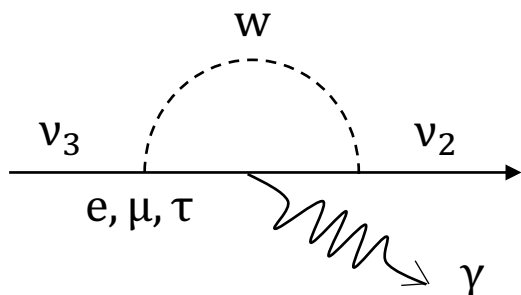


COBAND実験のための SOI-STJの研究開発Ⅲ

筑波大数理, 理研^A, KEK^B, 岡山大^C, 福井大工^D, 近畿大^E, 関西学院大^F,
静岡大^G, JAXA^H, AIST^I, Fermilab^J, Seoul Nat'l. Univ.^K
浅野千紗, 金信弘, 武内勇司, 飯田崇史, 武政健一, 永田和樹, 若狭玲那,
八木俊輔, 美馬寛^A, 木内健司^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, 坂井誠^D, 中村昂弘^D, 西村航^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,
馬場俊佑^H, 志岐成友^I, 浮辺雅宏^I, 藤井剛^I, 大久保雅隆^I, Eric Ramberg^J,
Mark Kozlovsky^J, Dmitri Sergatskov^J, Paul Rubinov^J, Soo-Bong Kim^K

Cosmic Background Neutrino Decay (COBAND)



$$\nu_3 \rightarrow \nu_2 + \gamma$$

崩壊光子のエネルギー：

$$E_\gamma = \frac{|m_3^2 - m_2^2|}{2m_3} = 6.3 \sim 24.6 \text{ meV} (50.4 \sim 196.6 \mu\text{m})$$

(2体崩壊なので、重心系で E_γ 一定)

- ニュートリノ振動実験によるニュートリノ質量二乗差：

$$|m_3^2 - m_2^2| = (2.46 \pm 0.13) \times 10^{-3} \text{ eV}^2$$

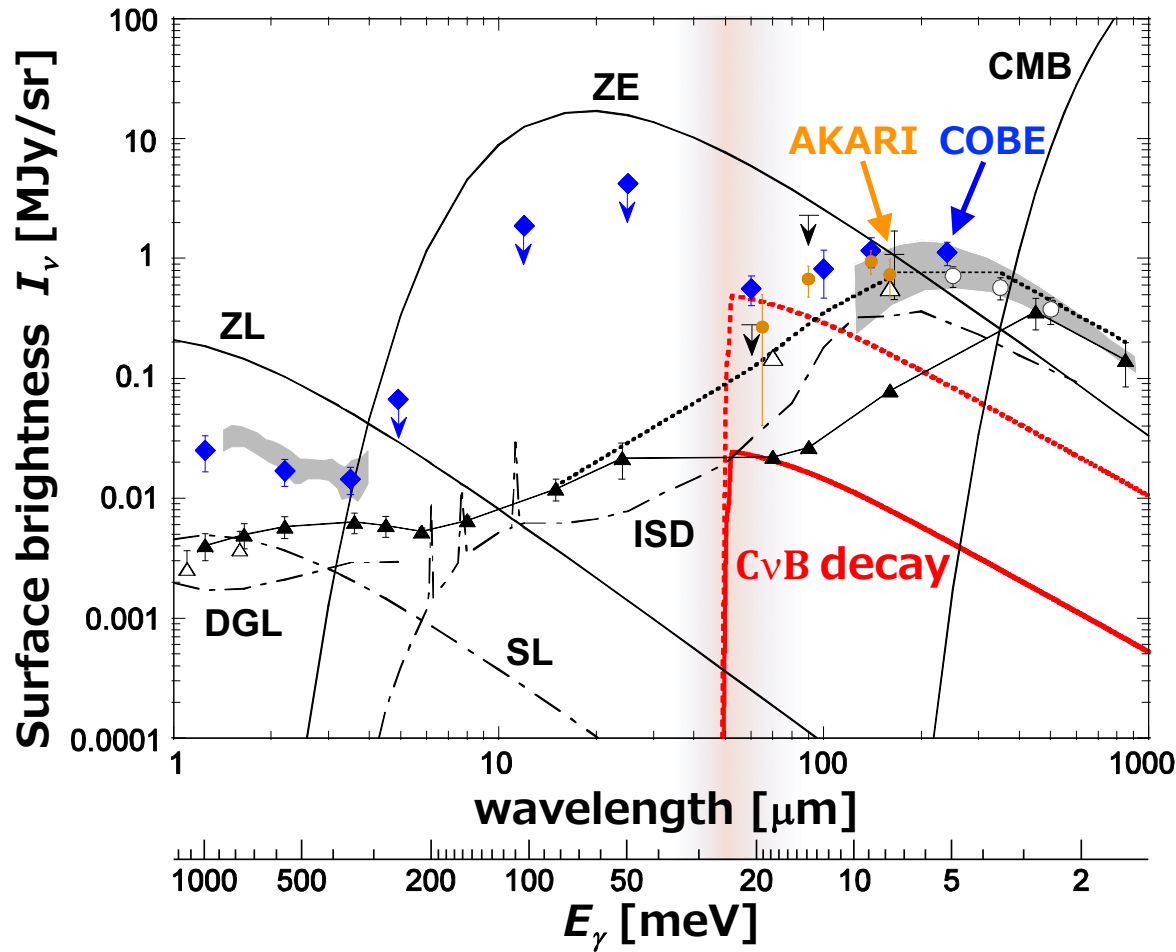
$$m_2^2 - m_1^2 = (7.37^{+0.60}_{-0.44}) \times 10^{-5} \text{ eV}^2$$

- 宇宙の質量分布の観測： $\Sigma m_\nu < 0.57 \text{ eV}$

K. Nakamura *et al.*, PDG 2016

- ニュートリノ崩壊現象は未発見
- 標準模型の素粒子中、ニュートリノのみ質量未決定
- ニュートリノの寿命は宇宙の寿命超 ($\tau > 10^{12}$ 年)
- 崩壊現象を見るには大量のニュートリノ源が必要
→ 宇宙背景ニュートリノ(CvB)

宇宙背景ニュートリノ(CvB)



■ 崩壊光子の生成による
Sharp EdgeでBGと区別

$\tau = 1 \times 10^{12}$ 年
 $I_\nu \sim 500$ kJy/sr

$\tau = 1 \times 10^{14}$ 年
 $I_\nu \sim 25$ kJy/sr
@ $\lambda = 50 \mu\text{m}$

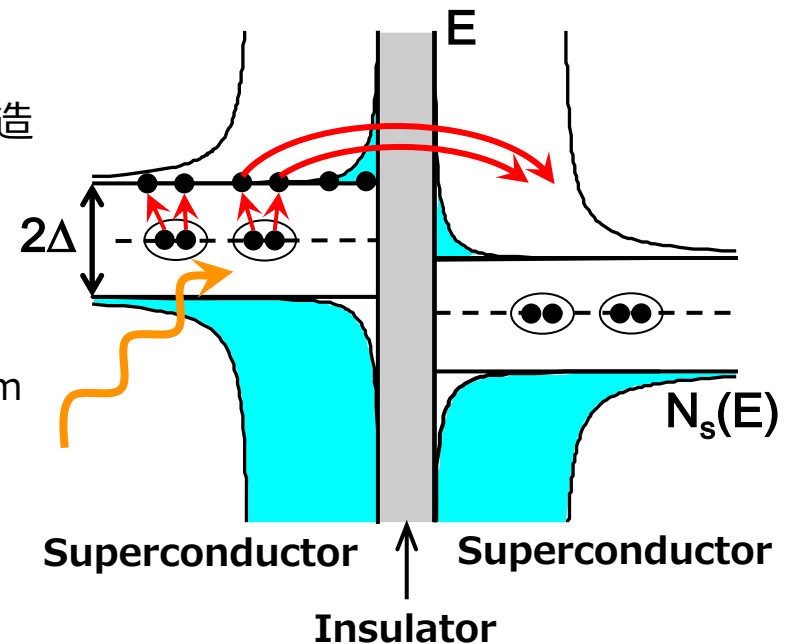
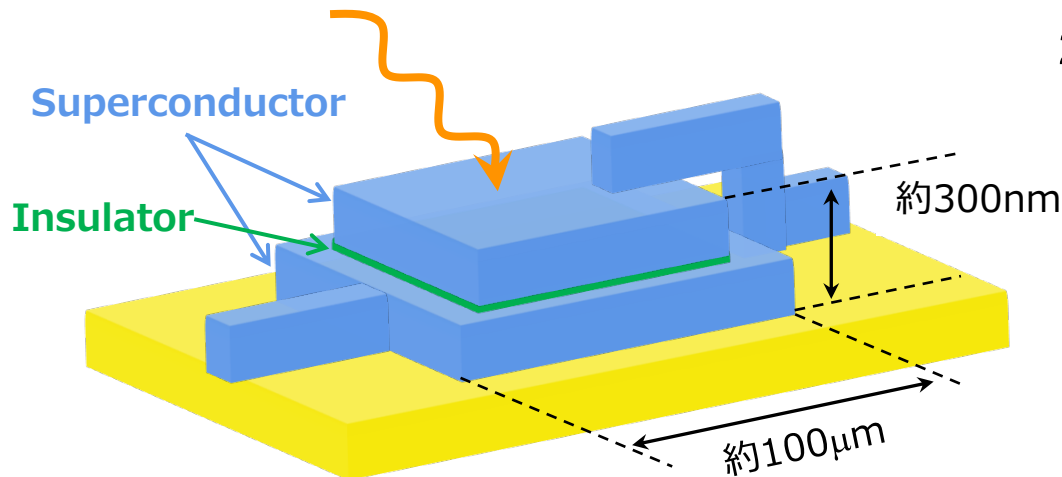
$m_3 = 50 \text{ meV}$ と想定

$1 \text{ Jy} = 10^{-26} \text{ W/m}^2 \cdot \text{Hz}$

STJ検出器(Superconducting Tunnel Junction)

= 超伝導トンネル接合素子検出器

Superconductor/Insulator/Superconductor 構造

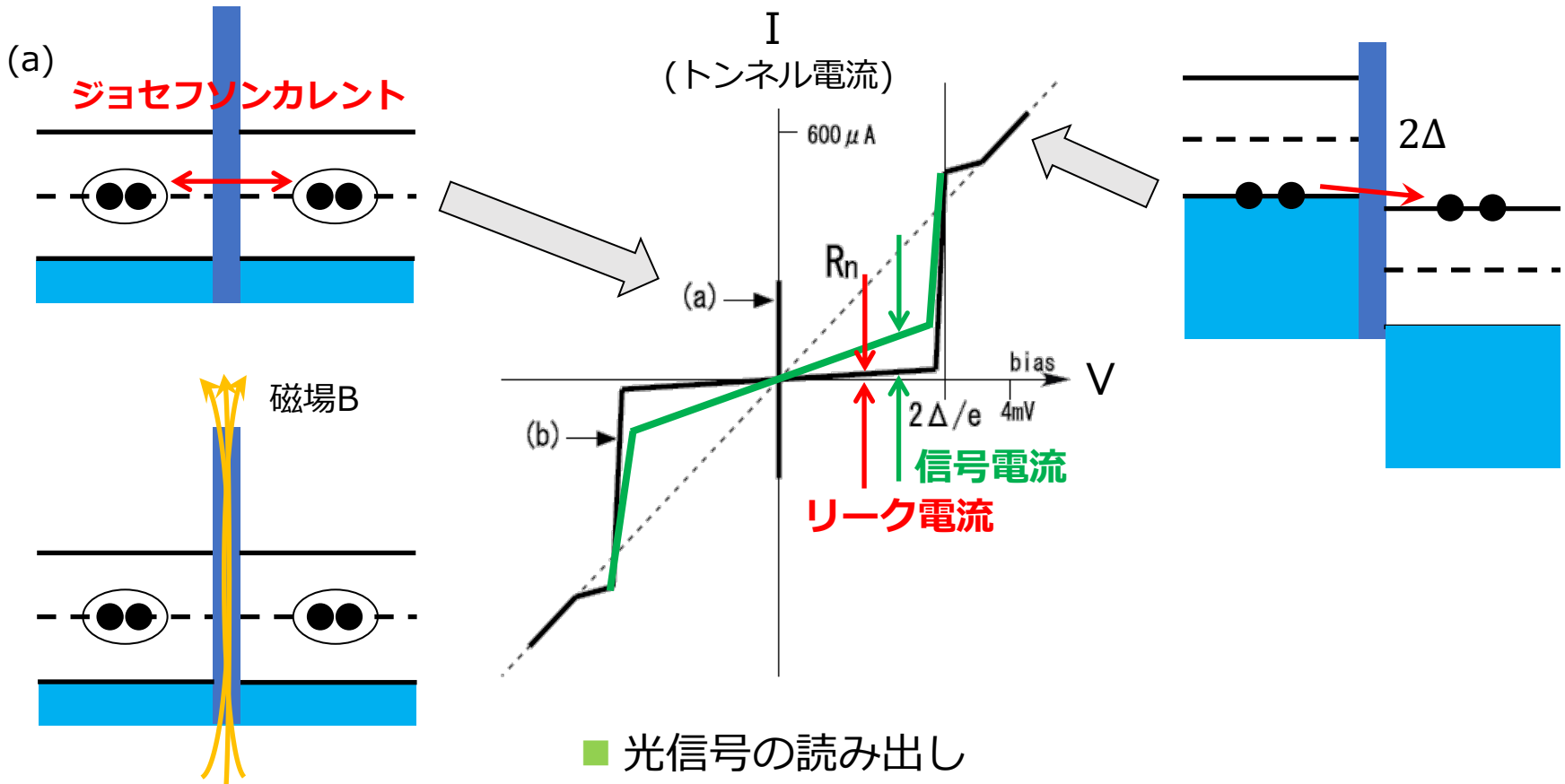


Δ : 超伝導体エネルギーギャップ

- 定電圧($|V| < 2\Delta$) を素子間にかける
- 入射光子が超伝導膜内のクーパー対を破壊し、準粒子が生成される
- 絶縁膜をトンネルした準粒子を信号として観測

- 半導体検出器のエネルギーギャップ数eVに対し、STJ検出器は数meV
- ニュートリノ崩壊光子 (～25meV) を検出可能
- 高速応答 (～1μs) により 1 光子観測に適している

STJのIV曲線



クーパー対によるトンネル電流
(ジョセフソンカレント) は
磁場により抑制できる

■ 光信号の読み出し

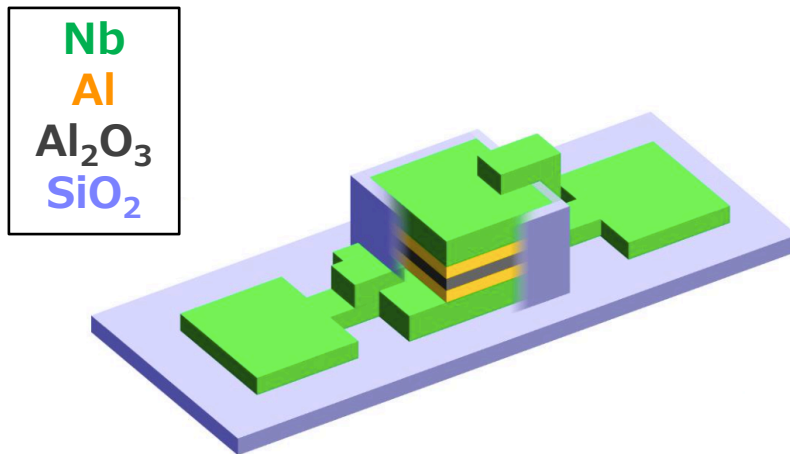
バイアス電圧 ($|V| < 2\Delta$) を素子に印加し、入射光子によって生成された準粒子のトンネル電流を集める。

✓ リーク電流がノイズになる

STJ検出器のエネルギー分解能

信号 = 絶縁膜をトンネルした準粒子の数 : $N_{\text{q.p.}} = G \frac{E_\gamma}{1.7\Delta} \sim 250$

分解能 = 準粒子数の統計的な変動 : $\sigma_E = \sqrt{(1.7\Delta)FE}$



Δ : 超伝導エネルギーギャップ
F: ファノ因子 (=0.2)
E: 光子のエネルギー
G: トラッピングゲイン

超伝導材質による転移温度とエネルギーギャップ

	Si	Ge	Nb	Al
T_c [K]	-	-	9.23	1.20
Δ [meV]	1100	670	1.550	0.172

Nb/Al-STJ (100nm/70nm)

- Alの近接効果により $\Delta \sim 0.57\text{meV}$
- 動作温度 $< 400\text{mK}$
- トラッピングゲイン $G \sim 10$
- $N_{\text{q.p.}} = 10 \times 25\text{meV} / 1.7\Delta \sim 250$ 、 $\sigma_E / E \sim 0.1$ for $E = 25\text{meV}$
→ 25meVの1光子測定は原理的に可能

STJ検出器への要求と極低温増幅器

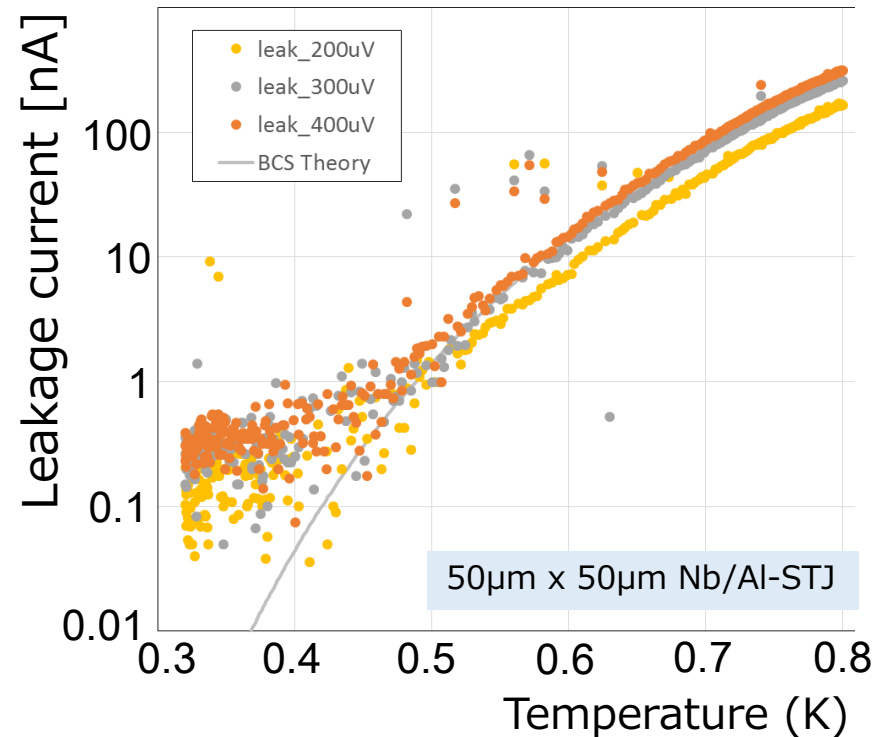
STJ検出器への要求

- リーク電流 : $< 0.1\text{nA}$ (for 1 FIR photon detection, $\lambda=40\sim 80\mu\text{m}$)
- ✓ 現状: 0.05nA ($20\mu\text{m}$ 角 Nb/Al-STJ)

しかし測定系の雑音により、FIR 1 光子観測は未達成→検出器直近(冷凍機内部 $< 300\text{mK}$)に増幅器を設置し、信号に雑音が乗る前に増幅

極低温増幅器に対する要求

- 300mK環境下でも動作可能
- STJ検出器の信号増幅が可能
信号幅 : 数 μsec
etc...



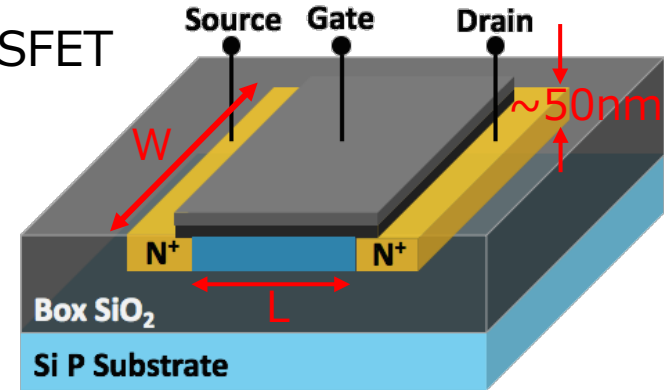
STJのサイズとリーク電流

STJ size	$I_{\text{leak}} @ 0.3\text{mV}$
50 x 50 μm^2	224 \pm 29 pA
20 x 20 μm^2	39 \pm 13 pA
10 x 10 μm^2	14 \pm 7 pA

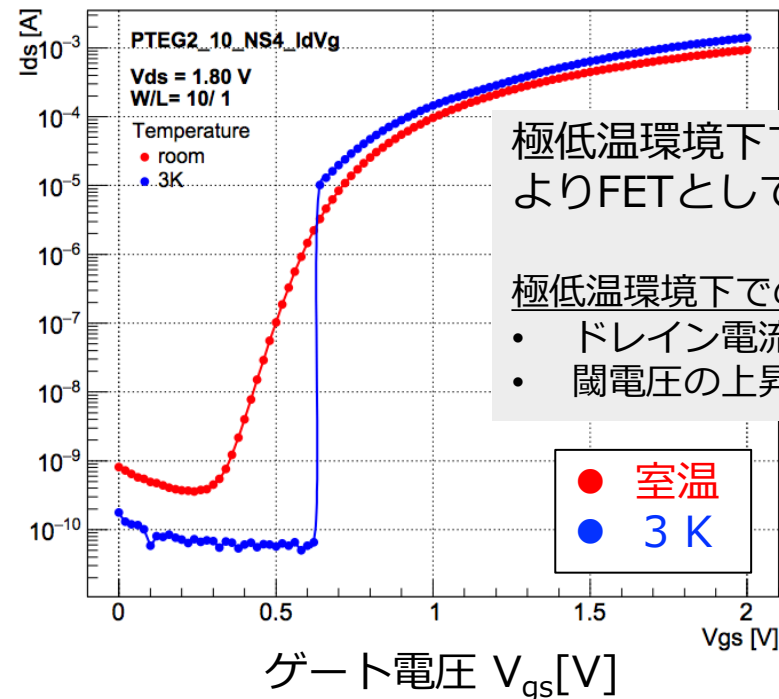
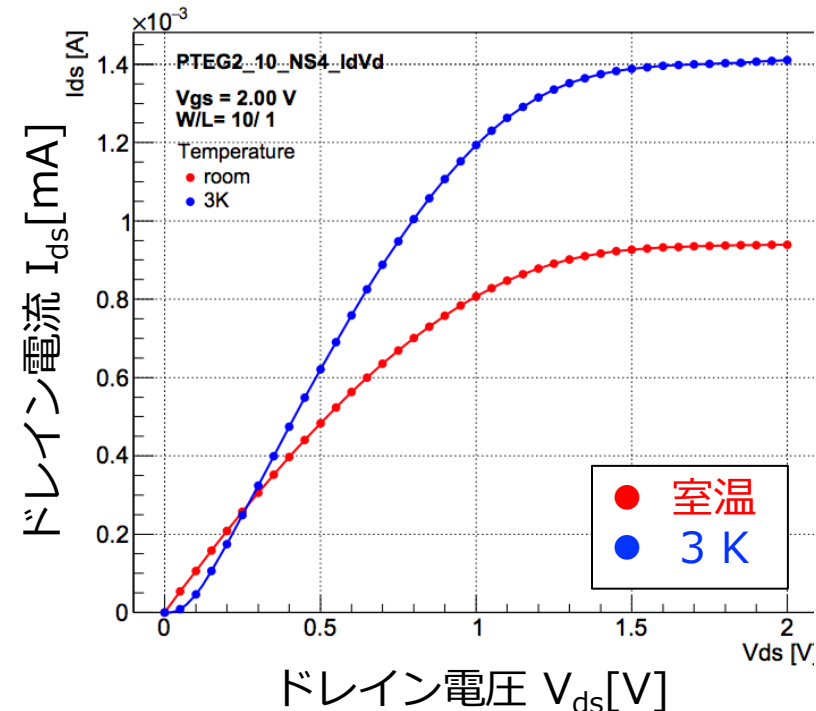
SOI-極低温前置増幅器

FD-SOI (Fully Depleted-Silicon on Insulator)-MOSFET

- SiO₂絶縁膜上にMOSFETを形成
- チャネル層が非常に薄く形成されている
- 4K以下でも動作可能



FD-SOI MOSFETの電流電圧特性



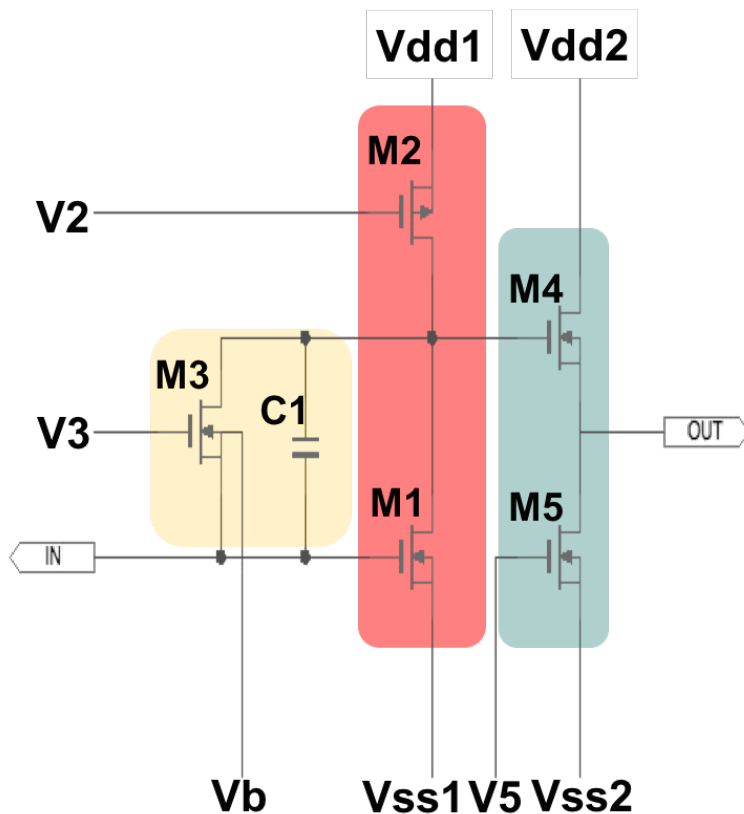
極低温環境下でもSOI技術によりFETとして機能する。

極低温環境下での特性

- ドレイン電流値の上昇
- 閾電圧の上昇

SOI-極低温前置増幅器Ⅳ

SOI-STJ4
(4番目のプロトタイプ)



■ ソース接地増幅回路

電流源としてMOSFETを使用

■ フィードバック回路

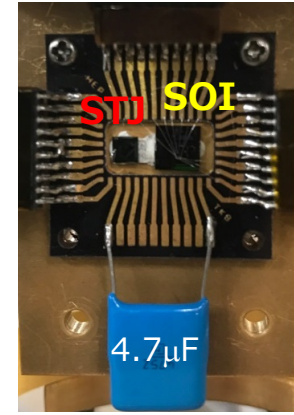
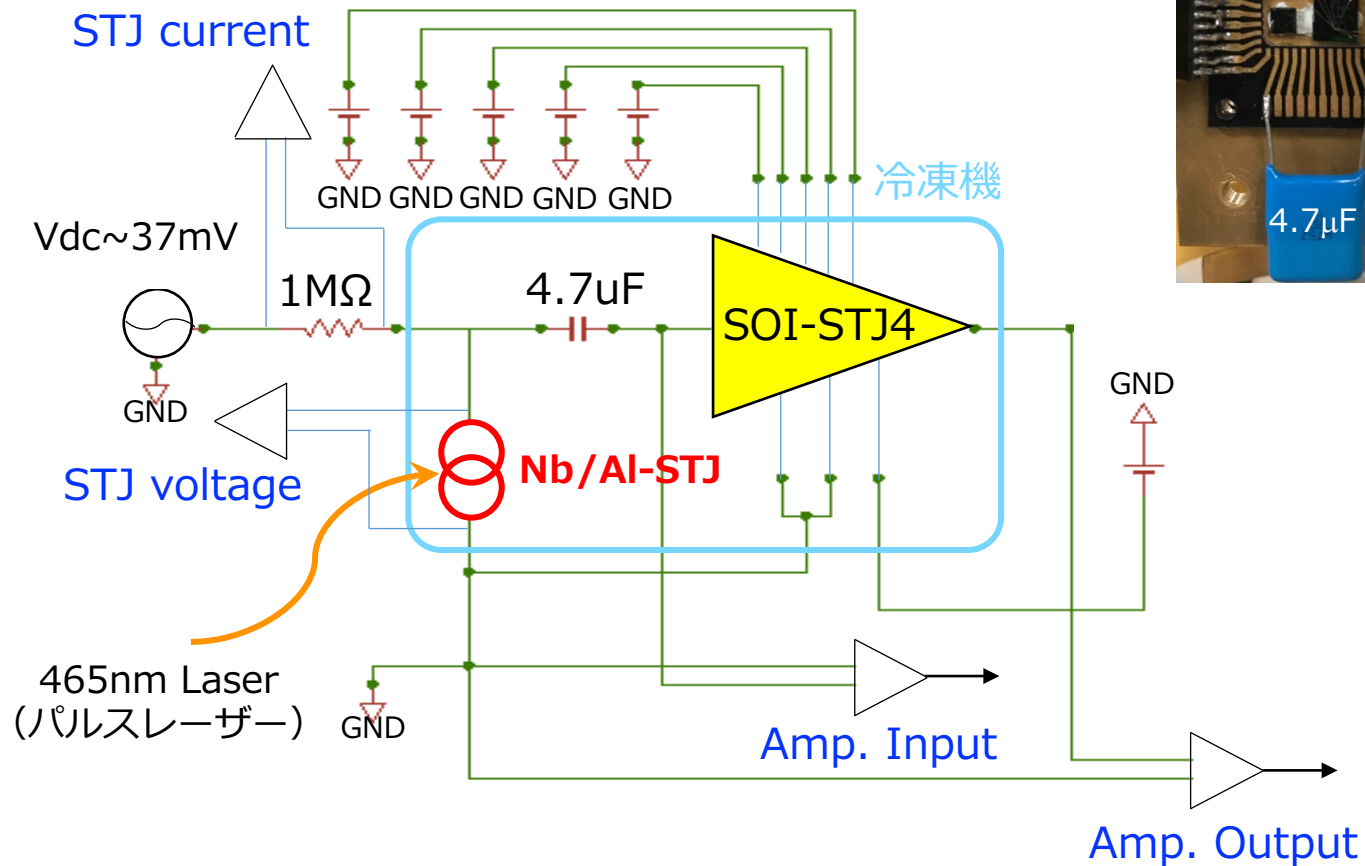
自己バイアス電圧を印加可能

■ ソースフォロア回路

出力インピーダンスの低下

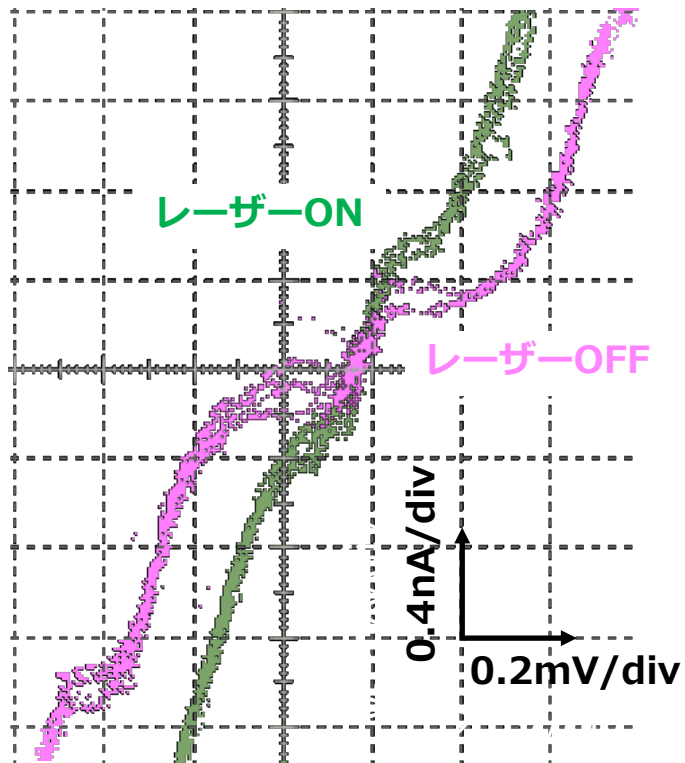
	Type	W [μm]	L [μm]
M1	Nch-source tie	40	1
M2	Pch-source tie	1	10
M3	Nch-body tie	1.6	10
M4	Nch-source tie	70	1
M5	Nch-source tie	60	1
C1	MIM cap.	100 fF	

SOI増幅器によるSTJからの信号の増幅実験



Nb/Al-STJのIV曲線の測定

- ✓ STJの動作に必要なバイアス電圧を決定するためにIV曲線を測定する

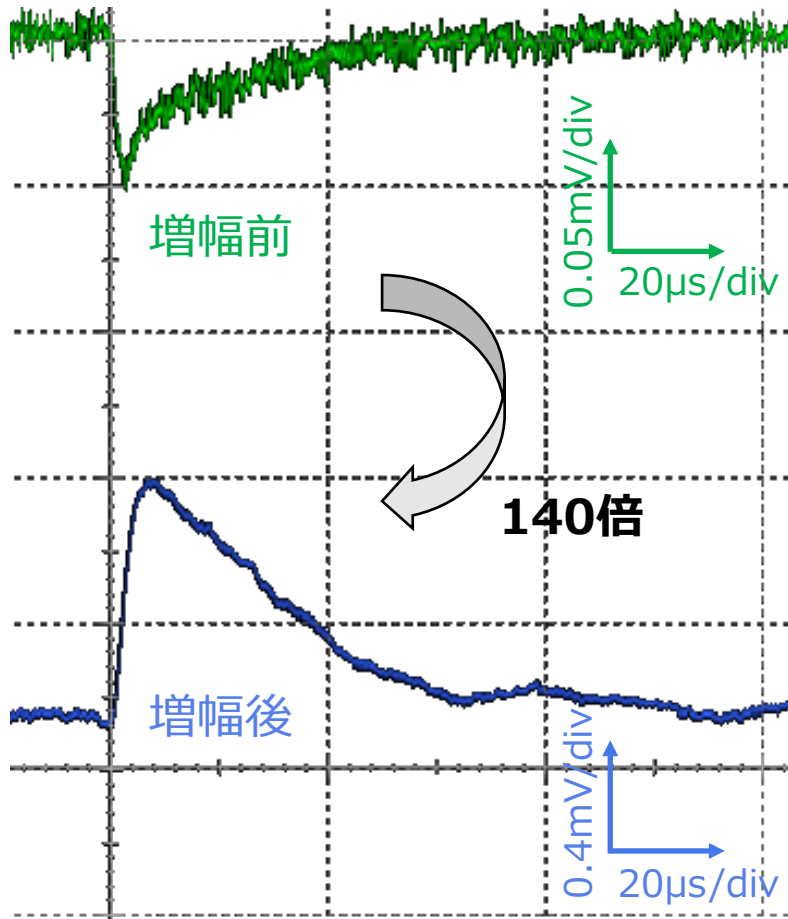


条件

- 20 μ m角Nb/Al-STJ
- レーザー光の波長:465nm
パルス周波数: 50kHz
- 動作温度: 340mK
- 磁場: 約100Gaus

- 磁場によりジョセフソン電流は抑制。
- 可視光DCレーザーにNb/Al-STJが応答しIVが変化することを確認。
- STJを定電流でオペレートさせレーザーパルス照射に対する電圧変化を見る。

STJのパルス光応答および極低温増幅器による増幅後の信号波形

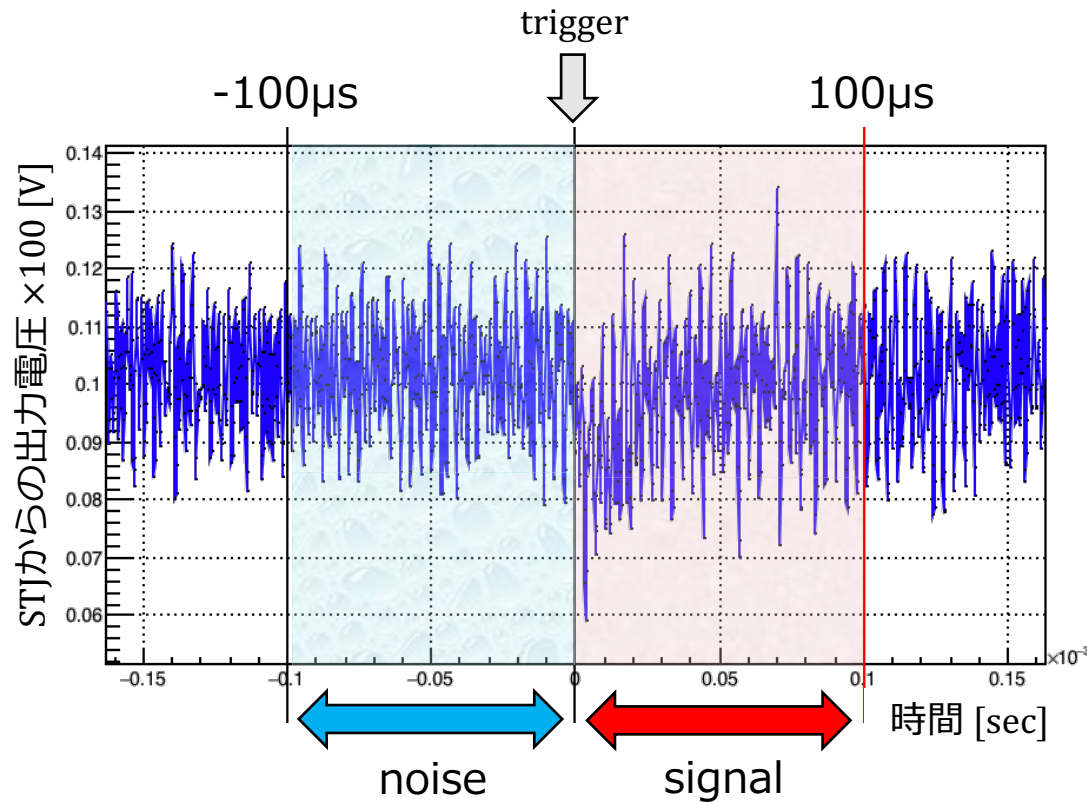


条件

- 20μm角Nb/Al-STJ
- レーザー光の波長:465nm, パルス周波数:50kHz
- 動作温度:370mK
- 定電流: 37nA

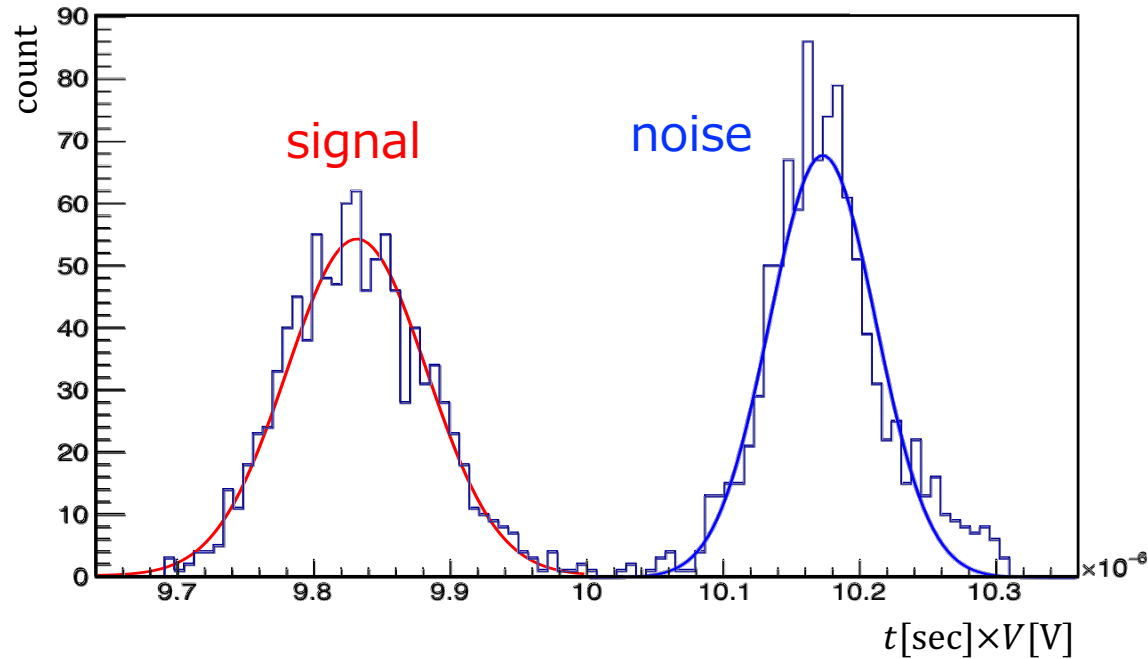
- 極低温でSOI増幅器が動作することを確認
- 14倍の増幅率

増幅前の信号1波形



- 増幅前の信号のS/Nを見積もる
- ✓ トリガー信号の前後 $100\mu\text{s}$ で時間積分し、signalとnoiseの voltage \times time分布を得る。そのフィッティング結果からそれぞれの中央値とシグマを求め、S/Nを計算する。

増幅前の信号1波形



signalの中央値を μ_s 、標準偏差を σ_s 、noiseの中央値を μ_n 、標準偏差を σ_n とする。

$$\frac{S}{N} = \frac{\mu_s - \mu_n}{\sigma_n} = \frac{9.832 \times 10^{-6} - 1.017 \times 10^{-5}}{3.896 \times 10^{-8}} \sim 8.68$$

※増幅後のデータは未取得

入射光子数の見積もり

signalの中央値を μ_s 、標準偏差を σ_s 、noiseの中央値を μ_n 、標準偏差を σ_n とする。
 N_γ 個の光子が入射した時、比例定数 G として $\mu = \mu_s - \mu_n = GN_\gamma$ と書けるとする。

$$GN_\gamma \text{の揺らぎは、} \sigma(GN_\gamma) = G\sigma(N_\gamma) = G\sqrt{N_\gamma} \cdots (1)$$

(G の揺らぎはないと仮定)

$$\text{また、条件より } \sigma(GN_\gamma) = \sigma(\mu_s - \mu_n) = \sigma(\mu)$$

かつ

$$\mu_s = \mu_n + \mu \text{ の分散より、} \sigma_s^2 = \sigma_n^2 + \sigma(\mu)^2 \text{ なので}$$

$$\sigma(GN_\gamma) = \sqrt{\sigma_s^2 - \sigma_n^2} \cdots (2)$$

条件と(1)、(2)より

$$N_\gamma = \frac{(GN_\gamma)^2}{(G\sqrt{N_\gamma})^2} = \frac{(\mu_s - \mu_n)^2}{\sigma_s^2 - \sigma_n^2} = \frac{(9.83 \times 10^{-6} - 10.17 \times 10^{-6})^2}{(5.14 \times 10^{-8})^2 - (3.90 \times 10^{-8})^2} \sim 103 \text{個}$$

まとめ

- STJからの信号をノイズが乗る前、すなわち極低温環境下で増幅したい。そのために SOI前置増幅器とSTJをチップキャリア上に並べ、STJからのパルス光応答信号を増幅する試験を行った。
 - ✓ 20 μ m角Nb/Al-STJのIV曲線を測定し、正常動作していることを確認。
 - ✓ 前置増幅器が極低温（0.3~0.4K）で動作することを確認し、STJからのパルス光応答信号を増幅することを確認。
 - ✓ 信号波形からS/Nを計算し、増幅前後のS/Nの改善を評価できることを示した。また増幅前の信号波形から入射光子数を見積もりも可能であると示した。

Back up

STJ back-tunneling effect

- 異なるエネルギーギャップ ($\Delta_{\text{Nb}} > \Delta_{\text{Al}}$) を持つ2層の超伝導膜により Al層（絶縁膜側）の準粒子密度が上がる
- 絶縁膜付近の準粒子が複数のクーパー対を仲介する
- Nb/Al-STJ : Nb(200nm)/Al(70nm)/AlOx/Al(70nm)/Nb(200nm)
- Gain: ~ 10

