

Performance evaluation of Nb/Al-STJ fabricated at CRAVITY

筑波大学 森内航也 ニュートリノ研究会2015年12月3日

筑波大数理, 理研^A, KEK^B, 岡山大^C, 福井大学^D, 近畿大学^E, 関西学院大^F,
静岡大^G, JAXA^H, AIST^I, Fermilab^J, Seoul Nalt. Univ.^K

森内航也, 金信弘, 武内勇司, 武政健一、木内健司、永田 和樹、笠原宏太、先崎蓮、八木俊輔、美馬寛^A, 新井康夫^B, 倉知郁生^B, 羽澄昌史^B, 石野宏和^C, 吉田拓生^D, 広瀬龍太^D, 加藤幸弘^E, 松浦周二^F, 川人祥二^G, 馬場俊祐^H, 池田博一^H, 和田武彦^H, 長勢晃一^H, 志岐成友^I, 浮辺雅宏^I, 藤井剛^I, 大久保雅隆^I, Erik Ramberg^J, Paul Rubinov^J, Dmitri Sergatskov^J, Soo-Bong Kim^K

ニュートリノ崩壊光探索

質量の小さいニュートリノに崩壊するときに出る光子のエネルギーを測定する

- 質量の測定 $m_3 = \frac{m_3^2 - m_2^2}{2E_\gamma}$

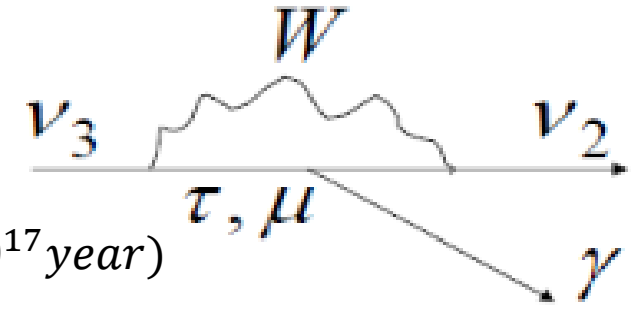
ニュートリノ振動実験による結果($m_3^2 - m_2^2$)と合わせることで
ニュートリノ質量の決定。

- ニュートリノ崩壊の寿命

SMでは寿命 $\tau = O(10^{43} \text{ year})$, Left-Right Symmetric Model では $\tau = O(10^{17} \text{ year})$

現在の実験による寿命の下限值は $\tau > O(10^{12} \text{ year})$

我々の実験では寿命の下限值引き上げも目指す。



ニュートリノ崩壊光探索実験

長いニュートリノ寿命 $> 10^{12} \text{ year}$

⇒ 大量のニュートリノ源:

宇宙背景ニュートリノの崩壊光の観測

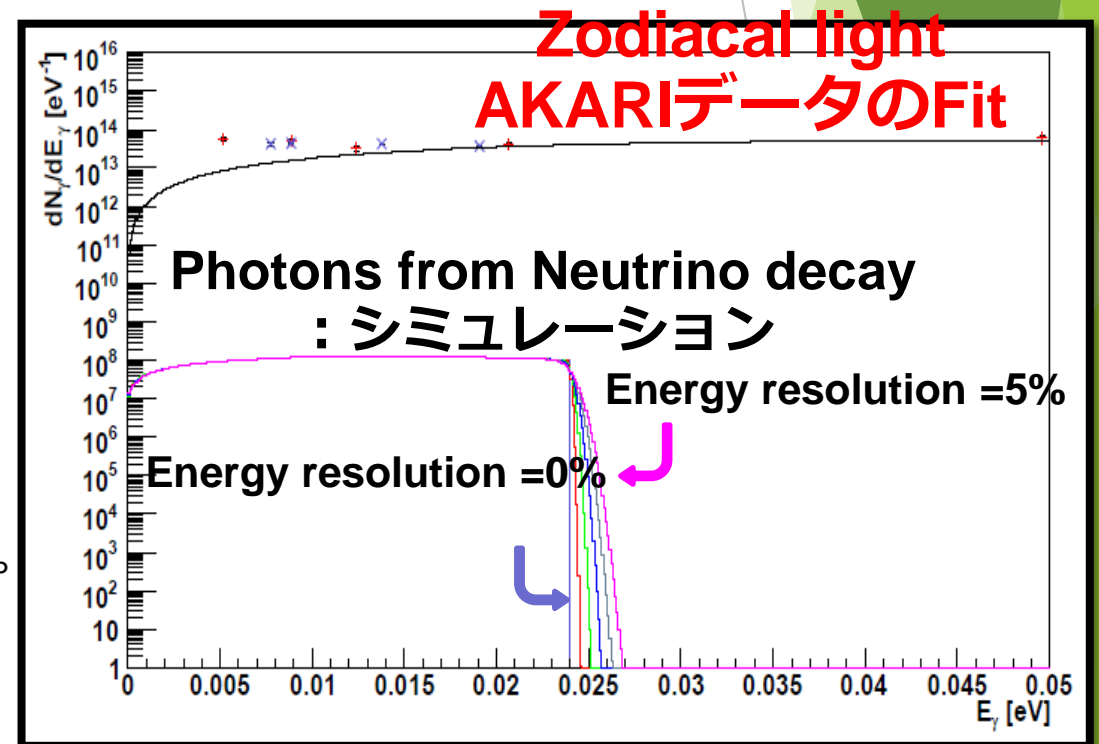
検出器

$E_\gamma = 25 \text{ meV}$ ($m_3 = 50 \text{ meV}$) を仮定

$E: 16 \sim 31 \text{ meV}$ ($\lambda: 40 - 80 \mu\text{m}$)の領域でスペクトルを測定。

遠赤外領域で高いエネルギー分解能が可能である。

⇒ 超伝導検出器



STJ (Superconducting Tunnel Junction)

STJは超伝導体/絶縁膜/超伝導体の接合で形成された素子（ジョセフソン素子）である

検出器としての動作原理

1. 超伝導体層のクーパ対が光子を吸収し、準粒子を生成。
2. 上部超伝導層から下部超伝導層に電圧をかけておくことで準粒子がトンネルし、電流が生じる。
3. トンネル電流を測定する。

トラッピングゲイン（STJ内での増幅機構）

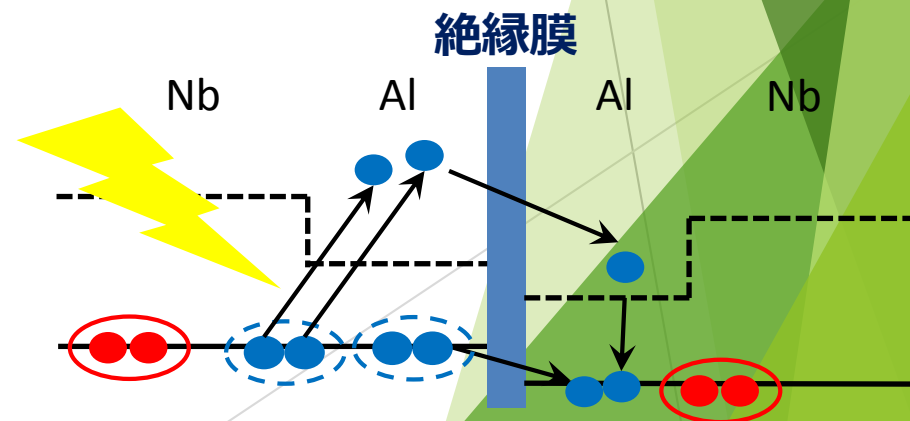
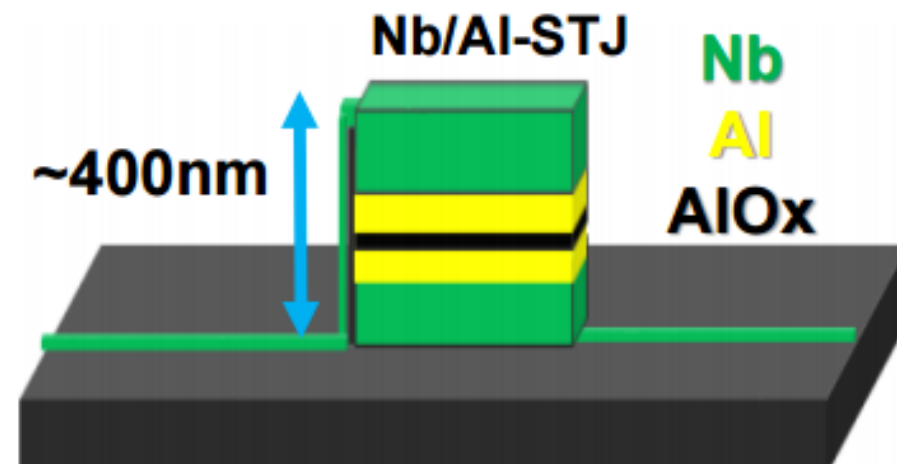
Al層があることにより、絶縁膜付近での準粒子寿命が延びる。
トンネルした粒子がクーパ対に戻ろうとするとき別のクーパ対を破壊。

準粒子生成数

$$N = G_{Al} \frac{E_\gamma}{1.7\Delta}$$

G_{Al} : Al層によるトラッピングゲイン
 E_γ : 入射光子のエネルギー

	Nb	Al
転移温度 T_c (K)	9.23	1.20
エネルギーギャップ Δ (meV)	1.550	0.172



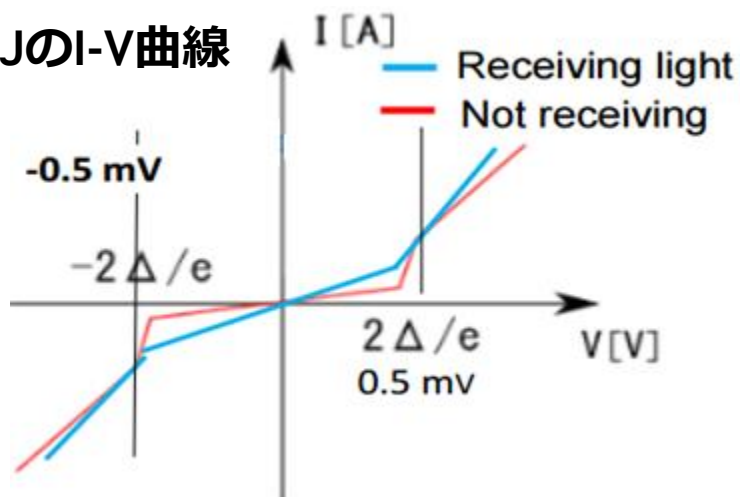
STJの電流電圧特性

磁場を印加しジョセフソンカレントを抑制し、
検出器として動作させる。

動作電圧では光入射なしでも電流が流れる（リークカレント）。

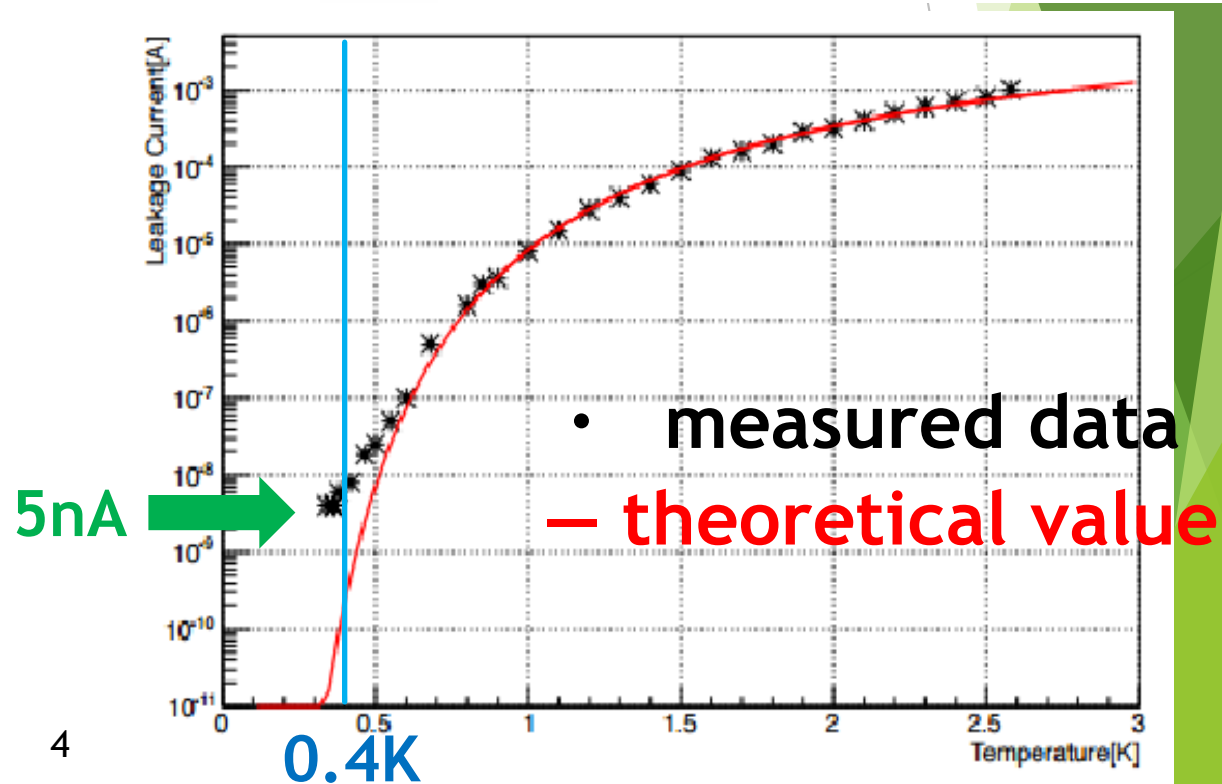
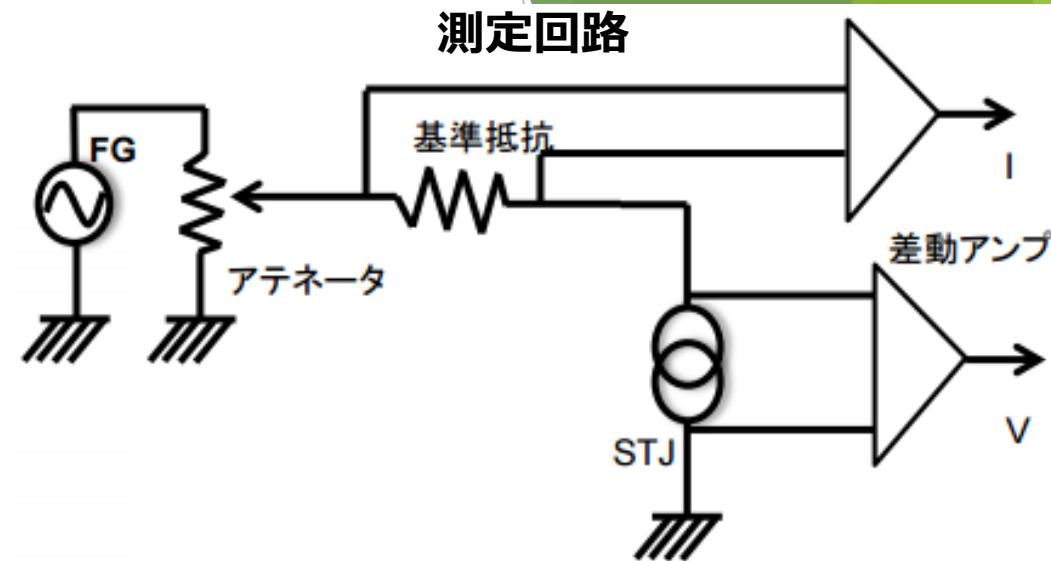
- ・熱励起された電子のトンネル
- ・測定系起因
 - 絶縁膜に垂直な磁束の侵入によるリークカレントの増大
 - 測定系の振動による準粒子の発生
 - 測定回路のGNDの不安定性
- ・絶縁膜の欠陥に流れる電流

・Nb/Al-STJのI-V曲線



熱起因のリークカレント

右図から超伝導転移温度の1/10程度の温度で
熱起因の成分は抑制される。



Nb/Al-STJの開発

25meVの1光子検出への要請

25meVの1光子に対して、200e⁻程度
($G_{al}=10$, 信号幅1.5 μ sを仮定、 Δ は測定値0.57meV)

STJの信号幅1.5 μ sに200e⁻が流れる。

⇒ **信号がノイズに埋もれないためにリークカレントの低減が必要**

リークカレントへの要請 200pA以下

- ・測定系改善によるノイズ低減

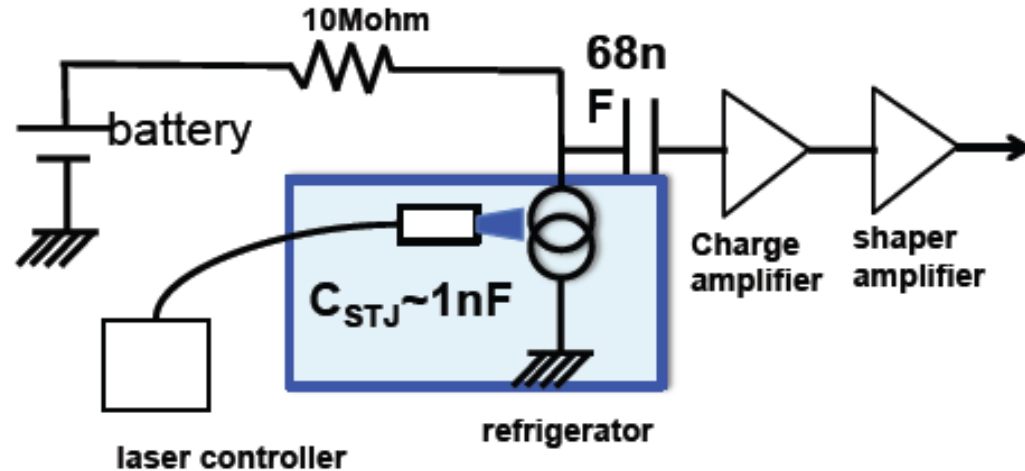
↑ 本発表ではこちらについて報告

⇒ **極低温から室温までの読み出し線にのるノイズと信号の分離**

STJ素子のすぐ近くで信号を増幅

- ・極低温動作可能な増幅回路開発
- SOI-FETを用いた回路の開発

Nb/Al-STJ光応答測定



リークカレント 7nA@0.4mV
 ~0.4mVの電圧で動作させたときの光応答

Charge amp. :ORTEC142C
 Sheper amp. :ORTEC671

可視光、遠赤外光の1光子信号の測定には
 低ノイズの測定系の構築が必要

電流電圧特性

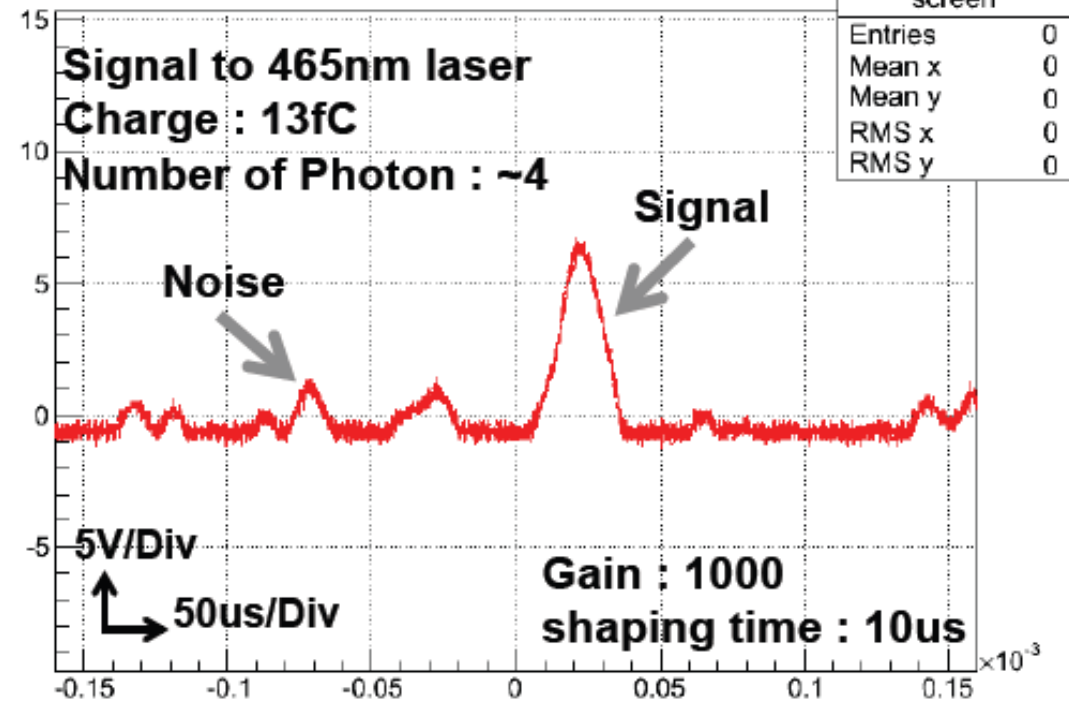
100 μ m x 100 μ m Nb/Al-STJ

7nA@0.4mV

10nA/div

0.2mV/div

1 200 μ V 2 10.0mV 3 5.00 V 4 100n



筑波大学の測定系の改善

3He減圧冷凍機

最低温度300mKで測定可能 ->熱起因リークカレントは十分抑制できる

- ・素子に入る外部磁場へのシールド
ステージを筒上に囲むように磁場シールドの設置
- ・測定回路のGNDの安定化
冷凍機筐体を測定回路のGNDとし、読み出しで用いるオシロスコープ、差動アンプ等の接地し安定させる

この位置に磁場シールドを設置

最低温ステージ



測定系改善後の結果

リークカレント

～10nA → **300pA**に低減(50μm角)

その他100μm角,20μm角では1nA程度

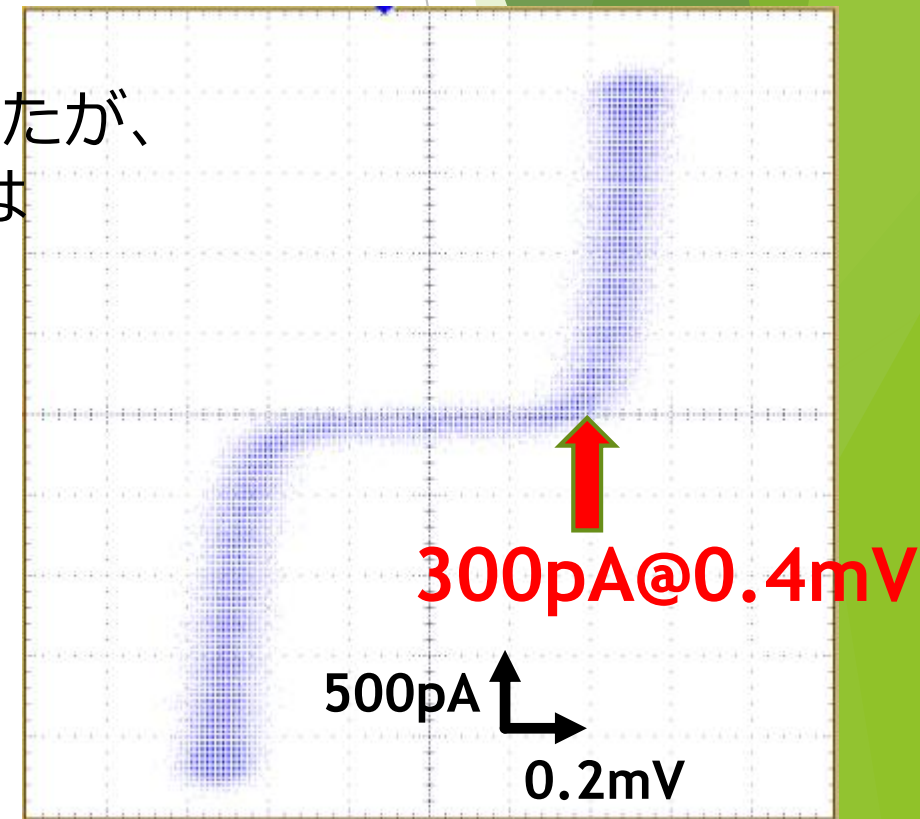
各サイズの素子でリークカレントの低減が達成できたが、
20μm角等の小さいジャンクションサイズの素子では
さらにリークカレントの低減が可能

今後

- ・ 素子への振動の低減
- ・ さらなるGNDの安定化

これら2点の改善を進め、ノイズ低減を進める
改善された測定系で光応答の測定、評価を行う

50μm角 Nb/Al-STJ 電流電圧特性
温度：0.3K



STJ静電容量の測定

STJの静電容量は信号増幅回路の設計上重要値を知っておく必要がある

測定方法

1. 極低温でのSTJの電流電圧特性の測定

ファンクションジェネレータ(FG)からsine波を入力し、I-Vを測定

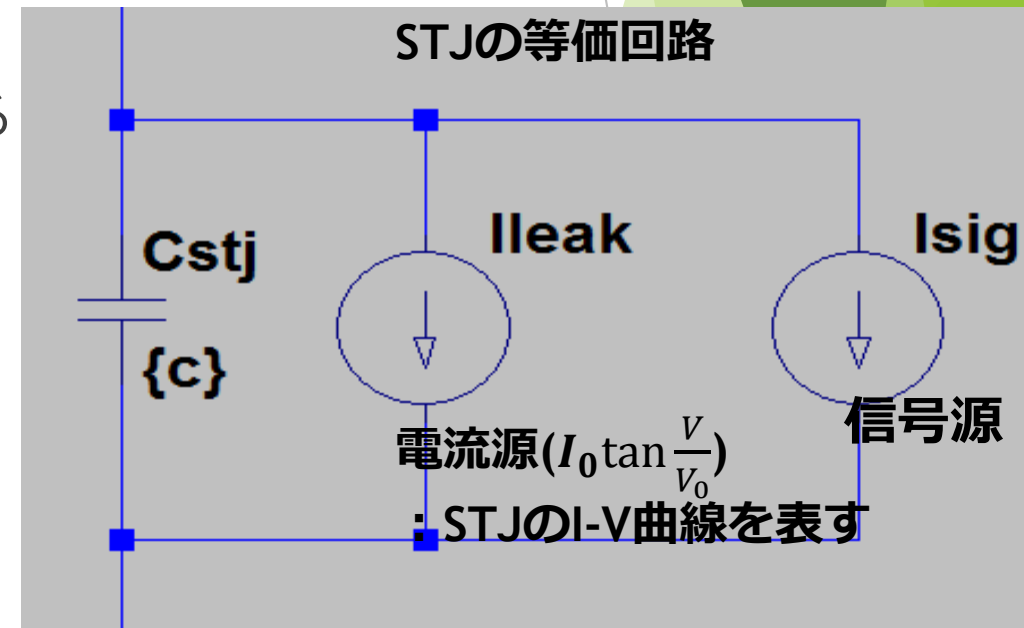
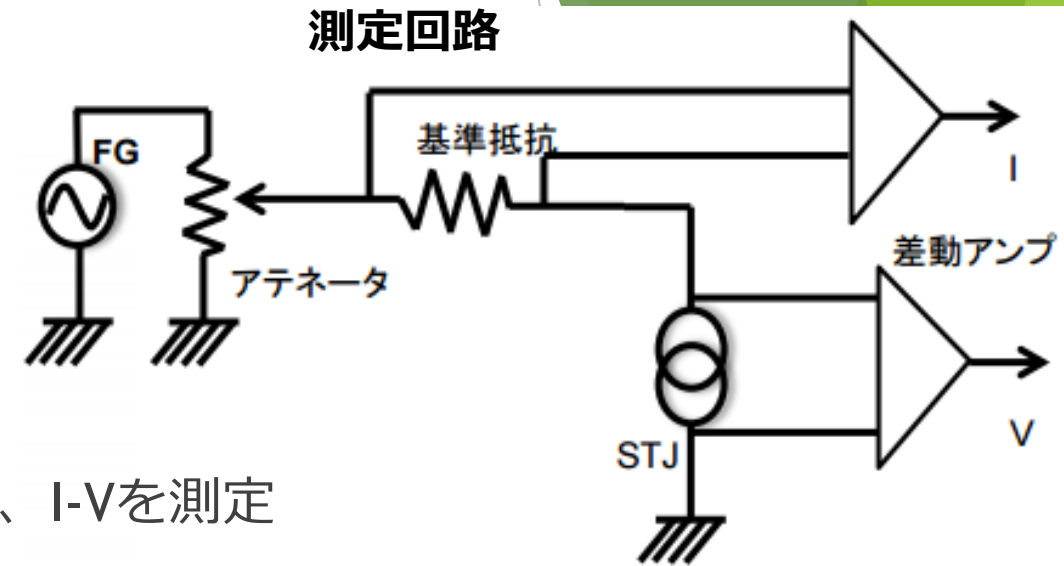
10, 500, 1000, 2000Hzの複数の周波数でI-Vの測定, ヒステリシスをみる

2. 回路シミュレータで実際の測定をシミュレートさせる

STJの等価回路として右図の回路を仮定

電流電圧特性をtangent 関数で近似

C_{stj} の数値を変え、測定結果との一致をみる



STJ静電容量の測定結果

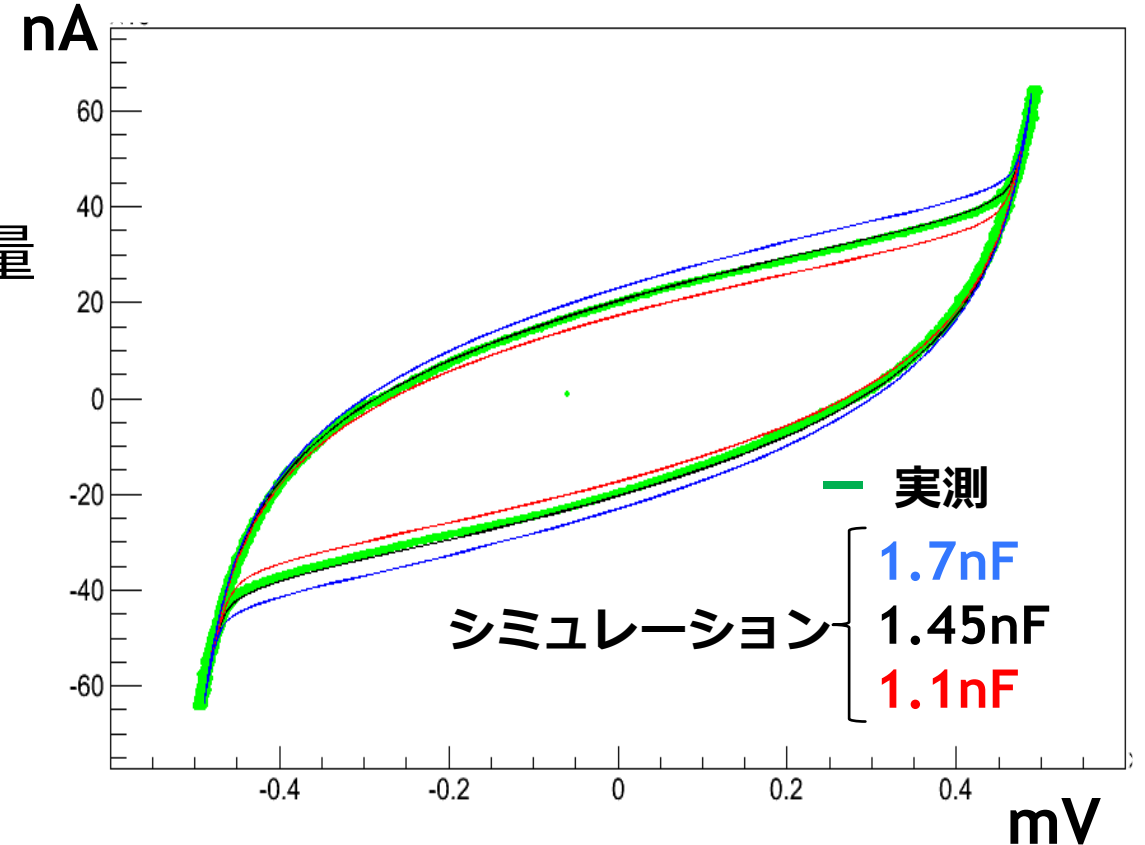
右図は100 μm 角STJの静電容量測定
静電容量1.45nF

STJの代わりに100k Ω 抵抗器をいれ、
同様の方法で測定し、測定系の寄生容量
の測定をおこなった。
寄生容量0.8nF

素子そのものの静電容量は
0.65nF (=1.45nF - 0.8nF)

Nb/Al-STJ電流電圧特性
100 μm 角の素子、Sin波2000Hzで測定

Graph



STJ静電容量 ジャンクションサイズ依存性

右図はjunction size と静電容量の関係

- ・ ダミー抵抗での測定からだした寄生容量0.8nF

は先に引いてある。

- ・ 誤差0.1nFはシミュレーション結果を0.1nFごとに比較したため

- ・ $C = C_{stj}(=p0 \times L^2) + C_{p1}$ (=p1:寄生容量)

ダミー抵抗測定で測定できていなかった寄生容量

$C_{p1}=0.3\text{nF}$

$C_{stj}(\text{junction size: } 100\mu\text{m} \times 100\mu\text{m})$

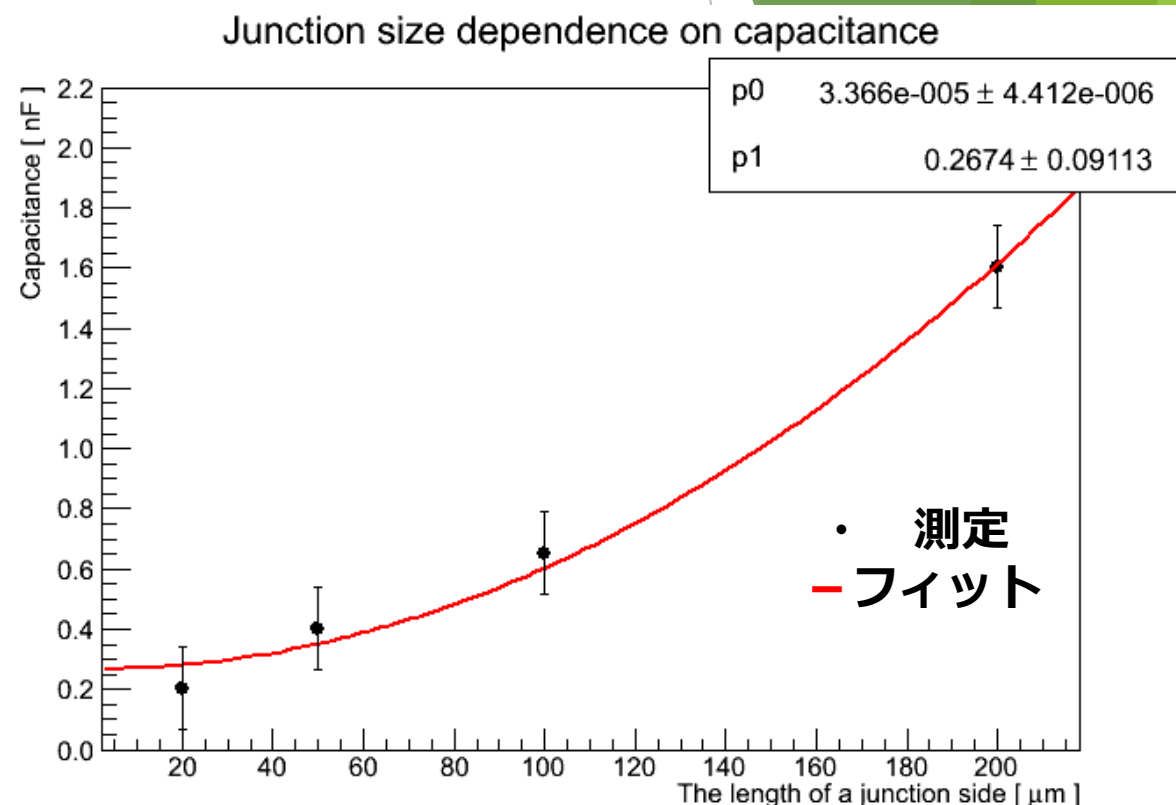
$=0.35 \pm 0.1\text{nF}$

増幅回路の設計では静電容量は小さいほうが良い。

Junction sizeが小さいものについて

高精度で静電容量の測定を進める。

- ・ シミュレーション時の静電容量を細かく変えて比較。
- ・ 複数の素子について静電容量を測り、素子ごとのばらつきを見る。



まとめ

- ・ 測定系の改善
磁場シールド、測定回路GNDの安定化によりノイズが低減
~10nA → 300pA@0.4mV (junction size 50μm x 50μm Nb/Al-STJ)
今後
 - さらなるノイズ軽減
 - ノイズ軽減された測定系で光応答評価を行う
- ・ STJ静電容量測定
100μm角の素子で0.35 ± 0.1nF
今後
 - 高精度で静電容量の測定
 - 同サイズ複数素子の測定からばらつきをみる