_n の二乗平均平方根

17

バックトンネリング効果



■ バッ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

✓ 生成された準粒子のうち片方はそのままトンネル

✓ もう片方は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

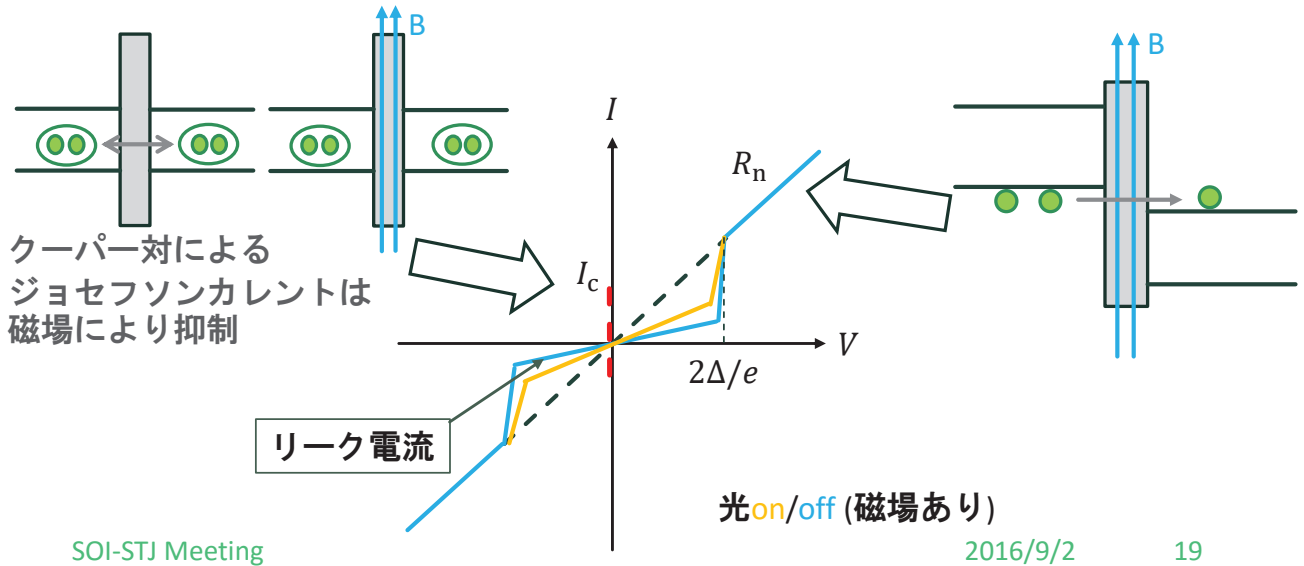
✓ その際に余った電子が準粒子としてAl層で励起

■ Nb/Al-STJではG~10

STJの電流-電圧カーブ

■ 光応答を見る際は $|V| < 2\Delta/e$ の範囲で電圧を印加する

➢ リーク電流がノイズとなる



リーク電流への要求

■ Nb/Al-STJで25meVの1光子を測定する

✓ 生成電荷数: $N_{sig} = G_{Al} * \frac{E_\gamma}{1.7\Delta} = 10 * \frac{25\text{meV}}{1.7 * 0.6\text{meV}} \sim 250$

✓ ノイズによる電荷数: $N_{leak} = \frac{i_{leak} * \tau}{e}$

✓ N_{sig} の揺らぎ: $\delta N_{sig} = G_{Al} \sqrt{F * \frac{E_\gamma}{1.7\Delta}}$ Fano因子: $F \sim 0.2$

✓ N_{leak} の揺らぎ: $\delta N_{leak} = \sqrt{N_{leak}}$

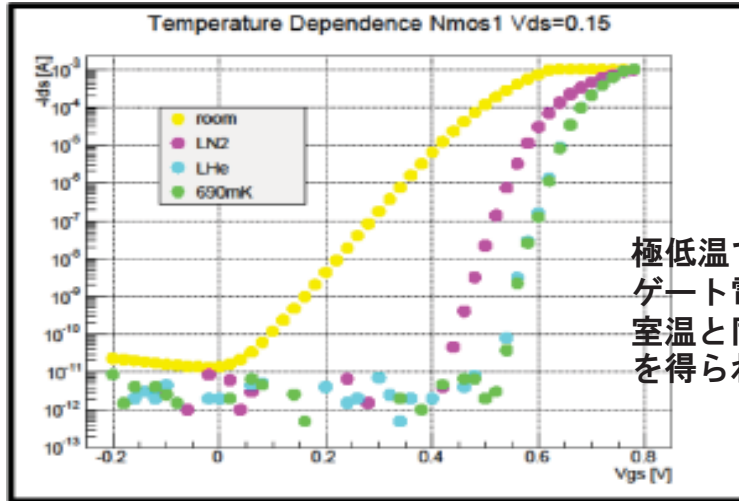
✓ STJの応答速度: $\tau \sim 1\mu\text{s}$

■ 信号が300Hzで入ってくると考え
リークによるノイズを1/10, 検出効率97.5%と要求

✓ $4\sqrt{N_{leak}} = N_{sig} - 2\sqrt{(\sqrt{N_{leak}})^2 + (\delta N_{sig})^2}$

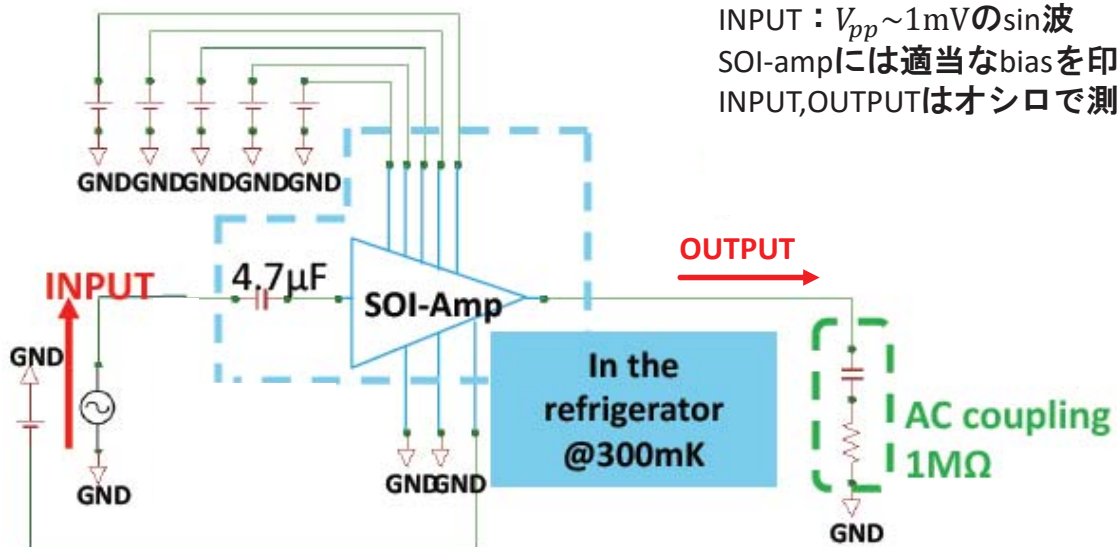
➔ $i_{leak} \sim 250\text{pA}$

現在、20 μm 角のNb/Al-STJで $i_{leak} \sim 100\text{pA}$ を達成!



極低温で閾値電圧が上がるが、ゲート電圧を制御することで室温と同様のパフォーマンスを得られる。

SOI-ST14でのsin波増幅試験



INPUT : $V_{pp} \sim 1\text{mV}$ のsin波
SOI-ampには適当なbiasを印加
INPUT, OUTPUTはオシロで測定