CMBカメラ開発における アルミ超伝導トンネル接合素子（STJ）の 基礎特性評価

岡山大，高エ研[A]，理研[B]
美馬覚〇，石野宏和，樹林敦子，羽澄昌史[A]，住澤一高[A]，
樋口岳雄[A]，吉田光宏[A]，田島治[A]，佐藤伸明[A]，佐藤広海[B]，
他 KEK測定器開発室：超伝導ミリ波カメラ開発グループ

アウトライン

1. 研究背景
2. アンテナ接合Al-STJの設計・試作
3. 特性評価
4. まとめと今後

1. 研究背景

- WMAP衛星による宇宙背景マイクロ波（CMB）観測（2000年～）

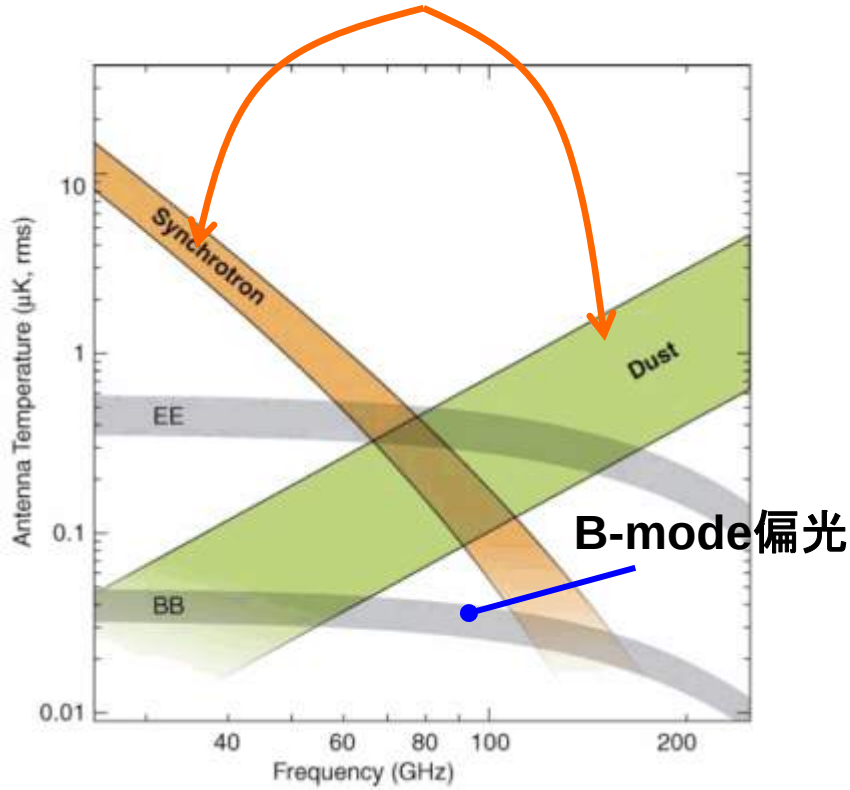
⇩

- CMB偏光の精密測定
  - インフレーション時の重力波が**B-mode偏光**として観測される

- 検出器への要求
  - 30～300GHzをカバー（右図）
  - 超高感度：NEP<10^{-18}W/√Hz
  - 1000個以上のアレイ

上記を満たす検出器は現在なく超伝導検出器のAl-STJは良い開発候補

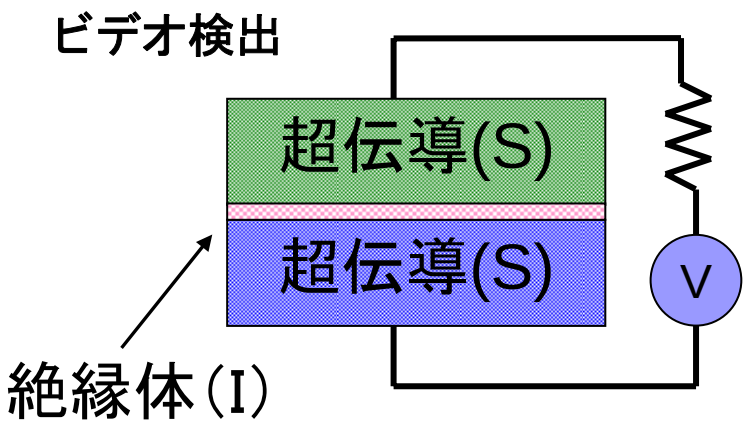
前景放射(foreground)

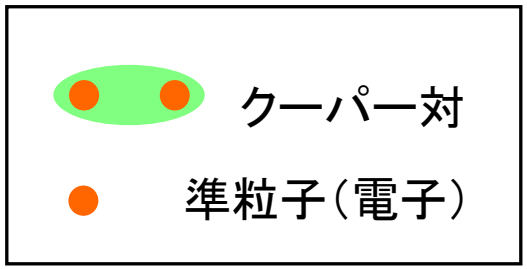


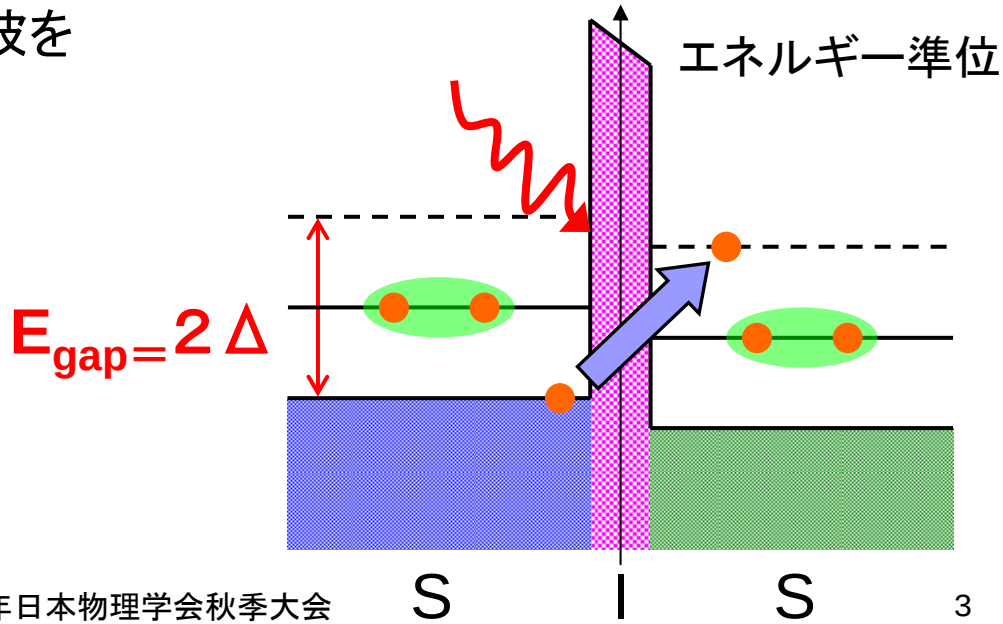
銀河の前景放射とB-mode偏光

STJ（Superconducting Tunnel Junction）

- ２枚の超伝導体で絶縁体をサンドイッチしたジョセフソン素子の一種
- 超伝導ギャップ（Egap=2Δ）と転移温度Tcの関係
  - **2Δ（0K）=3.528kTc**
- エネルギーがΔ以上の電磁波を検出可能



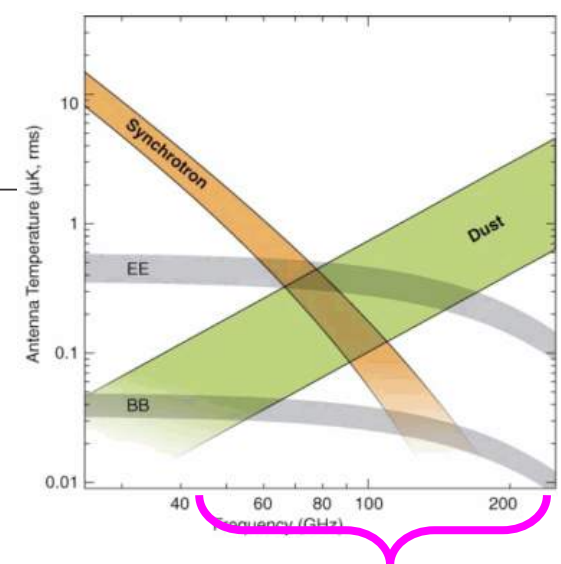




超伝導体の選択

2Δ（0K）＝3.528kTc

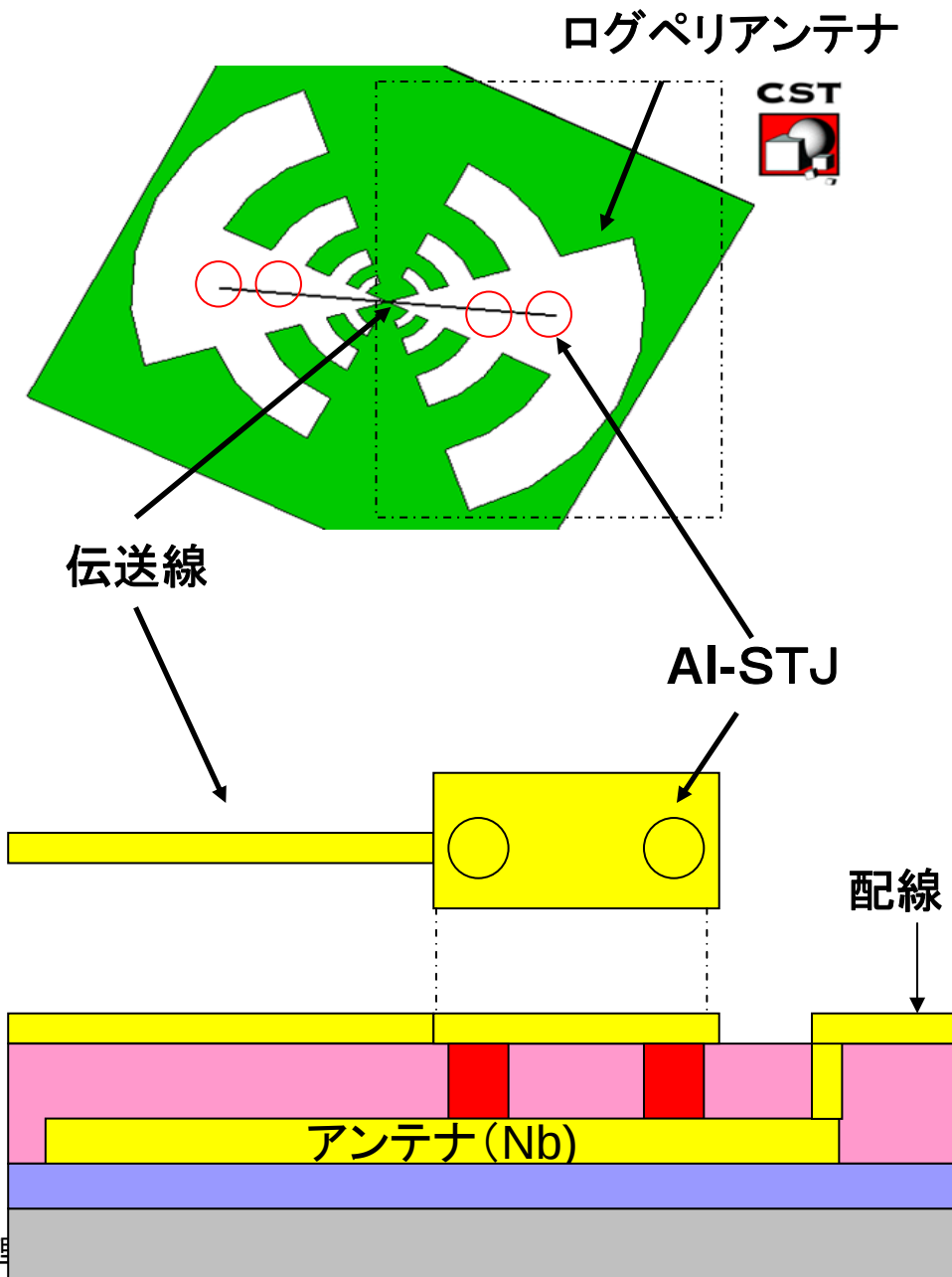
超伝導体	臨界温度 (T_C) [K]	ギャップエネルギー (2Δ) [meV]	フォトン検出閾値 [GHz]	ビデオ検出帯域 [GHz]
Nb	9.23	3.1	750	375-750
Pb	7.193	2.4	580	290-580
Ta	4.39	1.4	340	170-340
In	3.4035	1.1	270	135-270
Al	1.196	0.34	80	40-80
Ga	1.091	0.31	75	37-75
Mo	0.92	0.26	60	30-60
Zn	0.852	0.22	50	25-50
Cd	0.56	0.15	36	
Ti	0.39	0.10	24	
Hf	0.165	0.04	10	



Alのフォトン検出とビデオ検出で、30-300GHzのミリ波帯のほぼ全域をカバー

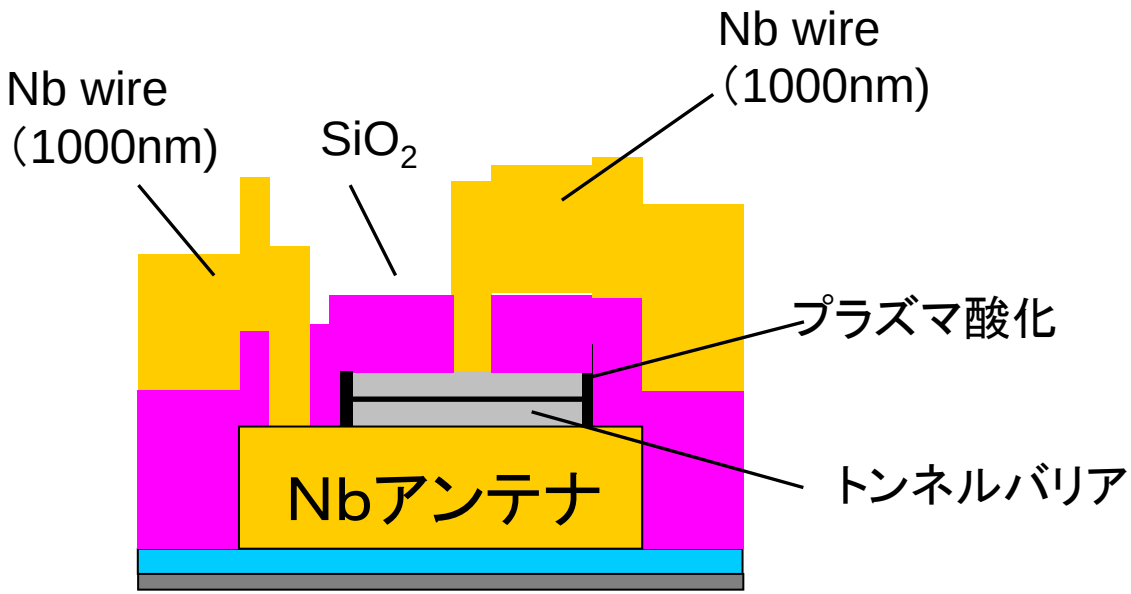
2. アンテナ接合Al-STJの設計・試作

- デザイン
  - 650GHzに感度のあるアレイ光検出器として実績のある理研のアンテナ接続Nb-STJのデザインをAl用に調整
  - ログペリアンテナ
  - Parallel connected twin junctions（STJを二つ以上並べて共振回路を作る）
- アンテナ接合Al-STJは150GHzに設計



試作

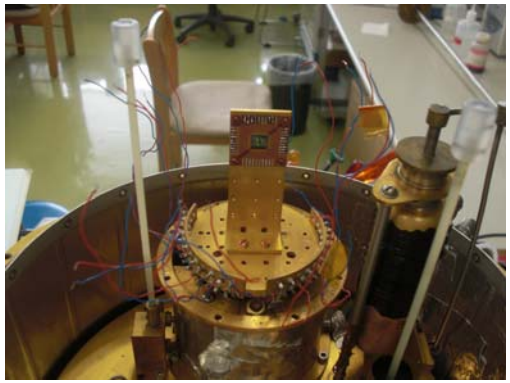
- フォトリソグラフィで製作
- 構成
  - 基盤:シリコン
  - アンテナ・伝送線:Nb
  - STJ:Al/AlOx/Al
    - 酸化量:20Torr x 30’
  - 層間絶縁膜:SiO2
  - 側面はプラズマ酸化

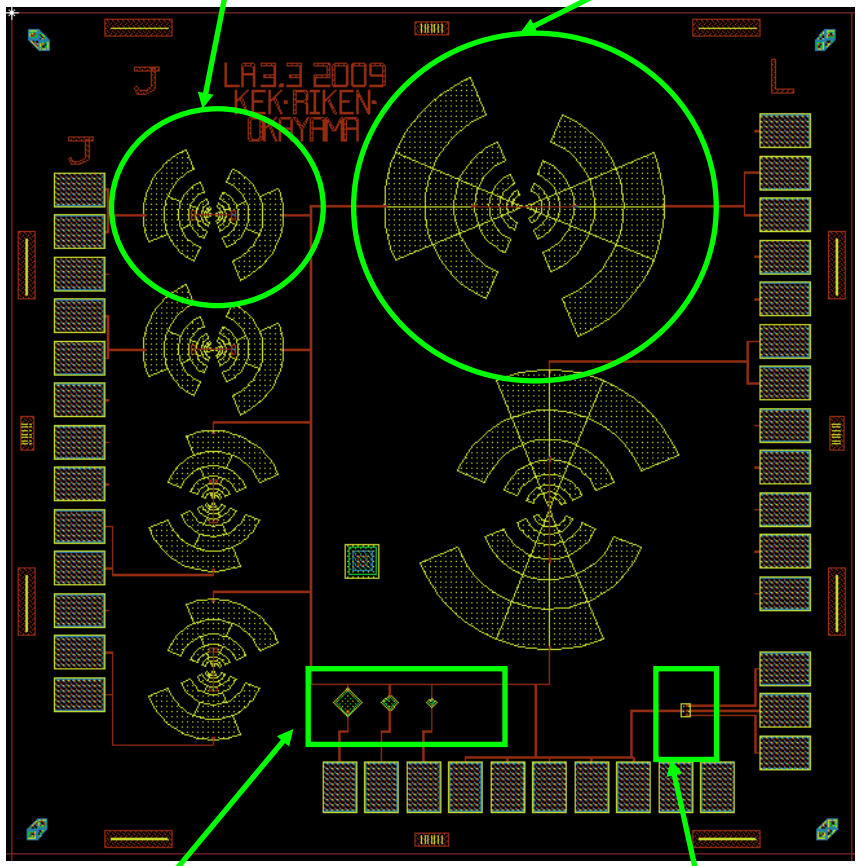


KEKプロセス装置

3. 特性評価

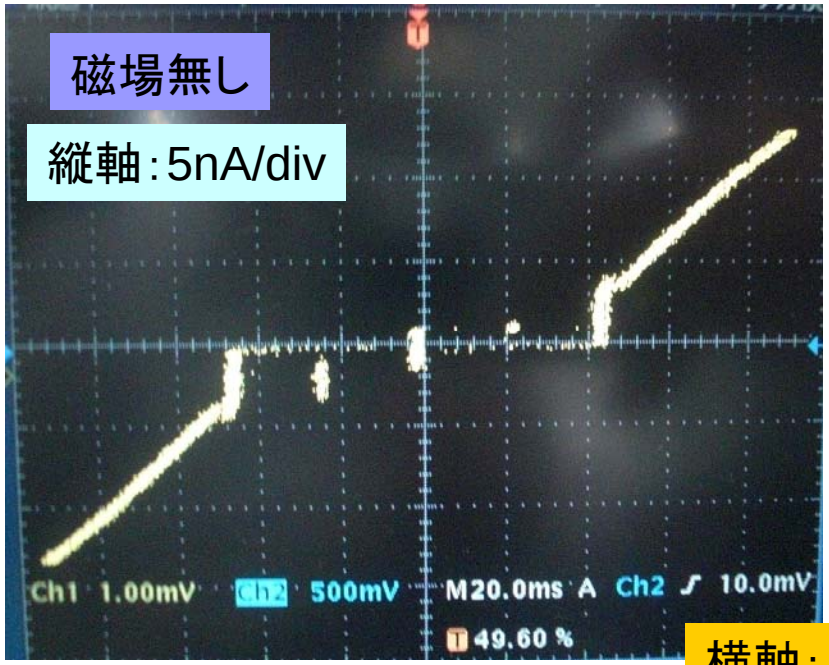
- 仙台理研で測定
  - IV特性
  - 液体窒素を使った感度
  - フーリエ分光器を使った周波数特性

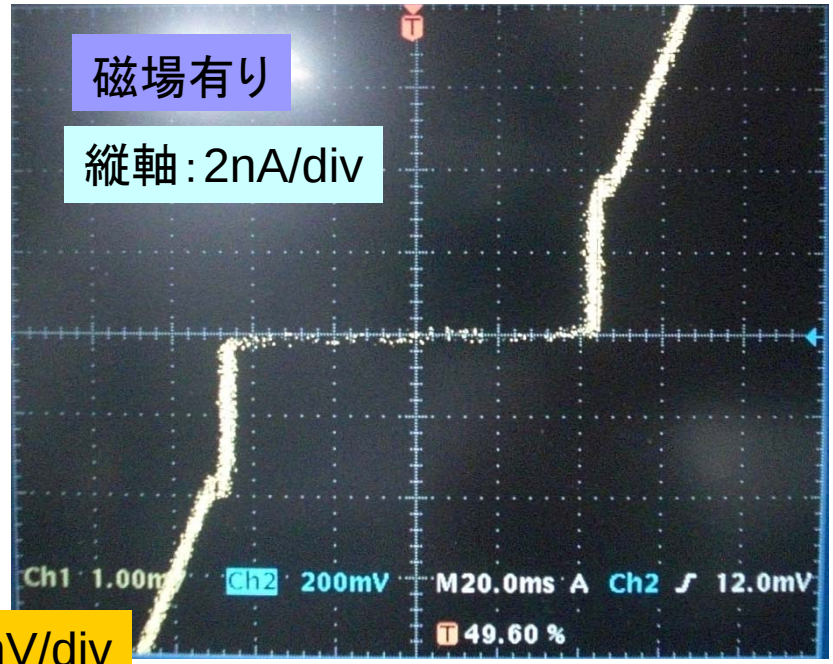




IV測定

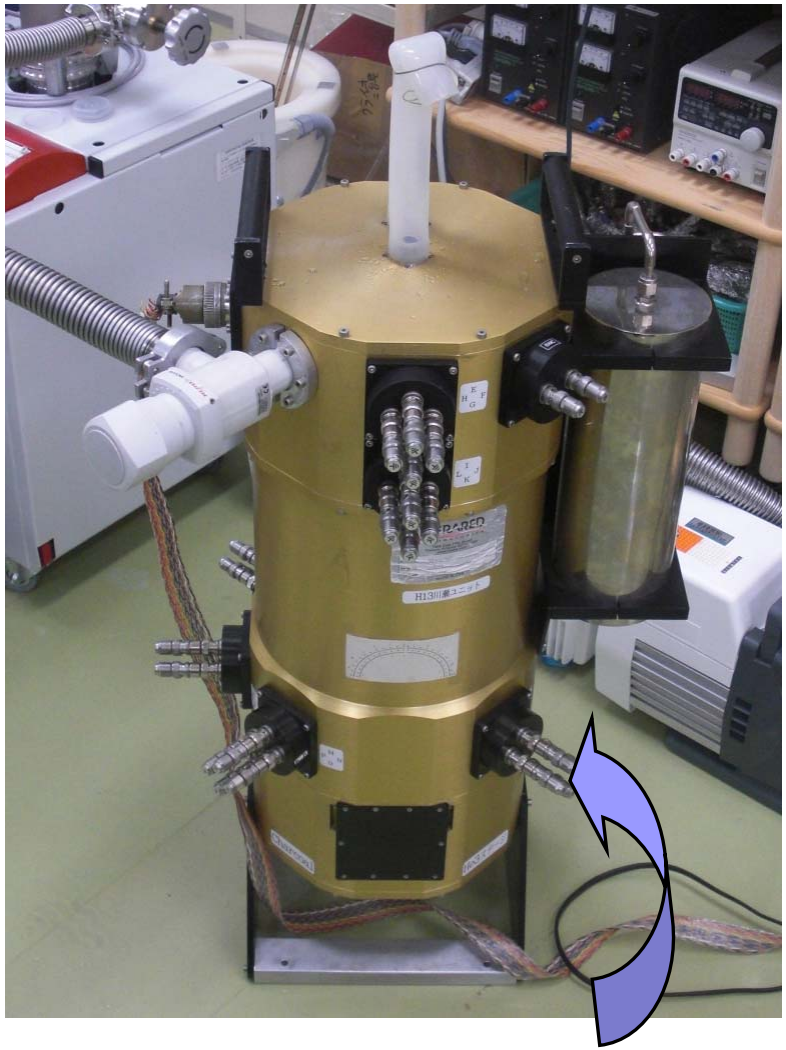
- 測定温度:0.5K
- アンテナ接合150GHz
  - ギャップ(2Δ)　:1.15mv x 2





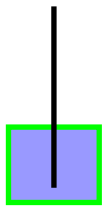
横軸:1mV/div

液体窒素を使った感度チェック

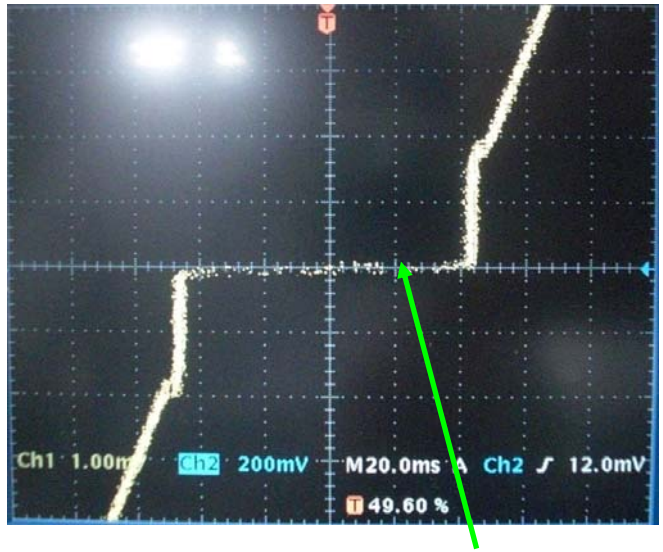


窓のある位置

- STJは冷凍機窓から室温の黒体放射を受けている
- 液体窒素に浸した黒体を窓の前置くと、77Kの黒体をうけるので、電流値は低下する



77K



STJに印加するバイアスを固定

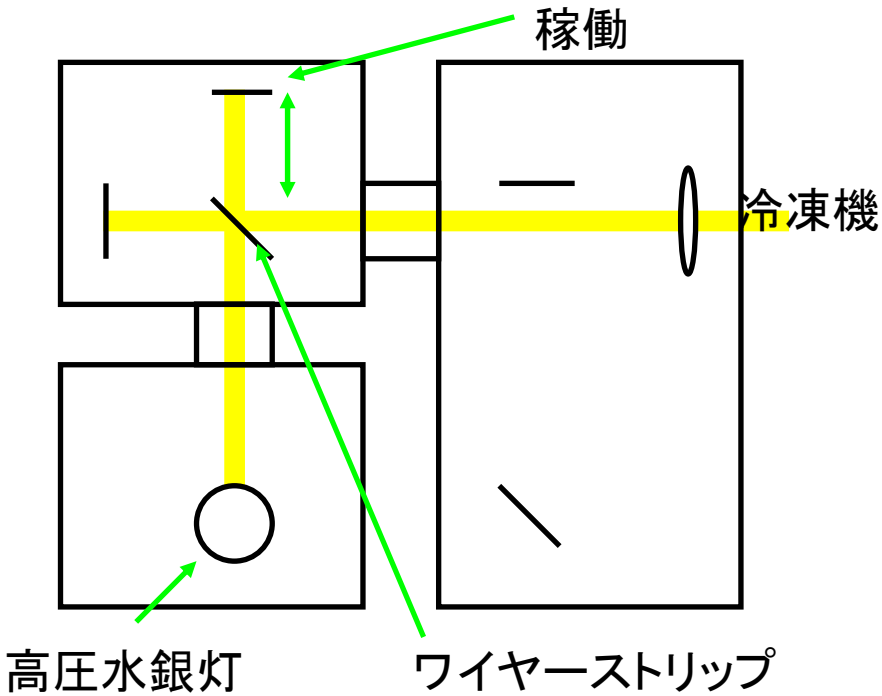
電磁波に対する感度

室温

液体窒素

フーリエ分光計

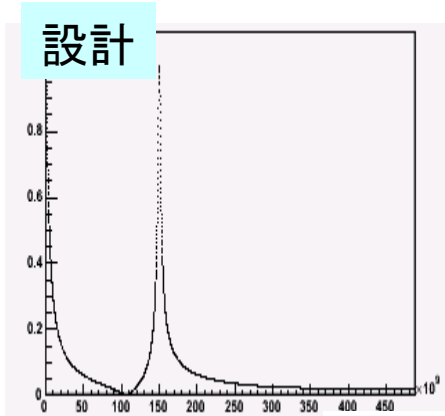
- ワイヤーストリップでスプリットした光の一方を反射するレンズの位置を移動し、強め合う周波数を制御する
  - 100GHz~3THzまで測定可能
  - 最大分解能：8GHz



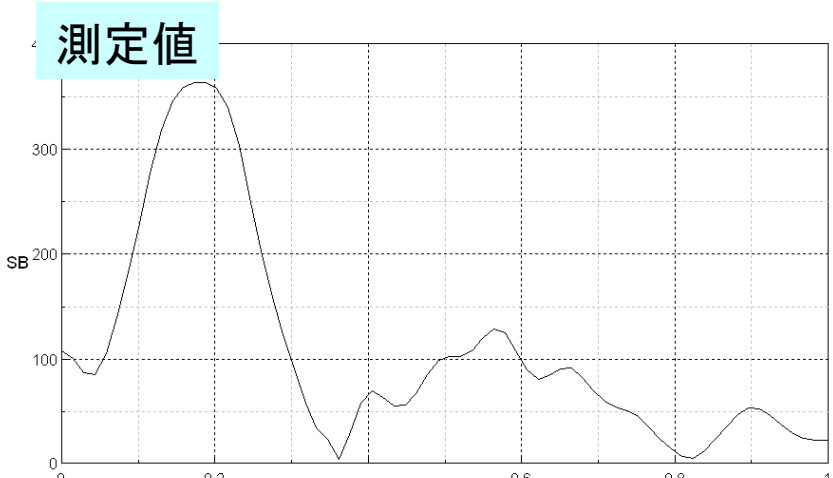
周波数特性

- ミリ波に対する感度有り
  - 冷凍機窓をフーリエ分光器から45度傾けて配置
    - 150GHz用：変化有り
    - X線用ダイヤ型：変化無し
  - ゲインが小さく、測定値もデザインにピッタリあってはいない

アンテナ接合Al-STJでミリ波を検出
STJの酸化量を変化させ、最適な酸化膜の厚さを探す



0 500 GHz



0 500 1000 GHz

4. まとめと今後

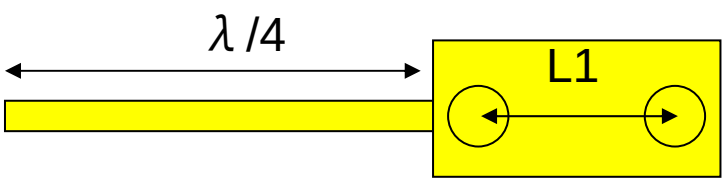
- まとめ
  - 目的：STJを使ったミリ波(30~300GHz)測定器の開発
  - アンテナ接合Al-STJを試作
    → Al-STJのI-V特性を確認。良いSIS構造のAl-STJが出来ている。Al-STJの試作環境は整った
  - **アンテナ結合アルミSTJではじめてミリ波を検出した**

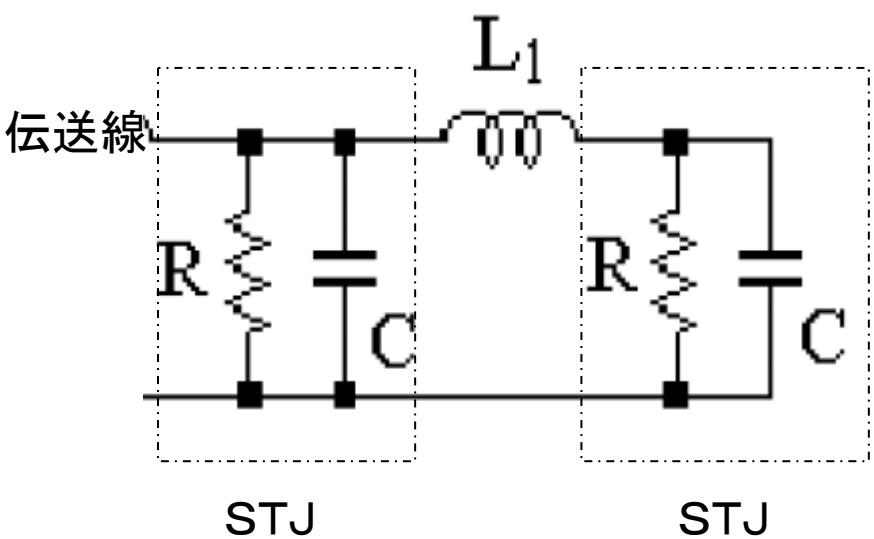
- 今後
  - 酸化条件を調整し、デザイン通りの感度のある素子を作製する
  - マルチアレイ化のために周波ドメインでの読み出し開発を開始する

バックアップスライド

STJと伝送線の共振回路

$$Z_{stj}=(1/R^2+(\omega C)^2)^{1/2}$$



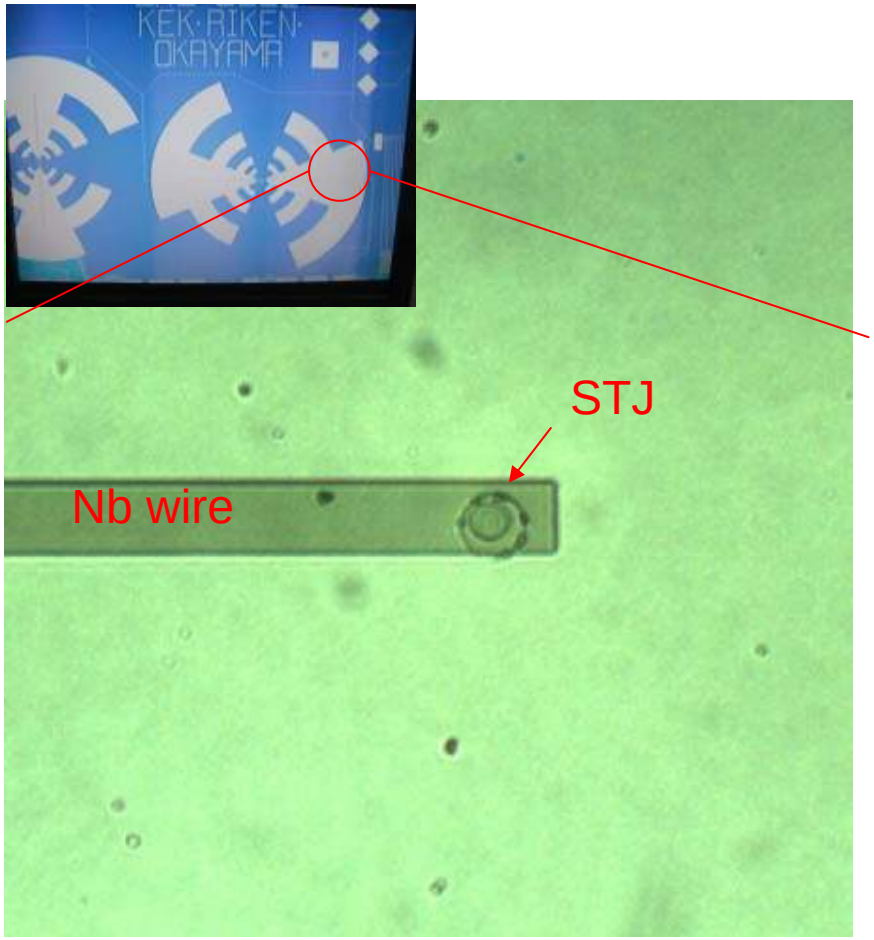


$$Z_{strip}=\sqrt{\frac{L}{C}}$$

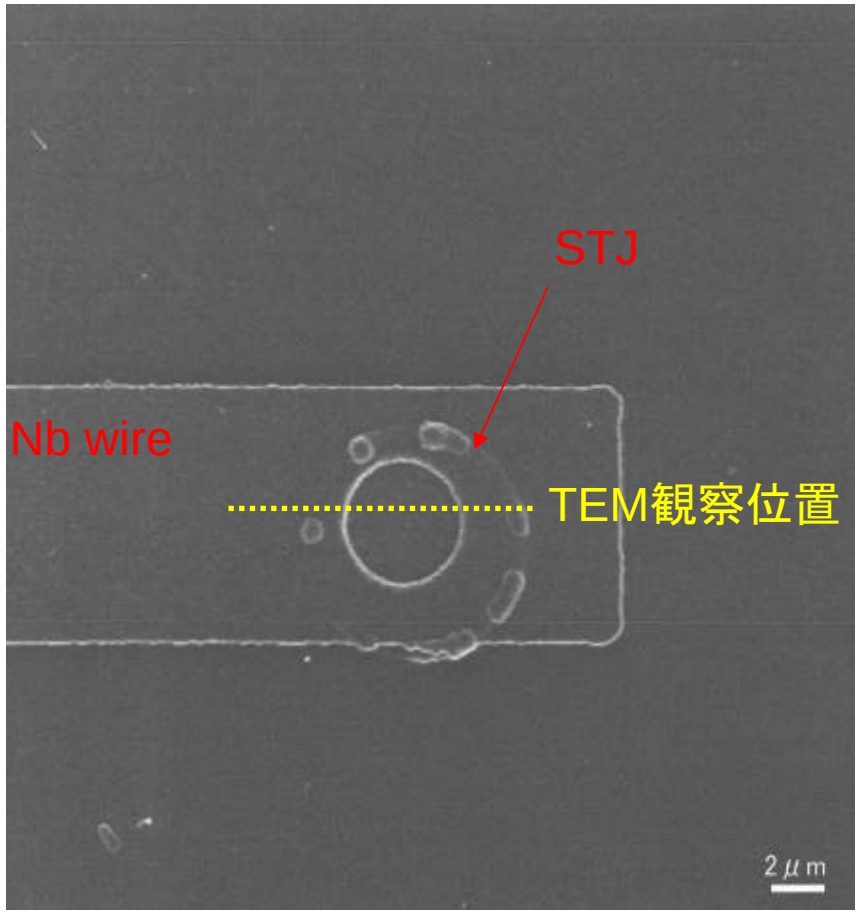
$$C=\varepsilon_r\varepsilon_0\frac{W}{h}K \qquad L=\mu_0\frac{d}{WK}$$

$$d=h+\lambda\coth\left(\frac{t_1}{\lambda}\right)+\lambda\coth\left(\frac{t_2}{\lambda}\right)$$

TEMによるAl-STJの断層写真1

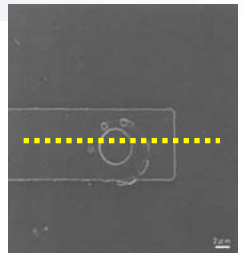


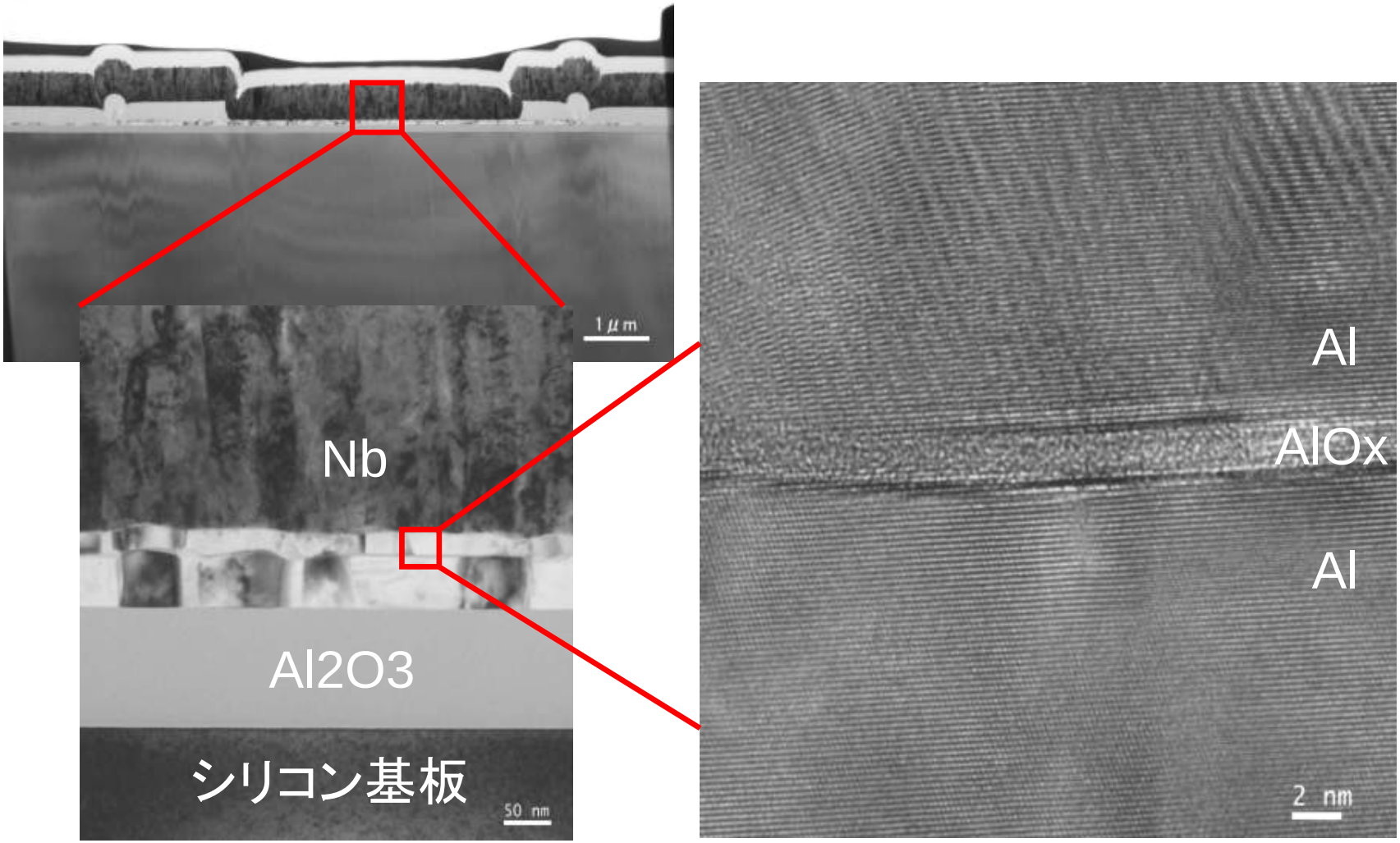
光学顕微鏡像



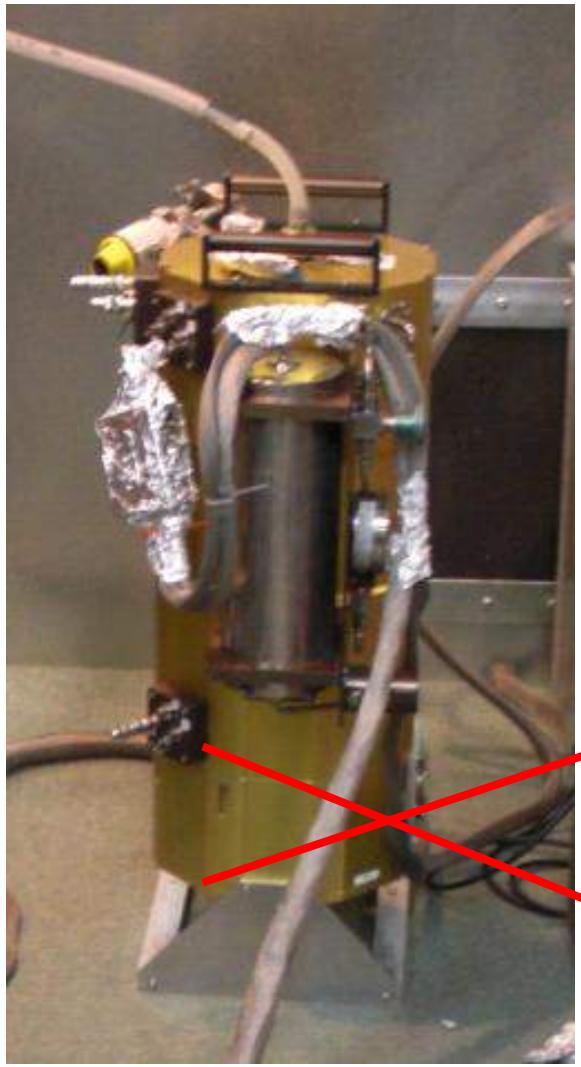
FIB-SIM像

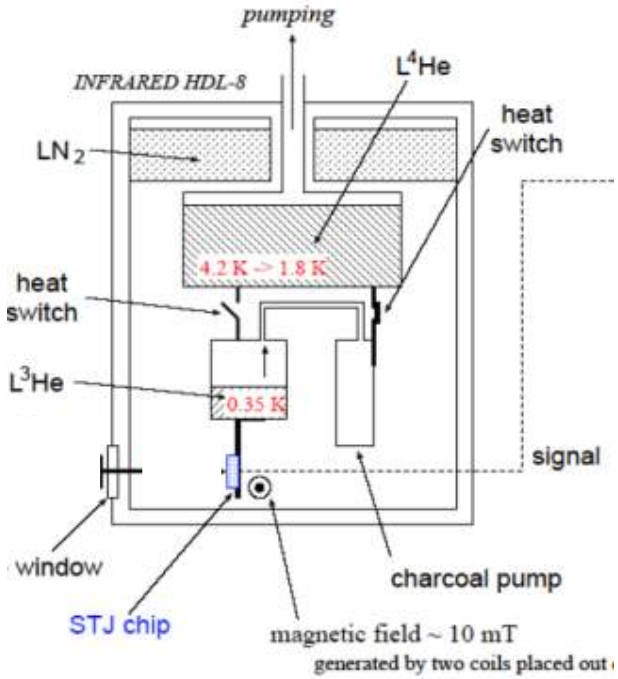
TEMによるAl-STJの断層写真2

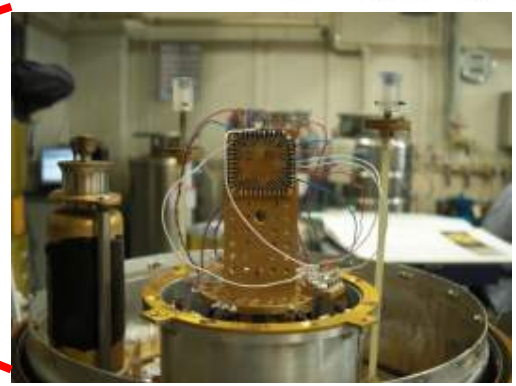




理化学研究所　0.3Kチャコール冷凍機







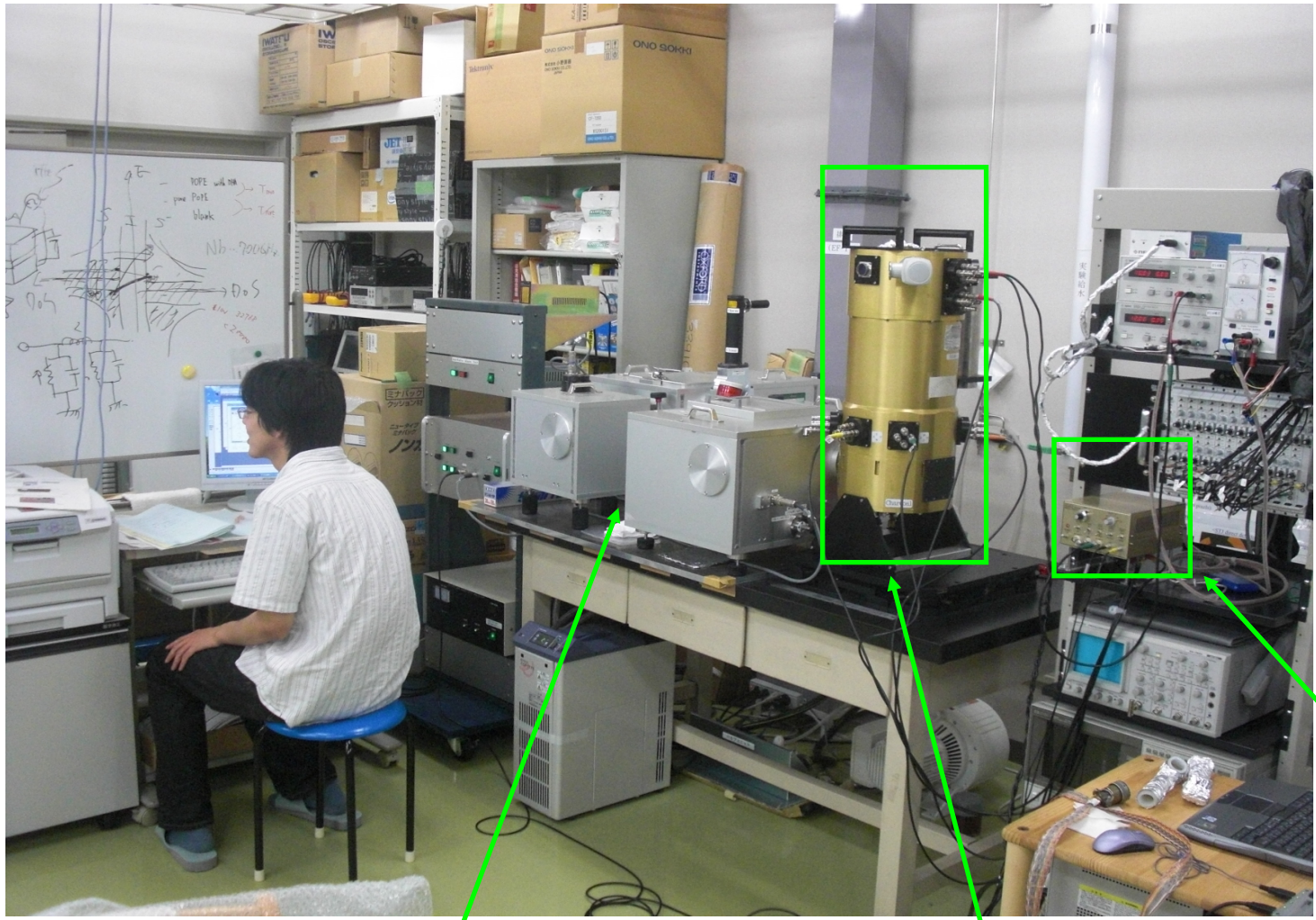
光に対する感度（アニメーション）

室温

液体窒素

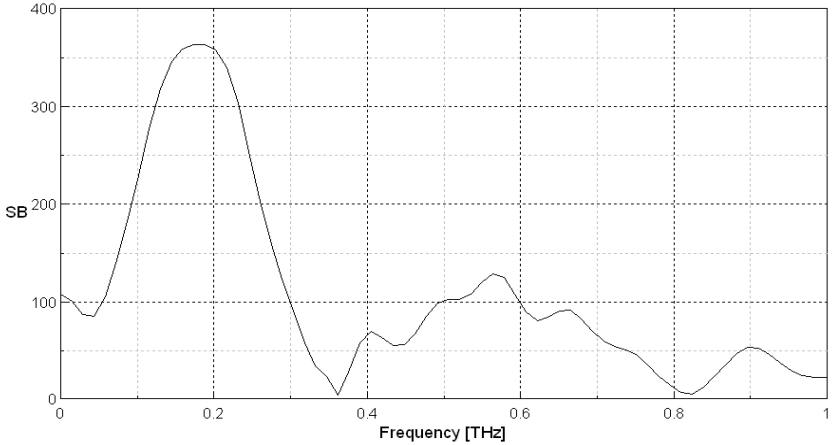
0.5pA程の変化が見られる

フーリエ分光計

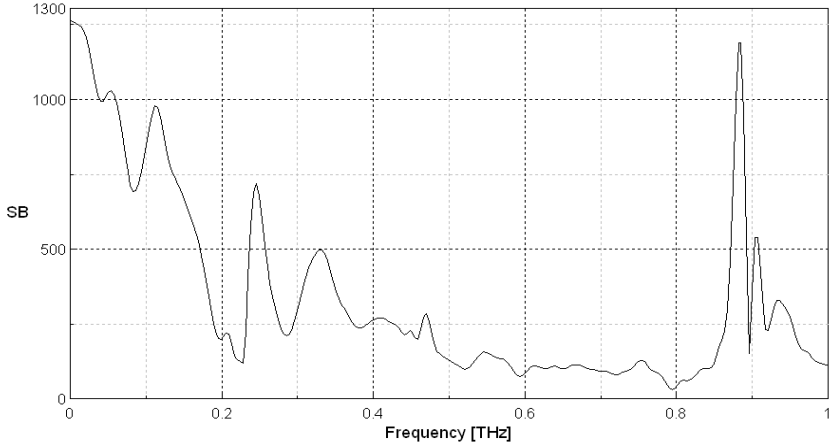


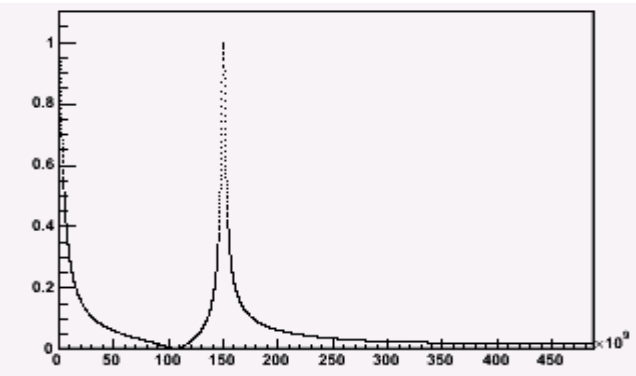
フーリエ分光計の結果

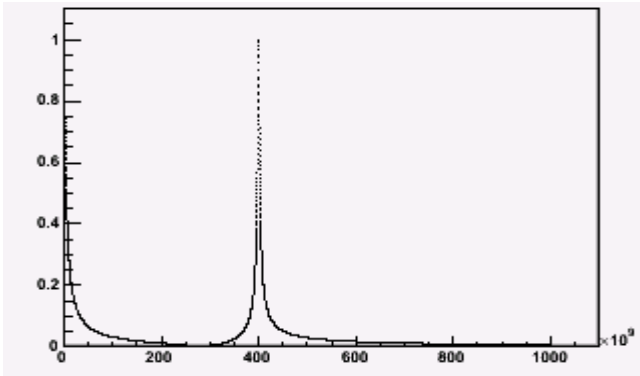
150GHz



400GHz

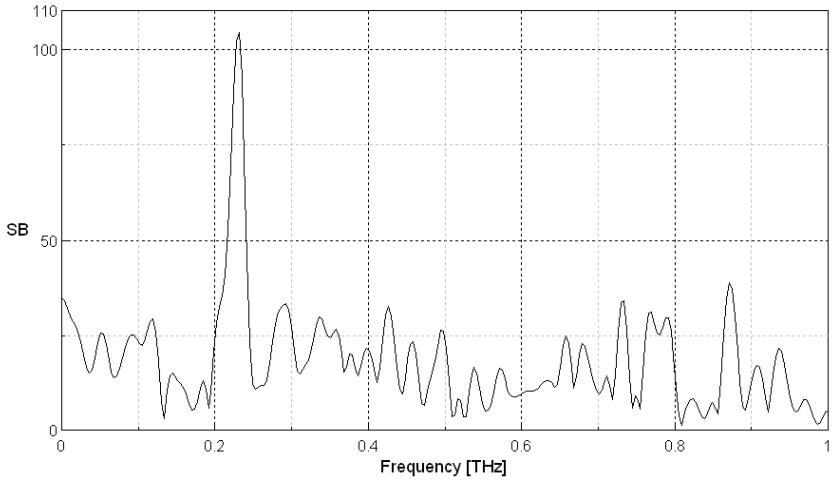




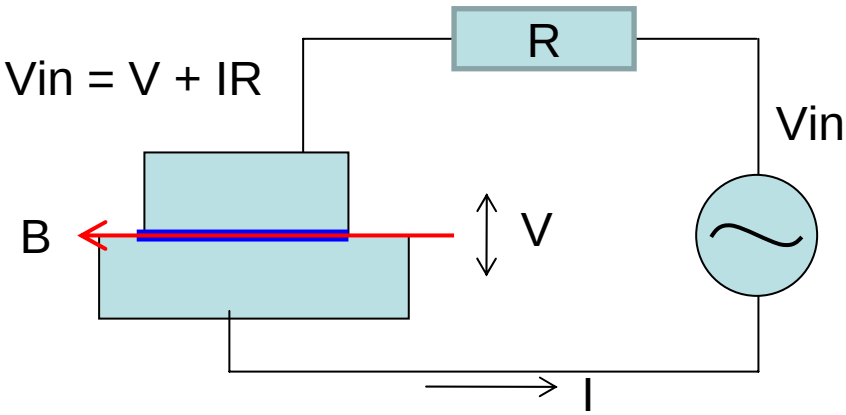


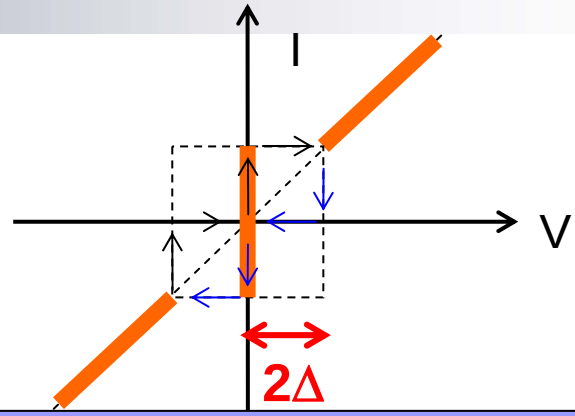
フーリエ分光計ダイヤ型のSTJ

- 左図：縦軸が最大100ほど
  - 典型的なノイズだとコメントをもらった。
- 150GHzのアンテナを冷凍機の窓とフーリエ分光計の窓を明明後日に向けたら、ノイズだけに見えたので、何かは見えている。（図無し）

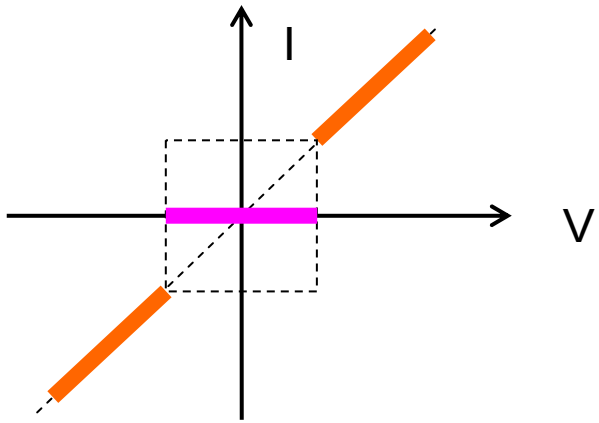


Al-STJのI-V測定

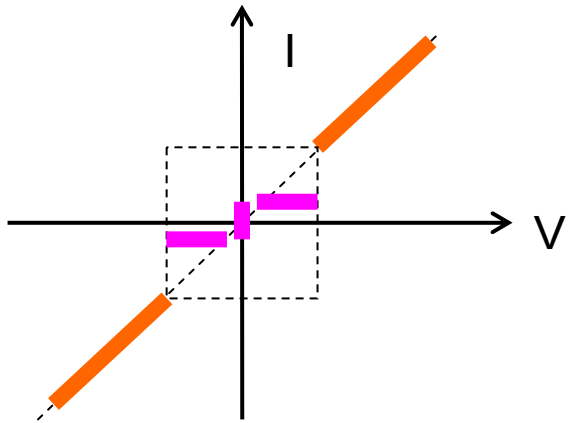




磁場無
トンネルバリアをクーパー対が抜けられる(ジョセフソン効果)



磁場有（理想的）
トンネルバリアに磁力線が入り込むためクーパー対が通れない

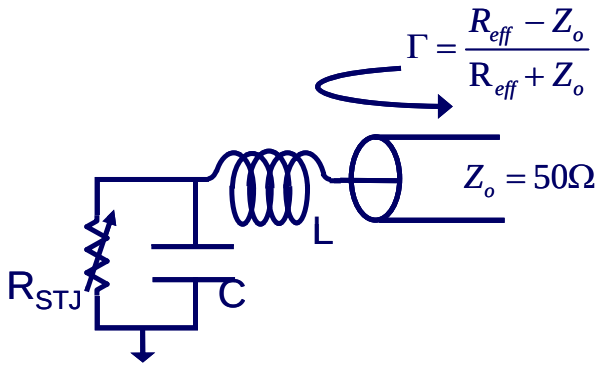


磁場有（実際）
実際はリークカレントがある
トンネルバリアが不完全

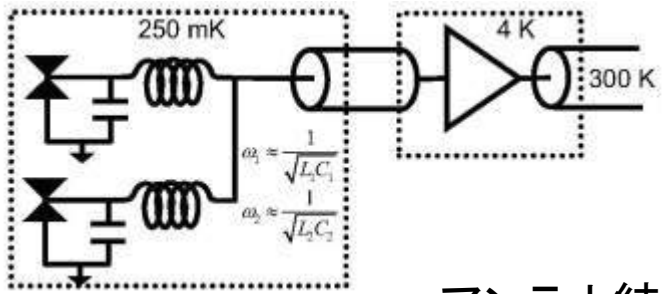
マルチアレイ化：周波数ドメイン読み出し

- Yale大学がRF-STJによる周波数ドメイン読み出しを提唱
  （IEE Trans. Appl. Superconductivity Vo.17 p.241 (2007)）
  - 周波数ドメインの多重化

→ STJ多チャンネル化へのブレークスルーとなる可能性あり。



$$R_{eff} = L / R_{STJ} C \qquad \omega_o = 1 / \sqrt{LC}$$



アンテナ結合STJ