

2016 2/12 筑波大学 物理学専攻 修論発表会

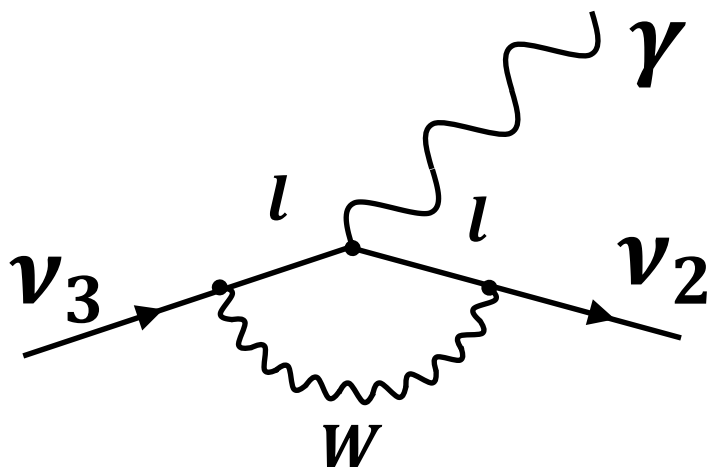
ニュートリノ崩壊光探索のための 超伝導トンネル接合光検出器 及び 極低温増幅器の開発研究

筑波大学 数理物質研究科 物理学専攻 博士前期 2年
素粒子実験研究室
先崎 蓮

研究の動機

ニュートリノの絶対質量は未だ求まっていない

→ ニュートリノ崩壊を利用すれば、ニュートリノの絶対質量が求められる



崩壊光子のエネルギーは

ニュートリノ振動実験で分かっている

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

* m_3 の静止系

精度よく測定

→ 絶対質量 m_3 が求まる

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

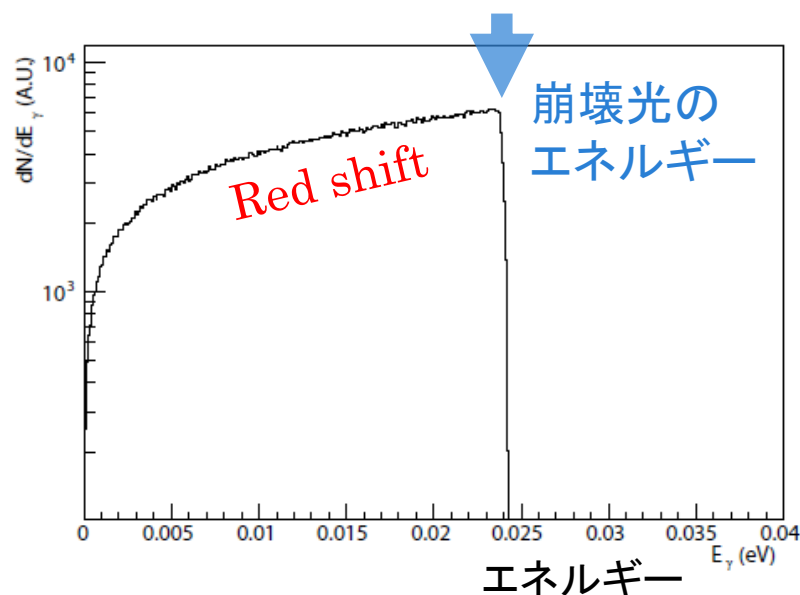
$$E_\gamma = 25\text{meV}(\sim 50\mu\text{m})$$

→ 既存の半導体検出器(ギャップエネルギー~数eV)では検出不可

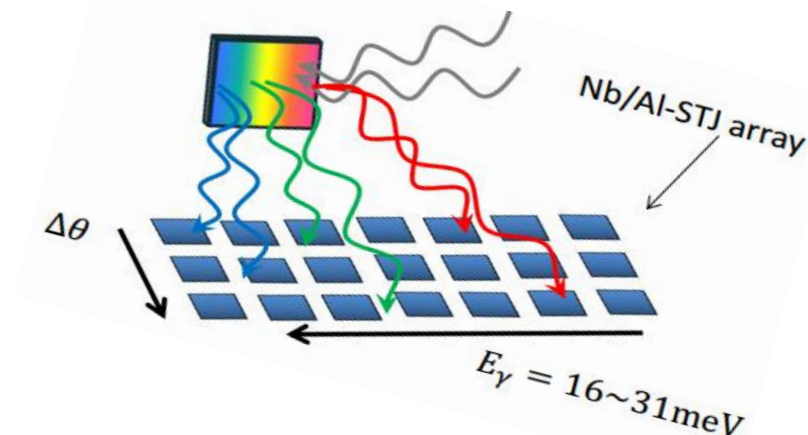
→ 低エネルギー(~meV)でも感度を持つ超伝導トンネル接合光検出器の開発

ニュートリノ崩壊光探索実験

- ニュートリノ崩壊の寿命: $\tau \sim O(10^{17} \text{ yrs})$ *L-R対称模型を仮定
- 宇宙背景ニュートリノ($110 \nu_i / \text{cm}^3$) *未発見の崩壊光を探索



- 回折格子で遠赤外光を分光してスペクトルを得る
- 地上200~300km, 3min ロケット実験



崩壊光探索実験の目的

- ニュートリノ絶対質量の測定
- 宇宙背景ニュートリノの存在の証明
- ニュートリノの磁気モーメント

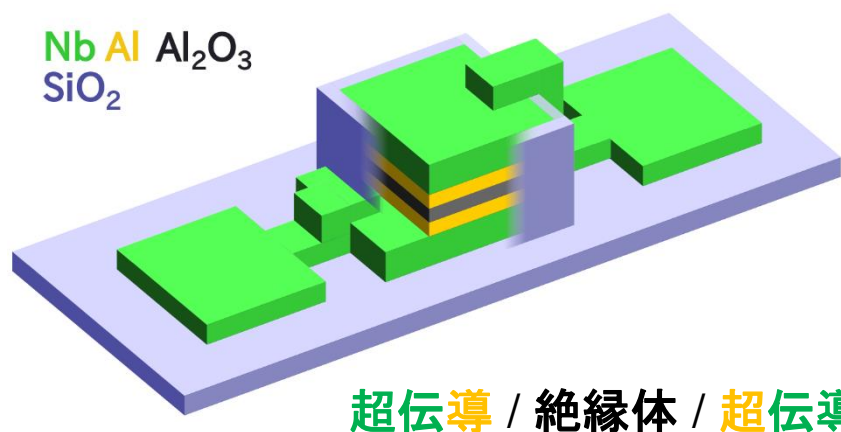
測定下限値 $\tau \sim 10^{12} \text{ years} \rightarrow 10^{14} \text{ years}$

超伝導トンネル接合光検出器(STJ検出器)

崩壊光のエネルギーで1光子観測可能な検出器の開発

: 超伝導トンネル接合光検出器 (Superconducting Tunnel Junction)

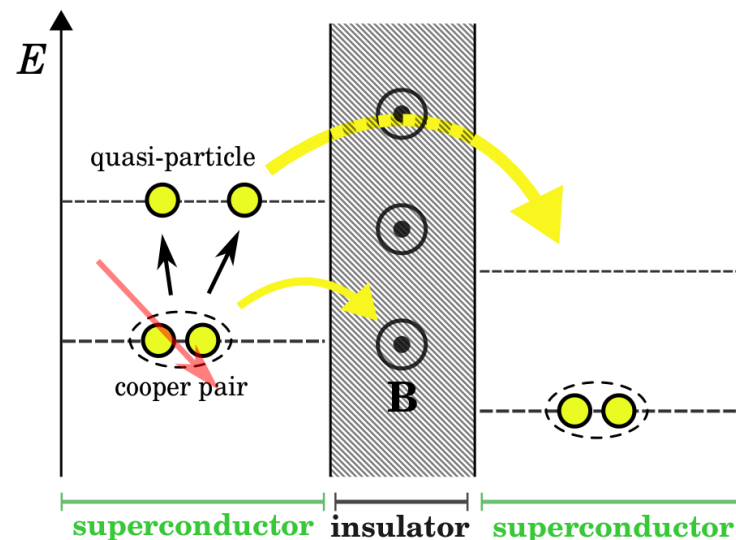
Nb/Al-STJ



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

動作原理

- 粒子の入射でクーパ対が破壊
- 生成された電子のトンネル電流を観測
- クーパ対のトンネルは磁場で抑制



検出器開発の現状と極低温増幅器の導入

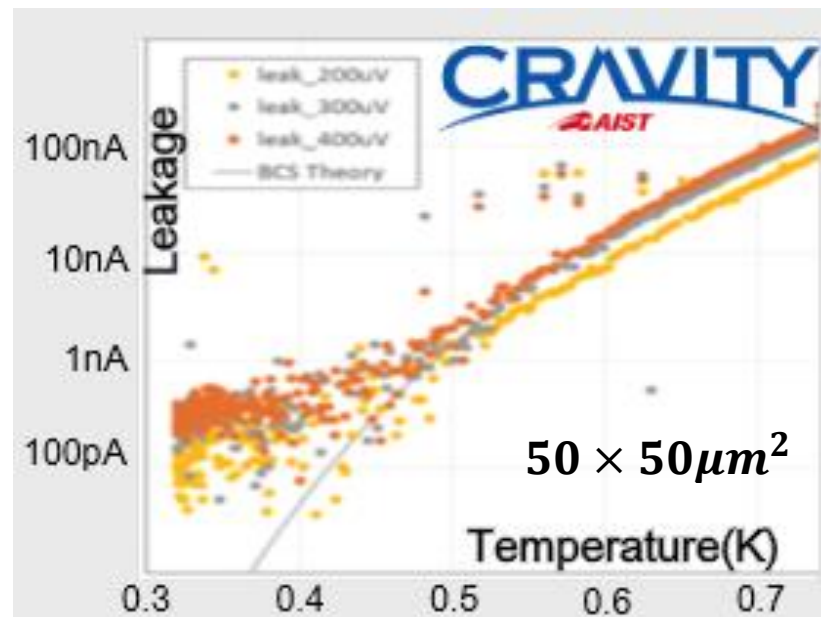
STJ検出器への要求性能

- リーク電流: $\leq 400\text{pA}$
- 現状 200pA ($20 \times 20\mu\text{m}^2$ 素子)
- 要求は達成

しかし、測定系雑音により

1光子観測には至っていない

- 検出器直近(冷凍機内: $\leq 3\text{K}$)に増幅器を置き、信号を増幅読出し



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

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

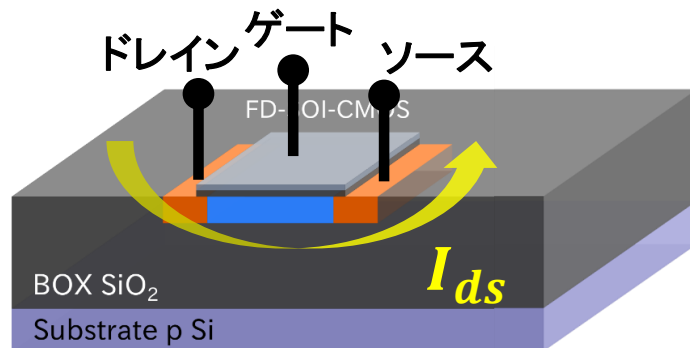
極低温増幅器に対する要求

- 300mKでも動作
- STJ検出器の信号を増幅可 (*信号幅: 数~数百 μs)
- 冷凍機の配線容量負荷(~数百pF)の下でも信号を伝送可能
- 低消費電力(*冷凍機の冷却能力: $100\mu\text{W}$ @350mK, 0.25W @4.2K)

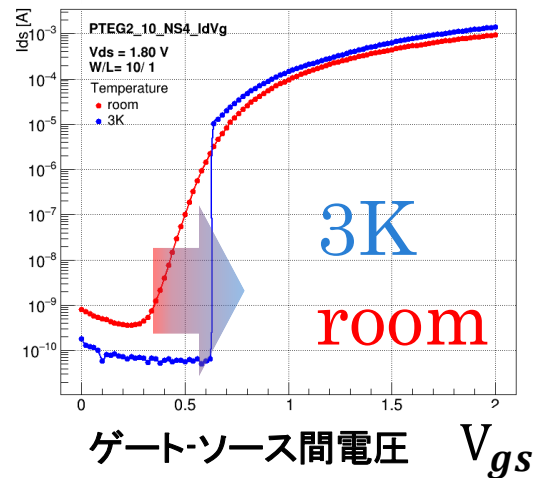
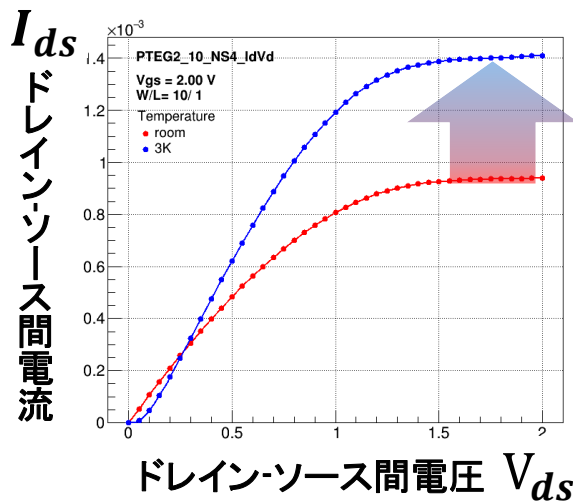
FD-SOI-MOSFET

極低温でも動作可能なトランジスタ

: **F**ully **D**epleted - **S**ilicon **O**n **I**nsulator **MOSFET**



- SiO₂ 絶縁膜上にMOSFETを形成
→ 寄生容量が小さく、低消費電力
- 4K以下でも動作



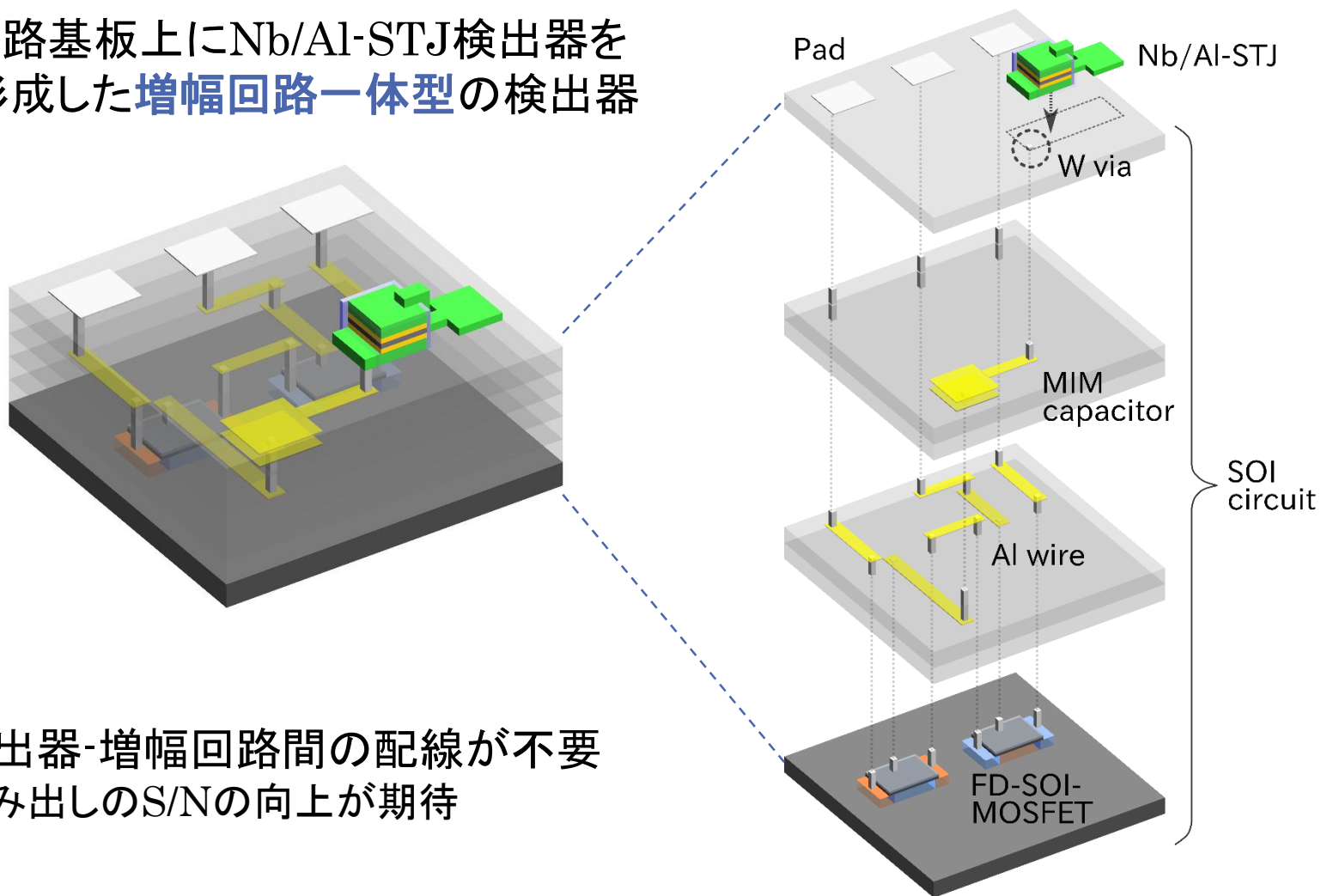
低温特性

- 電流値の増加
- 閾値電圧の上昇

→ 性能の劣化はなく、特性変化を考慮すれば極低温でも十分使用できる

SOI増幅回路一体型STJ検出器(SOI-STJ)

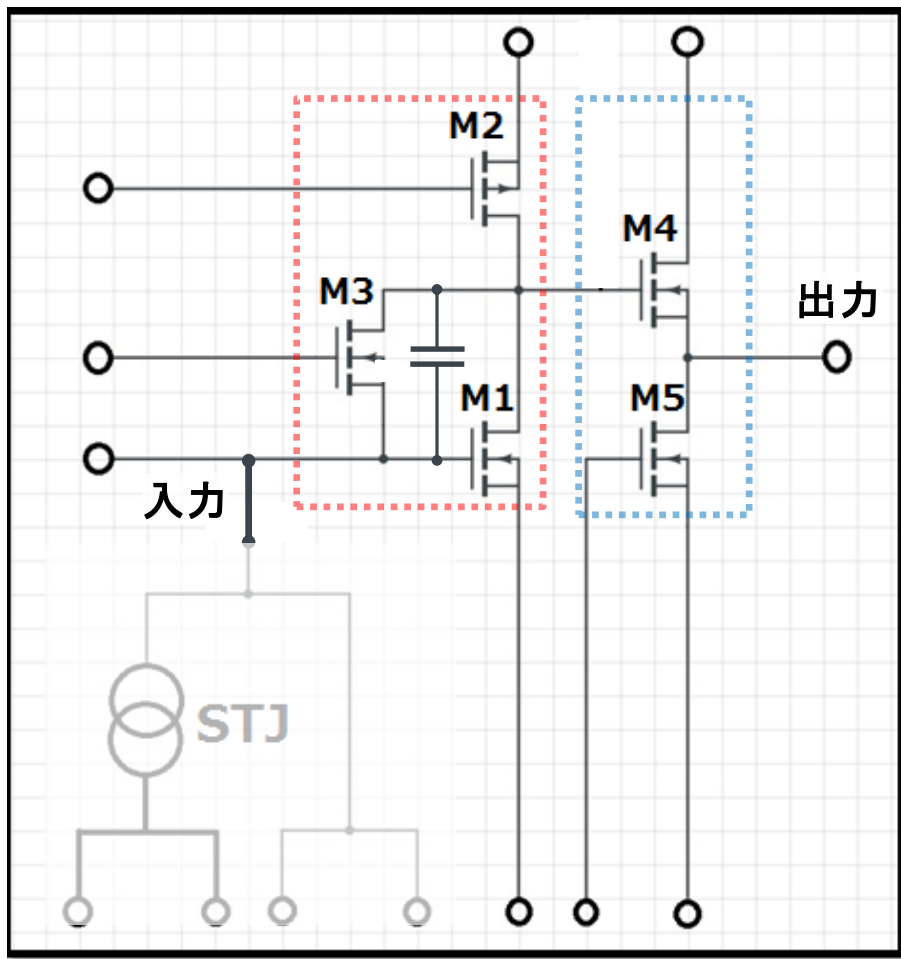
SOI回路基板上にNb/Al-STJ検出器を
直接形成した増幅回路一体型の検出器



- 検出器-増幅回路間の配線が不要
- 読み出しのS/Nの向上が期待

SOI-STJ 増幅回路の設計

SOI-STJ4



これまでの回路のデザイン

- **増幅段: ソース接地増幅段**
 - 入力インピーダンスが
検出器のインピーダンスに比べ高く、
信号が増幅回路へ伝わらない
- **バッファ段: ソースフォロワ**
 - 出力インピーダンスを下げる
 - 高い出力容量負荷(冷凍機配線)でも
信号を送る



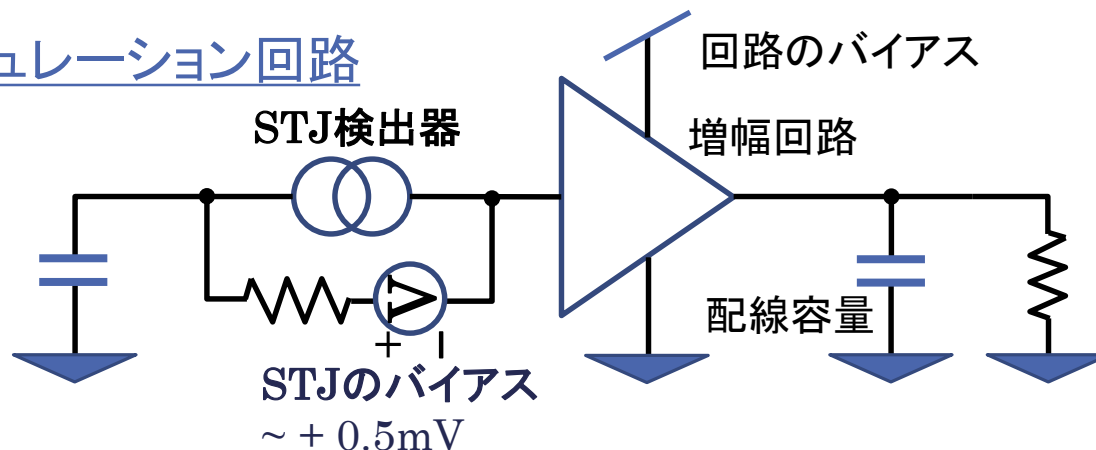
新しい回路のデザイン

- **増幅段: 電荷積分アンプ**
 - 入力インピーダンスを低くした
- **バッファ段: ソースフォロワ**

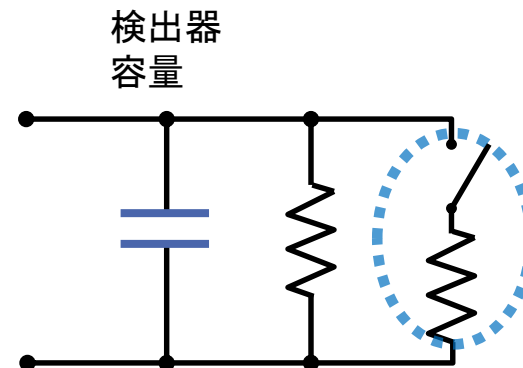
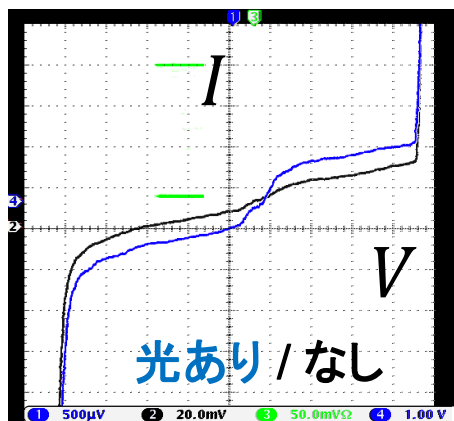
光応答のシミュレーション

- 室温条件でSTJ検出器の信号を増幅できるかシミュレーションを行った

シミュレーション回路



STJ検出器の回路モデル: STJ検出器のI-V特性を線形抵抗で表した



光応答シミュレーション 結果

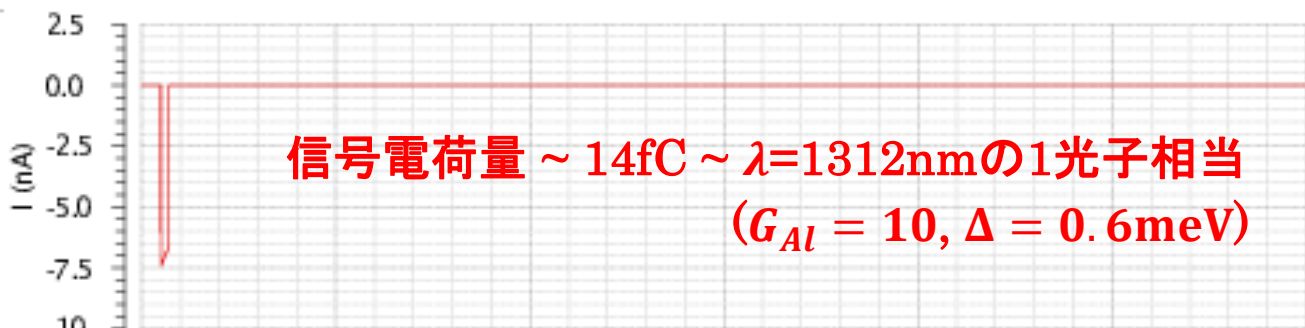
シミュレーション条件

- リーク電流: 500pA @0.5mV
- STJ検出器容量: 250pF
- STJ両端電圧: 0.49mV

Name

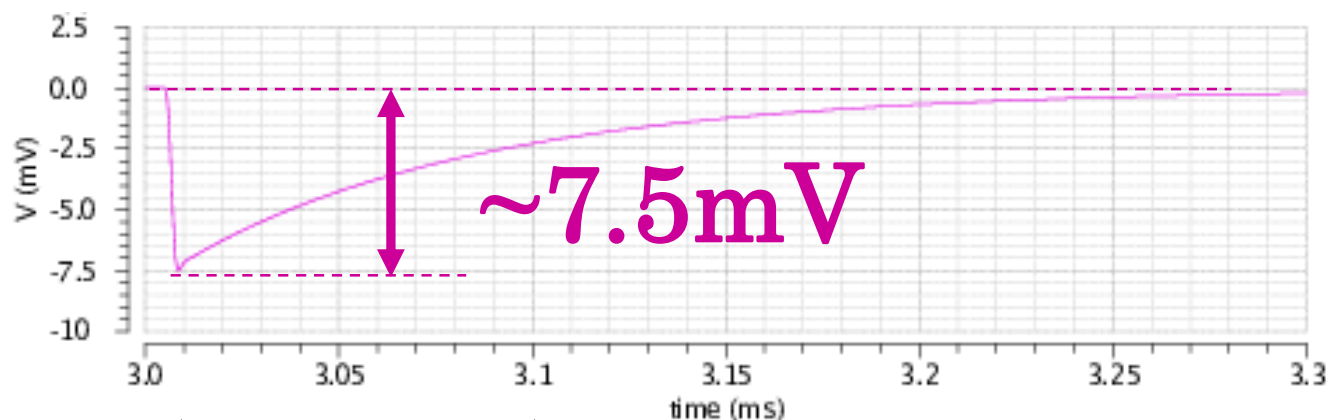
■ I_signal

STJ
信号電流源



■ VOUT

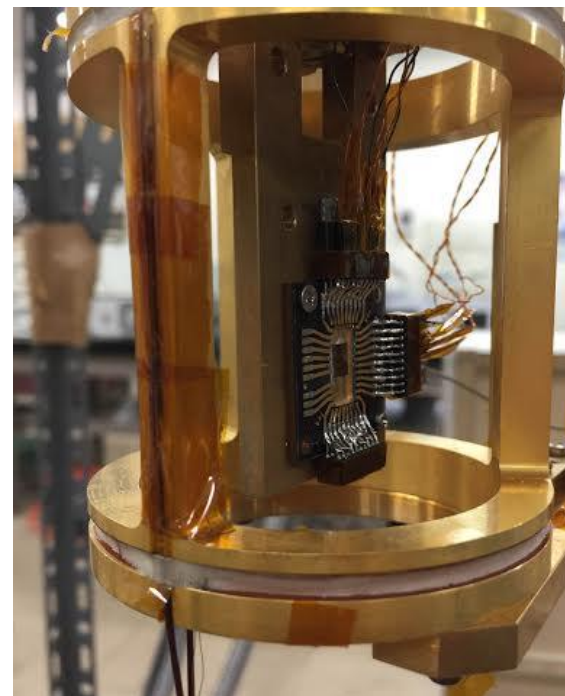
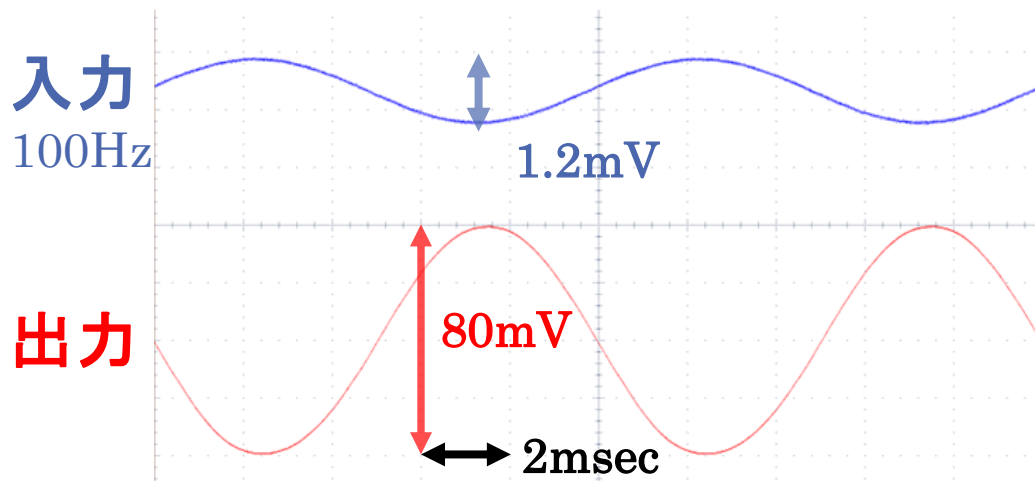
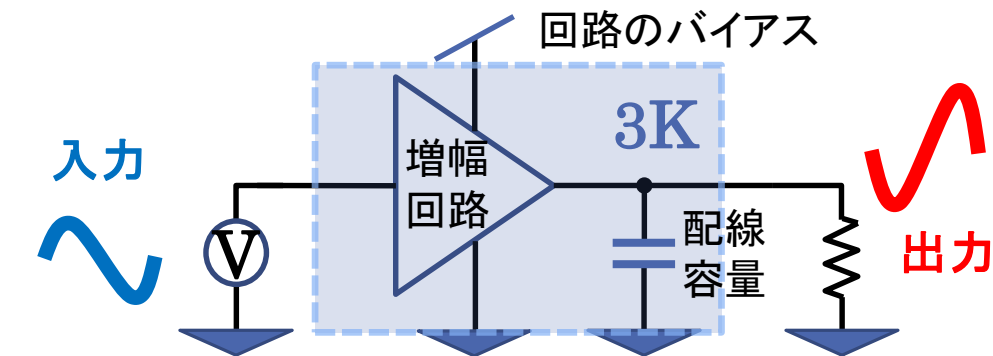
増幅回路
出力電圧



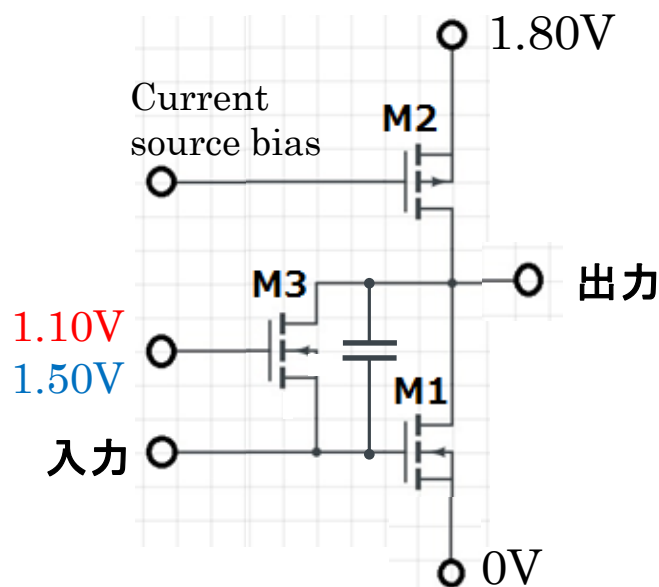
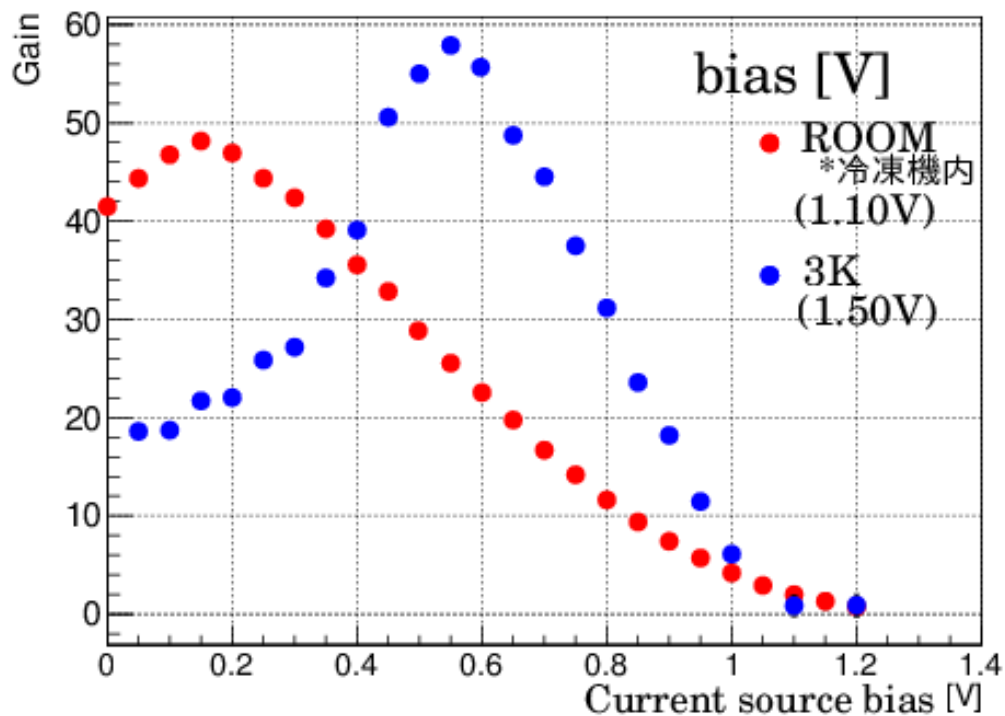
0.25ms

極低温での性能試験

- 低温下でも回路が動作するか、性能の測定・評価を行った

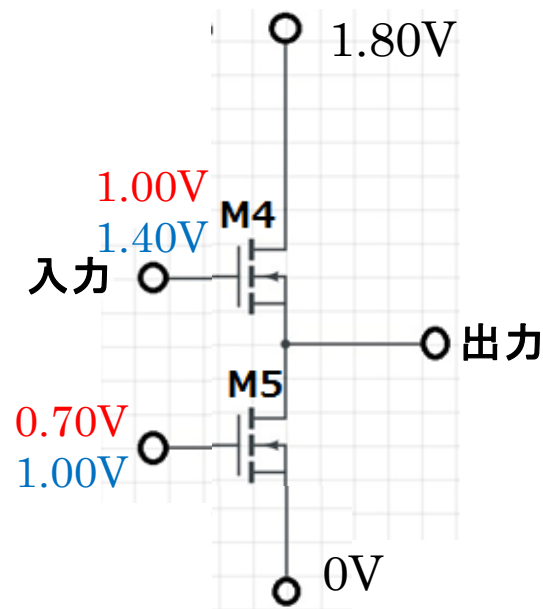
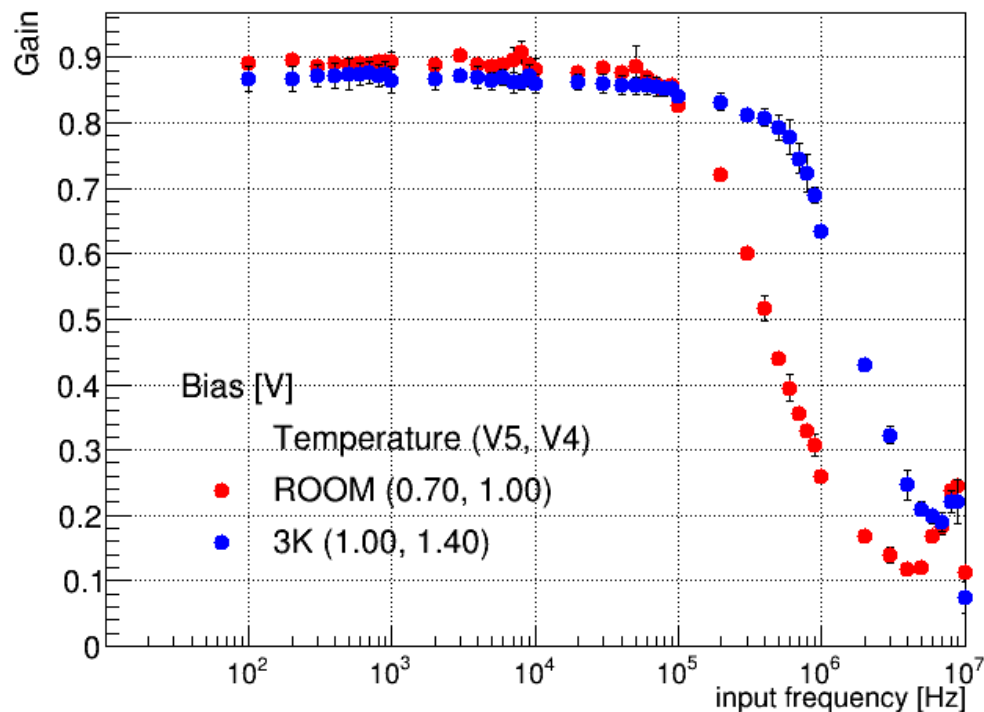


増幅段 利得



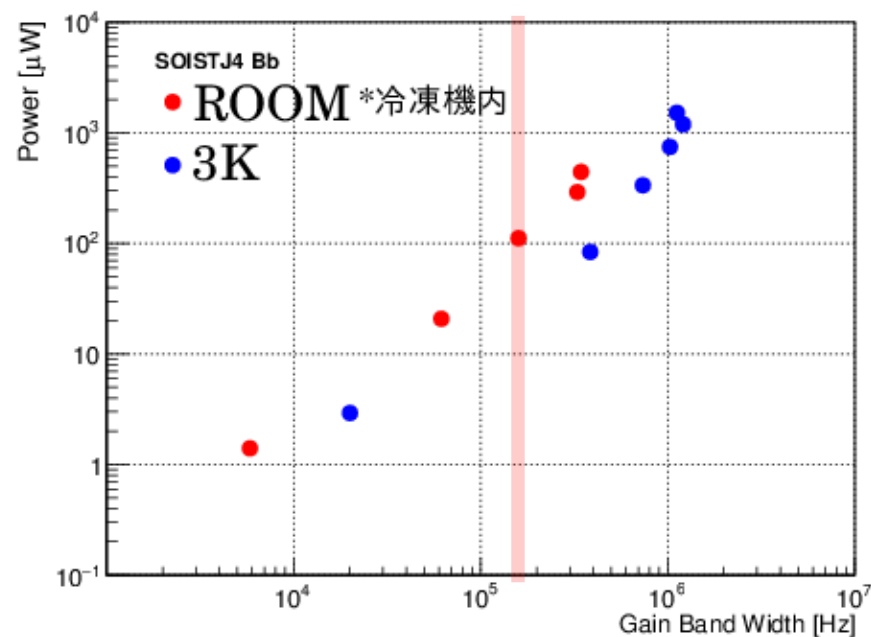
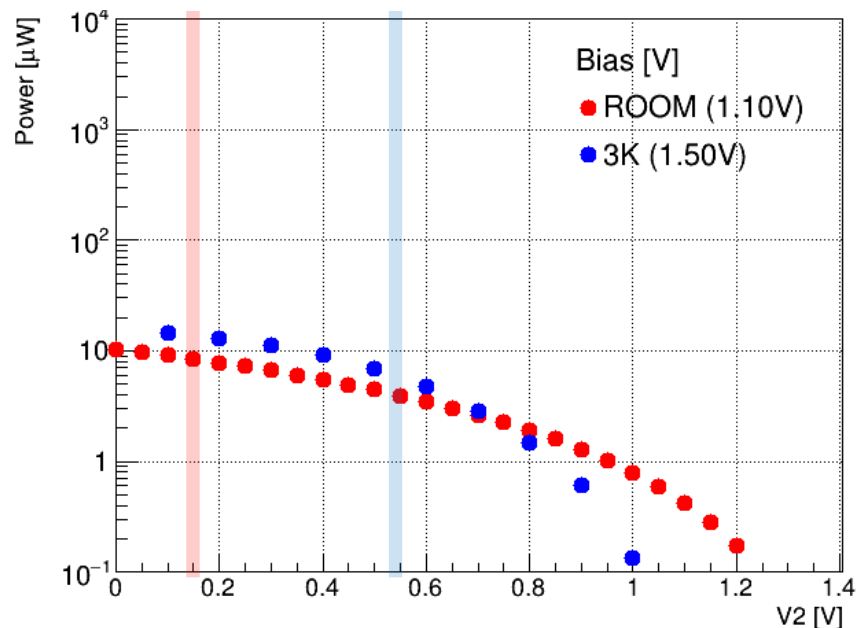
- シミュレーション上、光応答増幅に必要な利得: **~50倍**(室温)
- バイアス電圧を調節すれば、低温時**~60倍**: 室温時とほぼ同じ性能が得られる

バッファ段 周波数特性



- シミュレーション上、光応答増幅に必要な周波数応答: **~200kHz**(室温)
- バイアス電圧を調節すれば、低温時最大**~500kHz**: 室温時とほぼ同じ性能

消費電力



室温シミュレーション時の性能を冷凍機内でも実現できるか？

- 増幅段: 利得 ~ 60 倍 (3K) の時、 $\leq 10\mu\text{W}$
- バッファ段: 周波数応答 $\sim 200\text{kHz}$ (3K) の時、数十 μW

→ 1素子ならば350mK下(冷却能力 $100\mu\text{W}$)で、シミュレーション時と同性能で駆動可能

まとめ

崩壊光探索のため超伝導トンネル接合光検出器の開発研究を行っている。
しかし、読出し系での雑音により目的の1光子検出には至っていない。

→ 極低温前置増幅器の開発研究を行っている

- FD-SOI-MOSFETを使った増幅回路一体型STJ検出器(SOI-STJ)

■ 前号機の問題点を踏まえ、新たな増幅回路を設計した(SOI-STJ4)

→ 1312nm, ~1photoの信号を~7.5mVに増幅できる設計

■ SOI-STJ4増幅回路の低温特性を評価した

- 3Kでも、バイアスを調節すれば室温時と同程度の性能で動作することを確認した
増幅段利得

- 室温時~50倍 → 3K時~60倍

バッファ段: 周波数応答

- 室温時 ~ 200kHzまで → 3K時 ~500kHzまで

- 1素子ならば、350mK(消費電力100 μ W)でもシミュレーションと同じ性能が再現可能

