

# アルミ超伝導トンネル接合素子(AI-STJ)を用いたCMB偏光カメラの開発

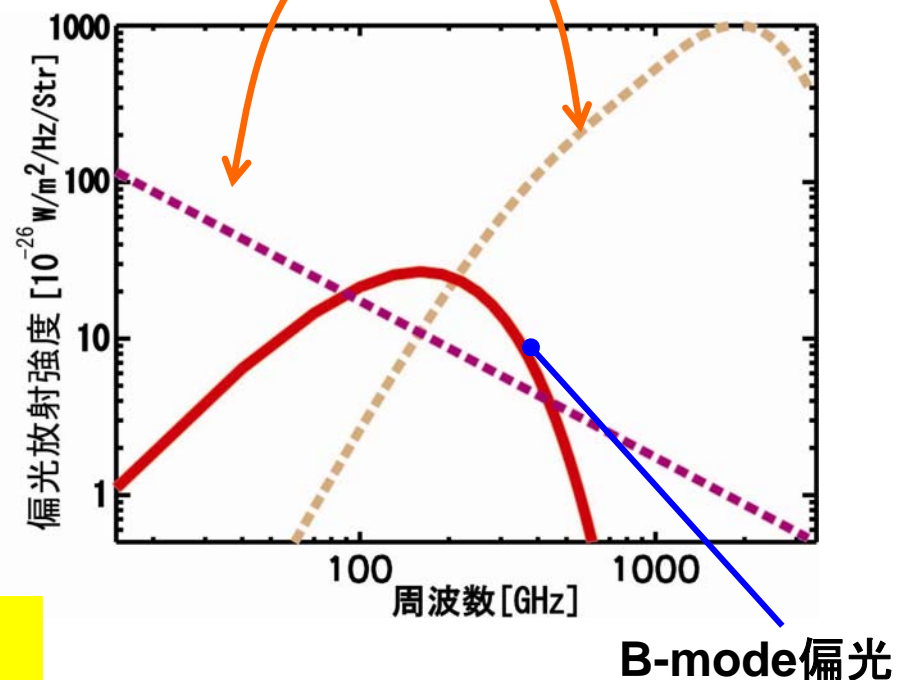
美馬覚<sup>○</sup>, 石野宏和, 樹林敦子, 服部香里, 羽澄昌史<sup>A</sup>, 住澤一高<sup>A</sup>, 樋口岳雄<sup>A</sup>,  
吉田光宏<sup>A</sup>, 田島治<sup>A</sup>, 佐藤伸明<sup>A</sup>, 佐藤広海<sup>B</sup>, 大谷知行<sup>B</sup>, 有吉誠一郎<sup>B</sup>, 渡辺広記<sup>C</sup>,  
木村誠宏<sup>A</sup>, 岡村崇弘<sup>A</sup>, 都丸隆行<sup>A</sup>, 鈴木敏一<sup>A</sup>, 高田卓<sup>d</sup>

岡山大, 高工研<sup>A</sup>, 理研<sup>B</sup>, 総研大<sup>C</sup>, 筑波大<sup>d</sup>

# 研究背景

- CMB偏光の精密測定
  - インフレーション由来の重力波が作るCMB(宇宙背景放射)Bモードの観測
- CMB偏光観測衛星LiteBIRDからの検出器への要求
  - 60~250GHzをカバー(右図)
  - 超高感度:NEP~ $10^{-18}$ W/ $\sqrt{\text{Hz}}$
  - 1000個以上のアレイ

## 前景放射(foreground)



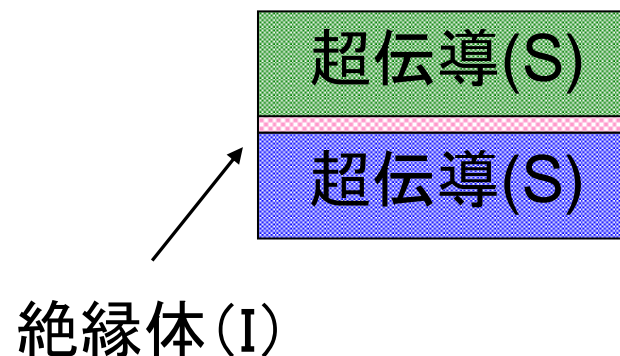
上記を満たす検出器は現在なく  
超伝導検出器のAI-STJは一つの候補

銀河の前景放射とB-mode偏光

# STJ (Superconducting Tunnel Junction)

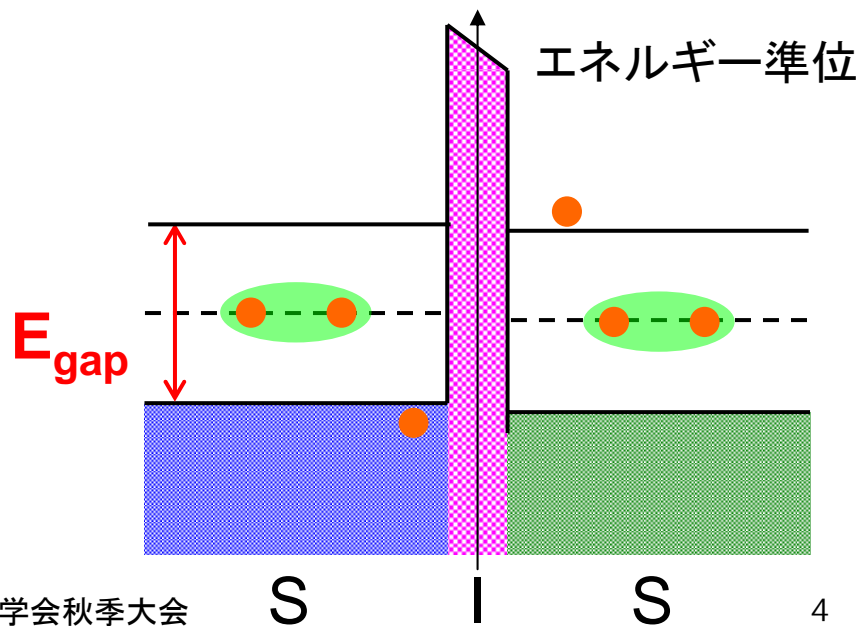
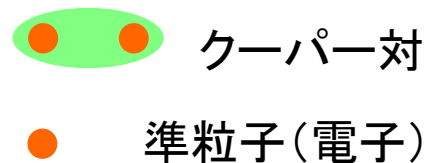
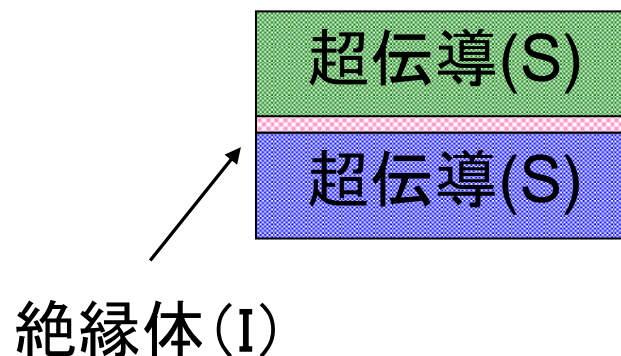
- 2枚の超伝導体で絶縁体をサンドイッチしたジョセフソン素子の一種
- クーパー対の結合エネルギー ( $E_{\text{gap}}=2\Delta$ ) と転移温度  $T_c$  の関係

$$E_{\text{gap}}(0\text{K})=3.528kT_c$$



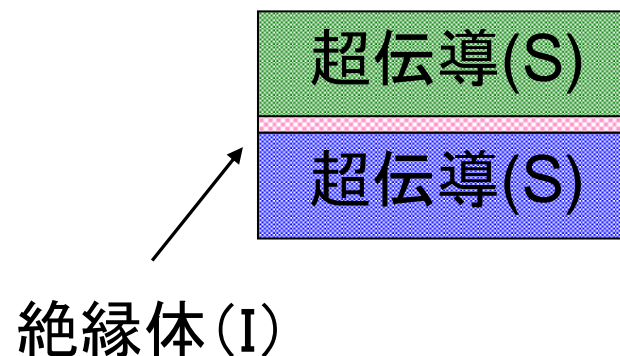
# STJ (Superconducting Tunnel Junction)

- 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
- クーパー対の結合エネルギー ( $E_{\text{gap}}=2\Delta$ ) と転移温度  $T_c$  の関係
  - $E_{\text{gap}}(0\text{K})=3.528kT_c$
  - Al:  $T_c=1.2\text{K}$ ,  $E_{\text{gap}}=0.34\text{meV}$
  - Nb:  $T_c=9.2\text{K}$ ,  $E_{\text{gap}}=3.1\text{meV}$



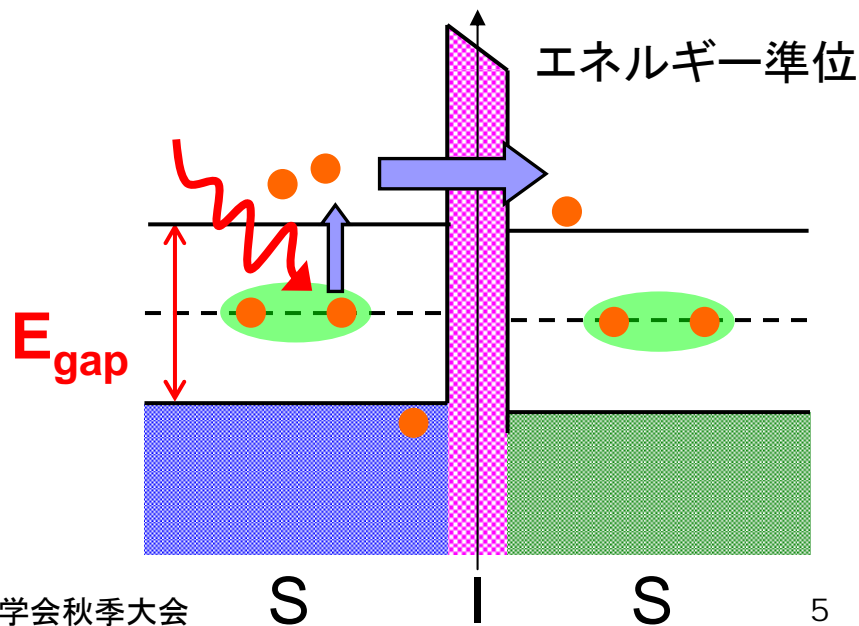
# STJ (Superconducting Tunnel Junction)

- 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
- クーパー対の結合エネルギー ( $E_{\text{gap}}=2\Delta$ ) と転移温度  $T_c$  の関係
  - $E_{\text{gap}}(0\text{K})=3.528kT_c$
  - Al:  $T_c=1.2\text{K}$ ,  $E_{\text{gap}}=0.34\text{meV}$
  - Nb:  $T_c=9.2\text{K}$ ,  $E_{\text{gap}}=3.1\text{meV}$



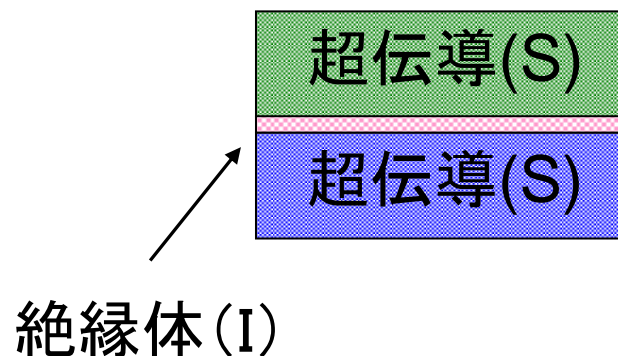
## 電磁波の検出方法

1. クーパー対による超伝導電流は磁場をかけて抑制しておく
2. 電磁波が準粒子(電子)を生成し、トンネルする



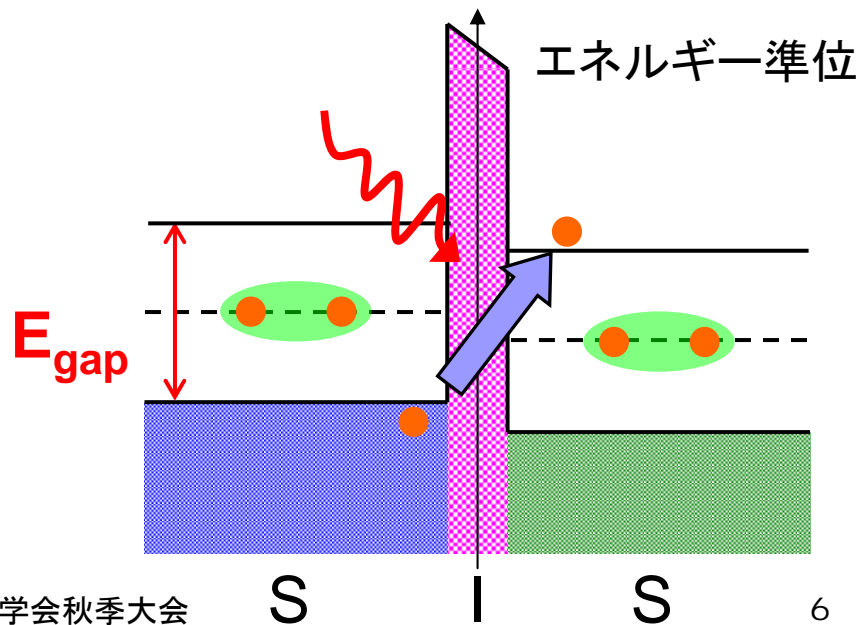
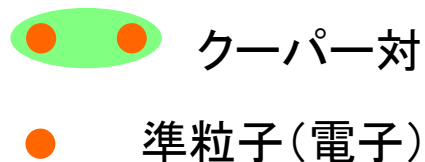
# STJ (Superconducting Tunnel Junction)

- 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
- クーパー対の結合エネルギー ( $E_{\text{gap}}=2\Delta$ ) と転移温度  $T_c$  の関係
  - $E_{\text{gap}}(0\text{K})=3.528kT_c$
  - Al:  $T_c=1.2\text{K}$ ,  $E_{\text{gap}}=0.34\text{meV}$
  - Nb:  $T_c=9.2\text{K}$ ,  $E_{\text{gap}}=3.1\text{meV}$



## 電磁波の検出方法

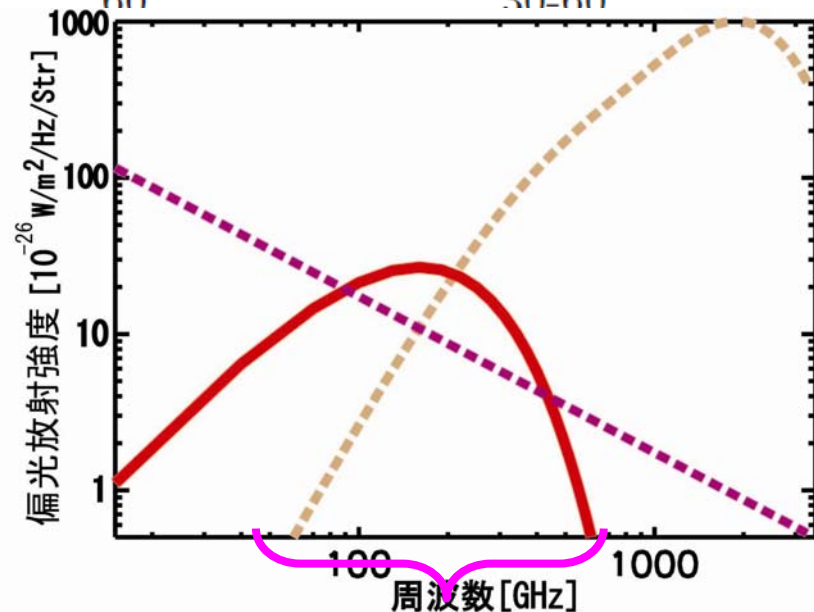
1. クーパー対による超伝導電流は磁場をかけて抑制しておく
2. 電磁波が準粒子(電子)を生成し、トンネルする



# STJ:超伝導体の選択

$$2\Delta(0K) = 3.528kTc$$

超伝導体	臨界温度 ( $T_C$ ) [K]	ギャップエネルギー ( $2\Delta$ ) [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		
Cd	0.56	0.15		
Ti	0.39	0.10		
Hf	0.165	0.04		



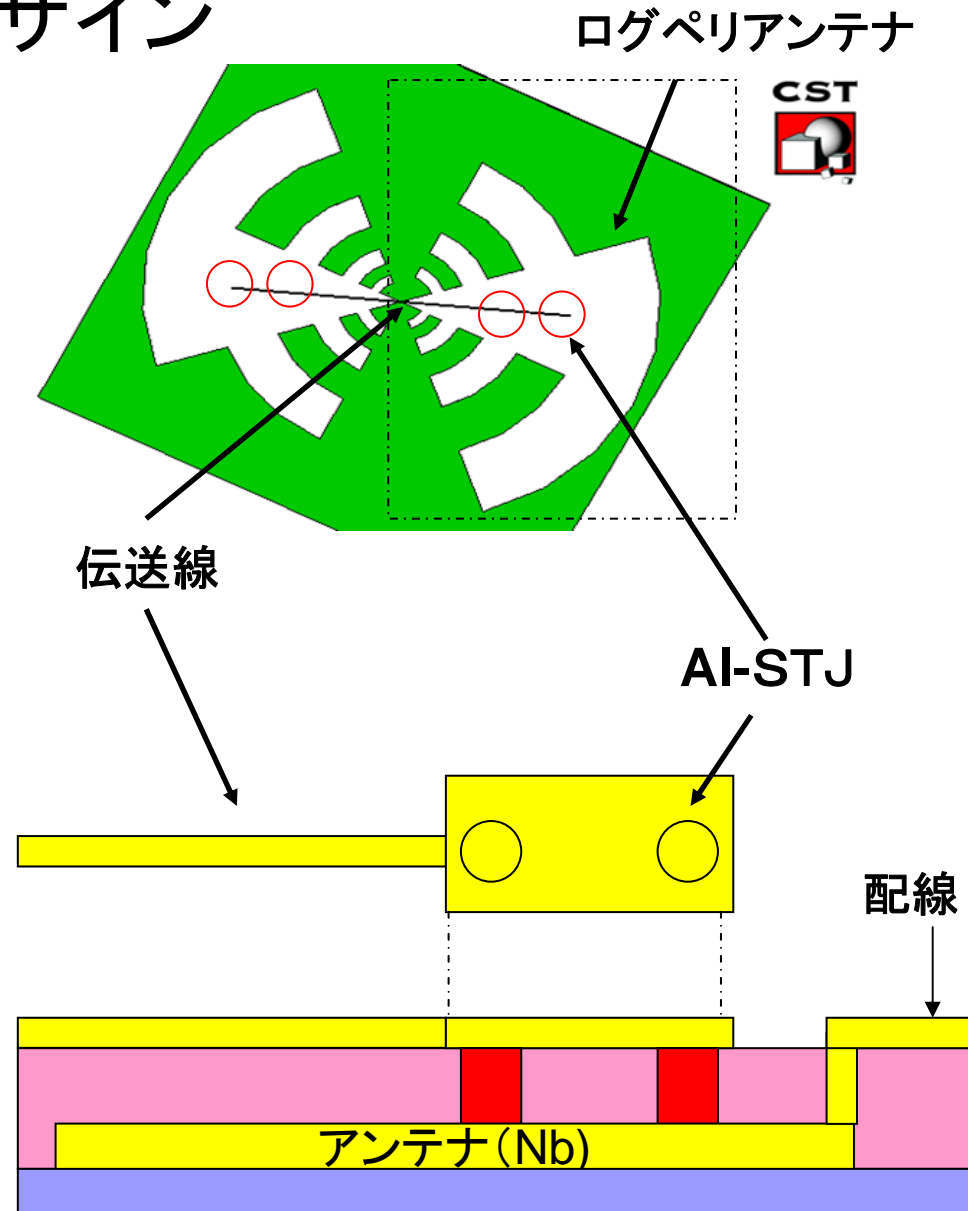
Alを超伝導体に選択すれば  
60-250GHzのほぼ全域をカバー可能

# アンテナ接合AI-STJデザイン

## ■ 検出器の構造

1. ログペリアンテナ
2. マッチング用伝送線
3. STJ共振回路

- STJのCとマイクロストリップラインのLで共振回路を作成し、STJに電磁波を吸収させ電力に変換する





# 課題

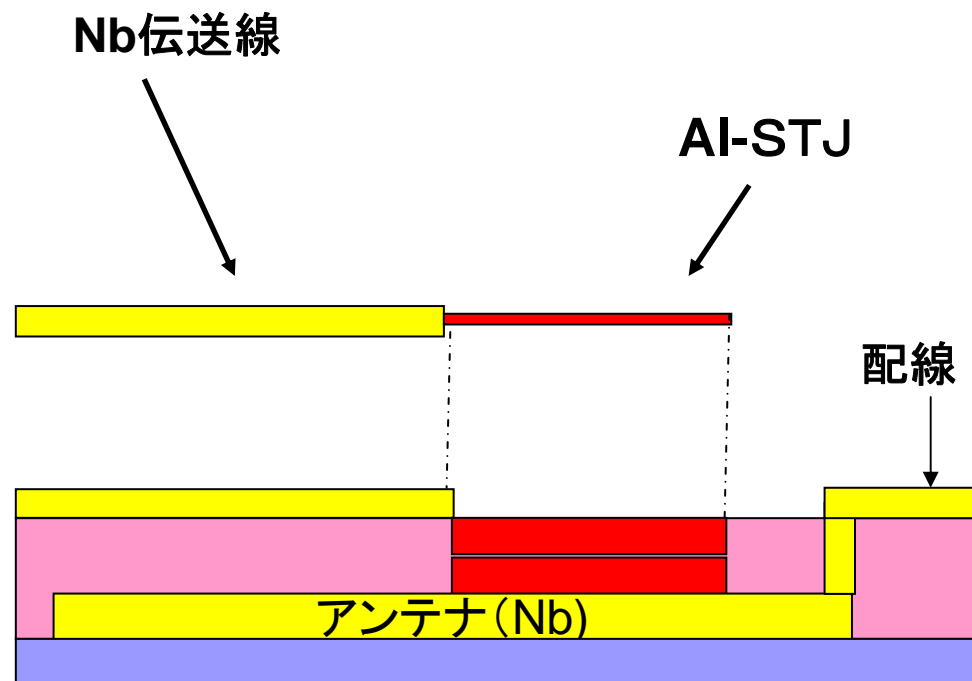
- NEPを下げるため、STJ単体でのリークカレントを低減する
- 検出器デザイン上の課題
  1. 検出器の共振周波数がSTJのCに強く依存している
  2. 現状のSTJとLを組み合わせたデザインでは、STJのリークカレントと共振周波数が複雑に相関する

# マイクロストリップ型STJ

## ■ 利点

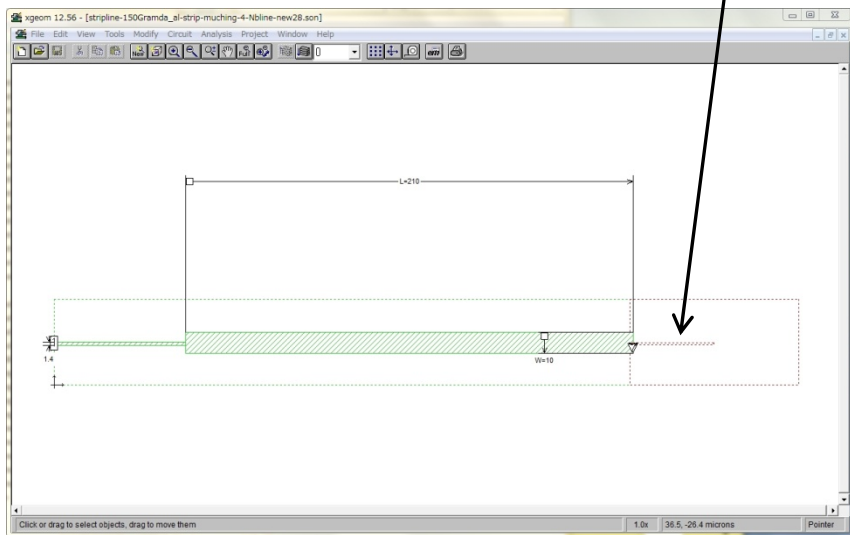
- ミリ波検出部分を  $\lambda/4$  長さのAI-STJにすれば、共振周波数はSTJの長さで済まる

## ■ 断面図

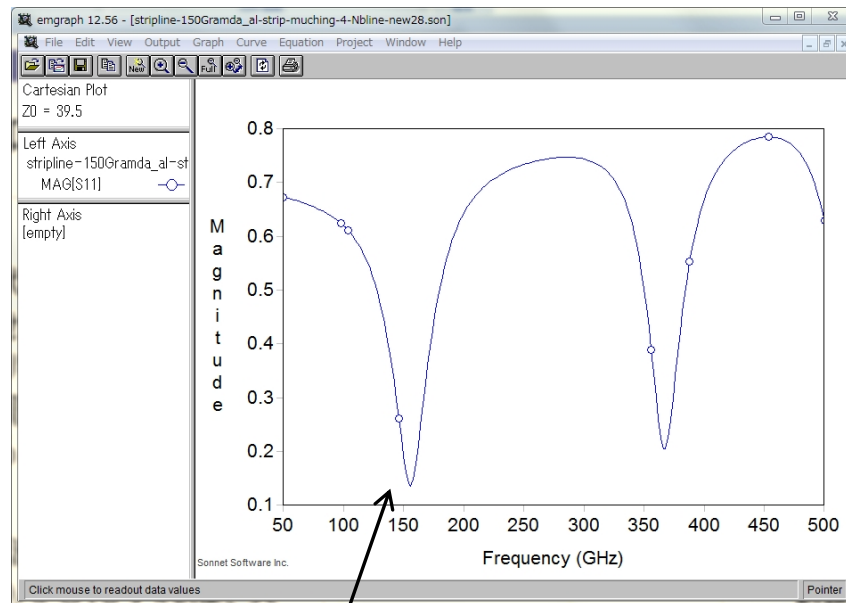


# マイクロストリップ型STJ シミュレーション結果 (150GHz)

STJストリップ



反射率

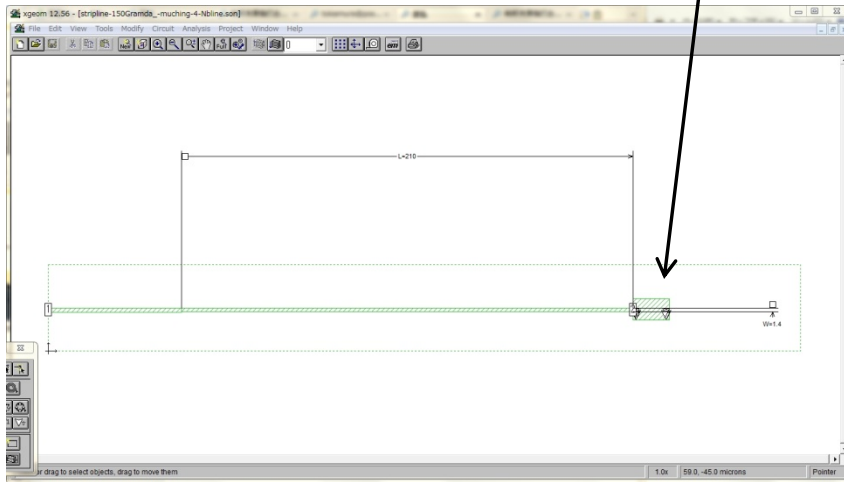


設計周波数

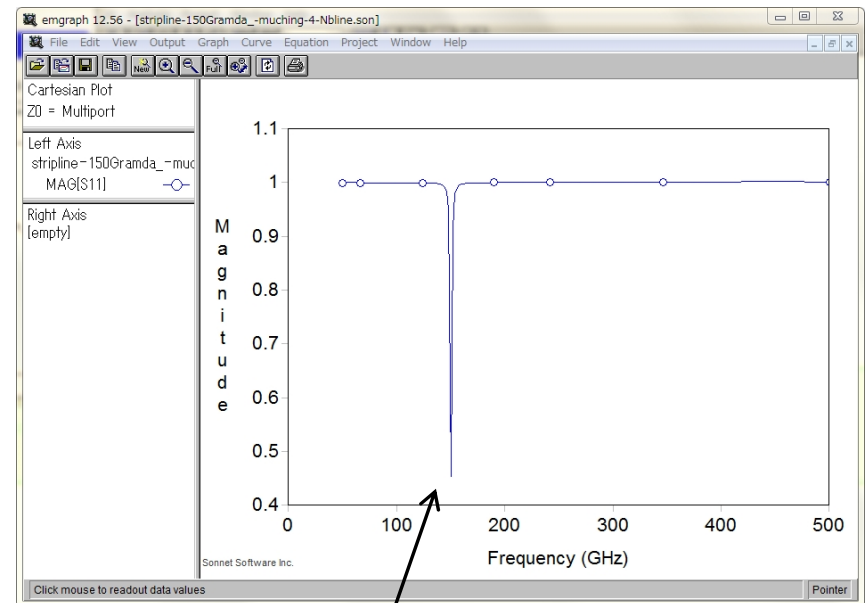
# 従来型STJ シミュレーション結果 (150GHz)



共振部



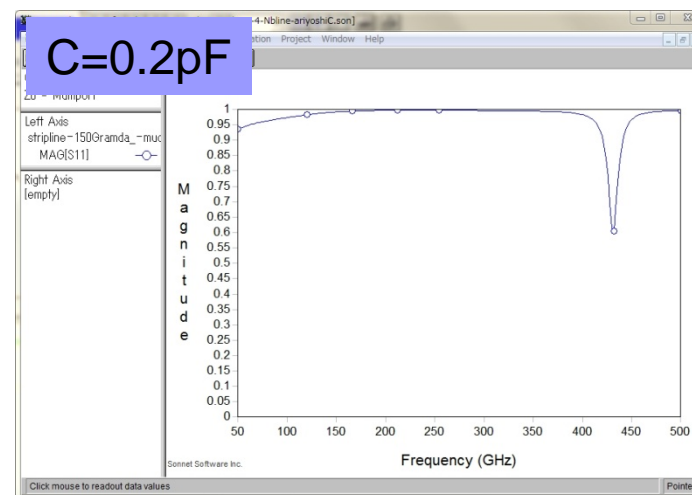
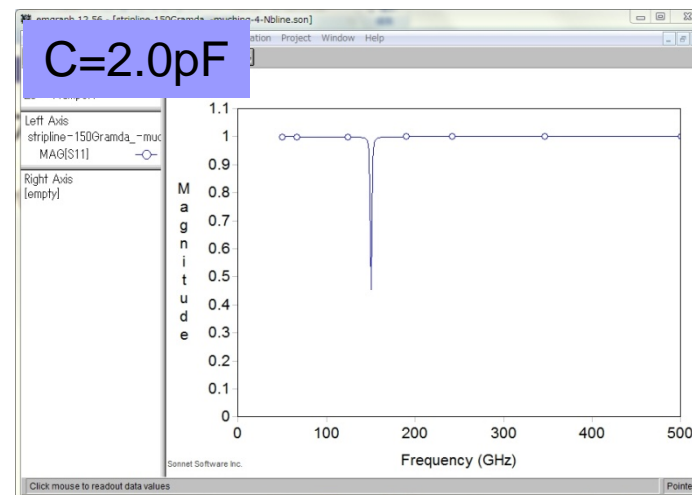
反射率



設計周波数

# 従来型STJ共振回路の問題点

- STJの酸化条件でCが変わってしまい、共振周波数も変わってしまう。



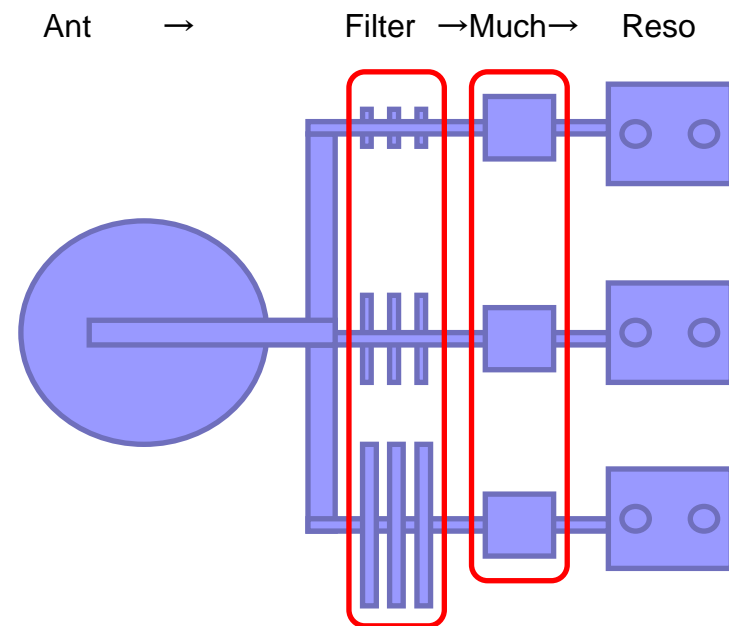
# まとめ・今後

- CMB偏光観測用の高感度超伝導検出器の開発を行っている。
- 新しいストリップ型STJを使った検出器のデザインを考えた。
  - 帯域幅が広くなり、作製時のCの不定性に左右されにくい。
- 今後
  - ストリップ型STJの実機を作製し、検出感度試験を行う
  - フィルターを組み込んだ多色化読み出し
  - 素子読み出しを周波数領域で多重化する

# 補遺

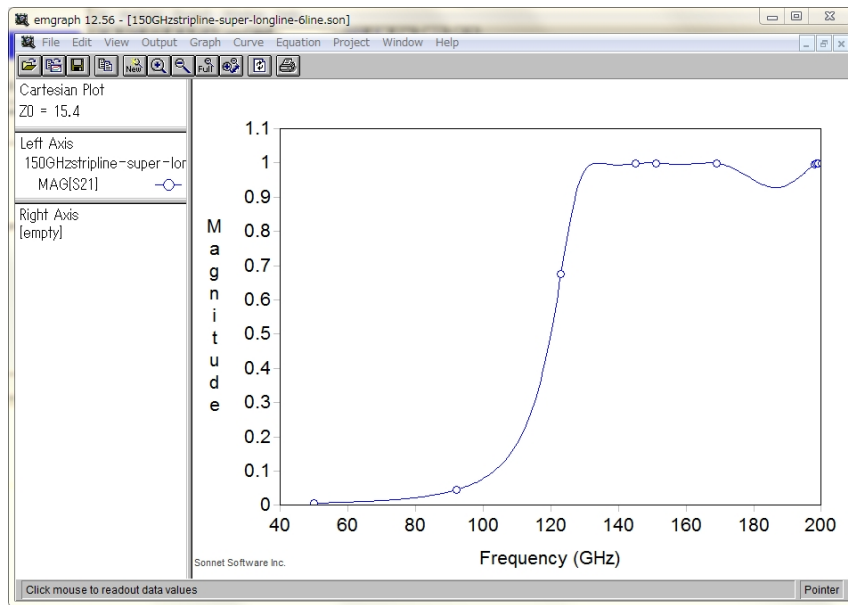
# マイクロストリップフィルタ

- 目的: 検出器の多色化
  - CMB偏光観測用検出器では、レンズのサイズで集積化が制限される。
  - $1/4\lambda$  のマイクロストリップラインでバンドパスフィルタを作り、検出器への信号を分離する

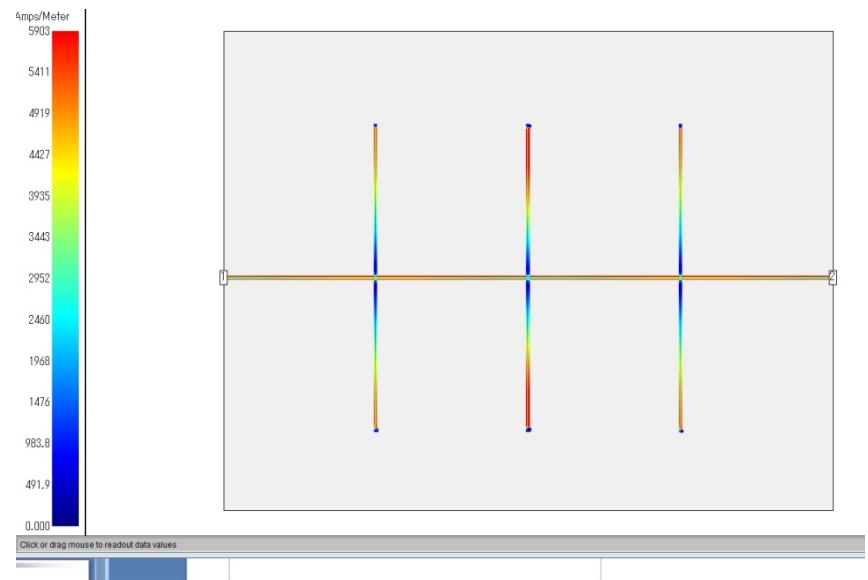




# フィルターシミュレーション結果



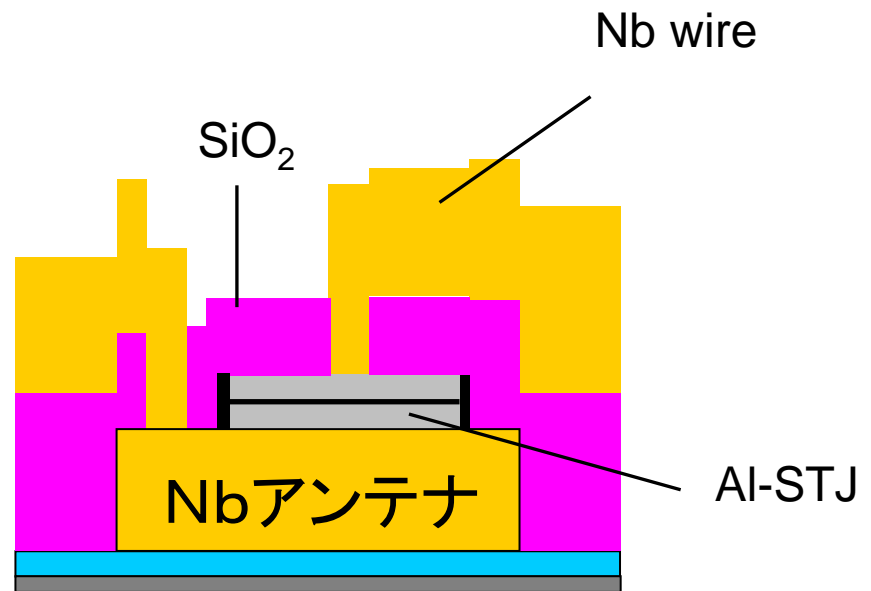
フィルターの透過率



電流分布

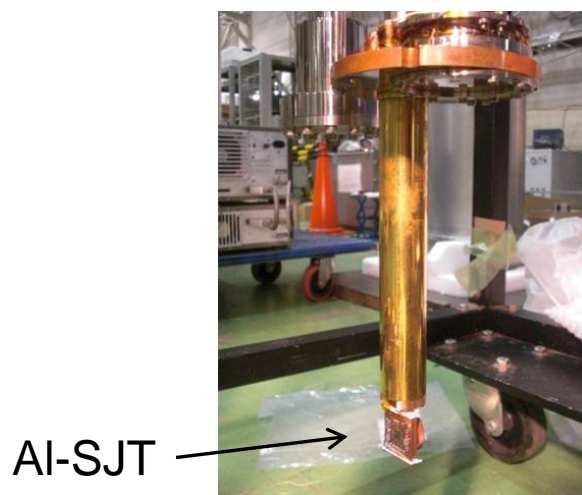
# STJ: 作成

## KEKプロセス装置



# 希釈冷凍機を使ったAI-STJの性能評価

- 希釈冷凍機 (KEK低温)
  - 最低到達温度: 50mK
  - 外部からミリ波導入の可能な構造を持つ
- 測定試料
  - AI-STJ (2008年12月試作)

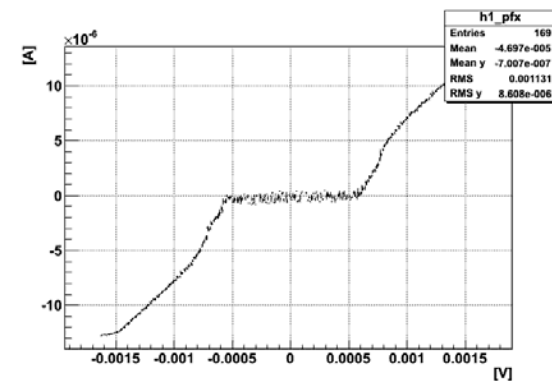


希釈冷凍機本体

# リーク電流の温度依存性

熱励起に由来のリーク電流の温度依存性

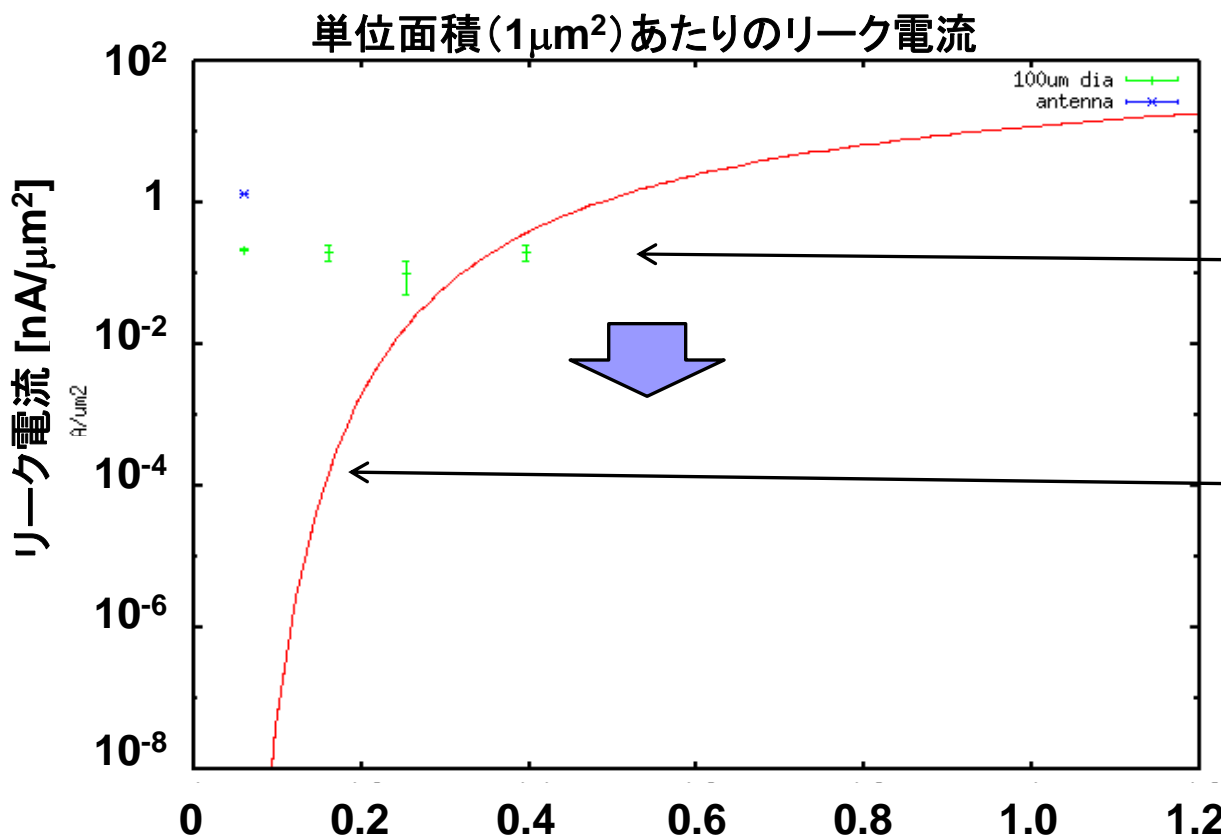
$$I_{leak} = \frac{1}{eR_n} \frac{\Delta + eV_b}{\sqrt{(\Delta + eV_b)^2 + \Delta^2}} \sqrt{2\pi\Delta k_b T} \exp\left(\frac{-\Delta}{k_b T}\right)$$



STJ IV特性

NEP=5 x 10<sup>-17</sup>W/√Hz

NEP=1x 10<sup>-18</sup>W/√Hz  
(LiteBIRDの要求)



# リークカレント一覧

		0.3K冷凍機		希釈冷凍機					
		0.32 K		0.16 K		0.254 K		0.397 K	
STJ	面積 (um <sup>2</sup> )	I <sub>leak</sub> (A)	I <sub>leak</sub> (A/um <sup>2</sup> )	I <sub>leak</sub> (A)	I <sub>leak</sub> (A/um <sup>2</sup> )	I <sub>leak</sub> (A)	I <sub>leak</sub> (A/um <sup>2</sup> )	I <sub>leak</sub> (A)	I <sub>leak</sub> (A/um <sup>2</sup> )
A2	40	5.00E-08	1.25E-09	-	-	-	-	-	-
A3	40	5.00E-07	1.25E-08	-	-	-	-	-	-
D2	10000	4.00E-06	4.00E-10	1.80E-06	1.80E-10	1.20E-06	1.20E-10	2.00E-06	2.00E-10
D3	10000	4.00E-06	4.00E-10	2.00E-06	2.00E-10	1.20E-06	1.20E-10	2.00E-06	2.00E-10

ノイズ(幅) ± Y(A)軸      X(V)軸  
 アンテナ      100nA      50uV  
 ダイヤ型      2000nA      70uV

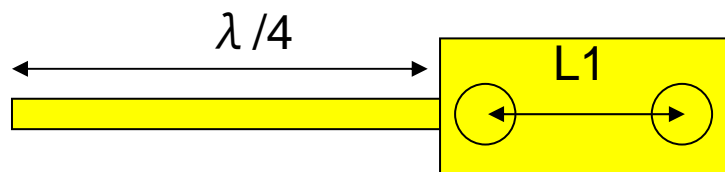
# IV特性

- 測定温度: 0.32K
- 素子: アンテナ接合Al-STJ (400GHz)
  - ギャップ ( $2 \Delta \times 2$ ) : 1.4mV  $\times$  2



Nbアンテナの上にAl-STJを作成したため  
超伝導ギャップはNbとAlの中間値になっている

# STJと伝送線の共振回路



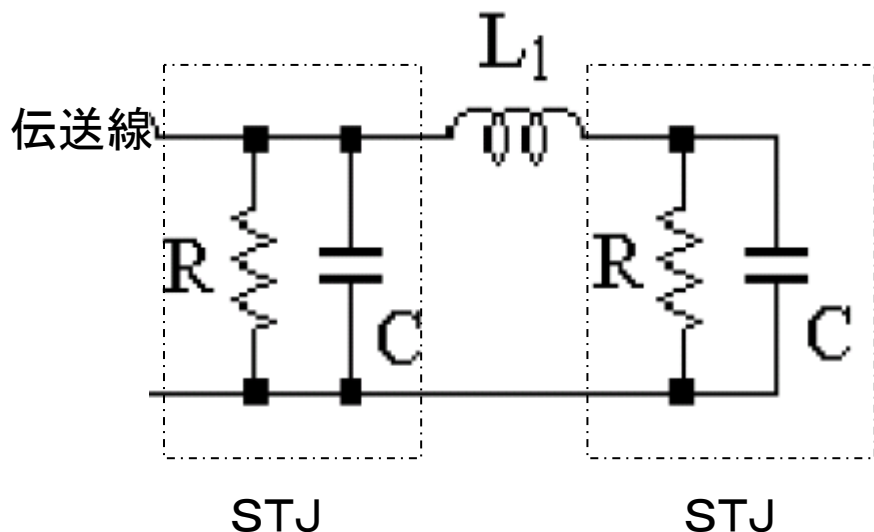
$$Z_{stj} = (1/R^2 + (\omega C)^2)^{1/2}$$

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

$$C = \epsilon_r \epsilon_0 \frac{W}{h} K$$

$$L = \mu_0 \frac{d}{WK}$$

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



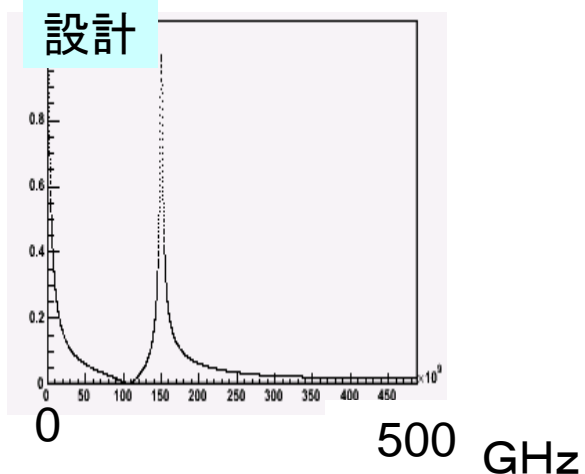
# 周波数特性

- 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

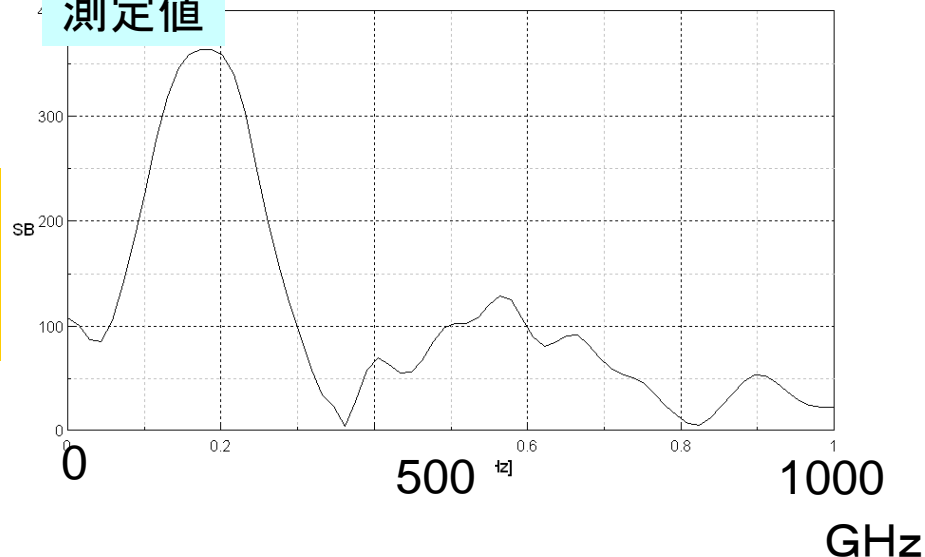


アンテナ接合AI-STJでミリ波を検出  
STJの酸化量を変化させ、最適な酸化膜の厚さを探す

設計



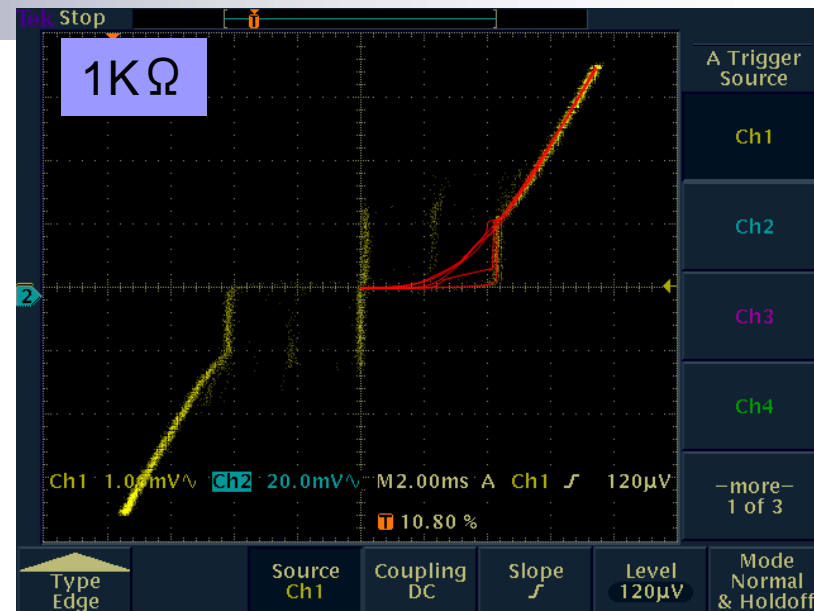
測定値



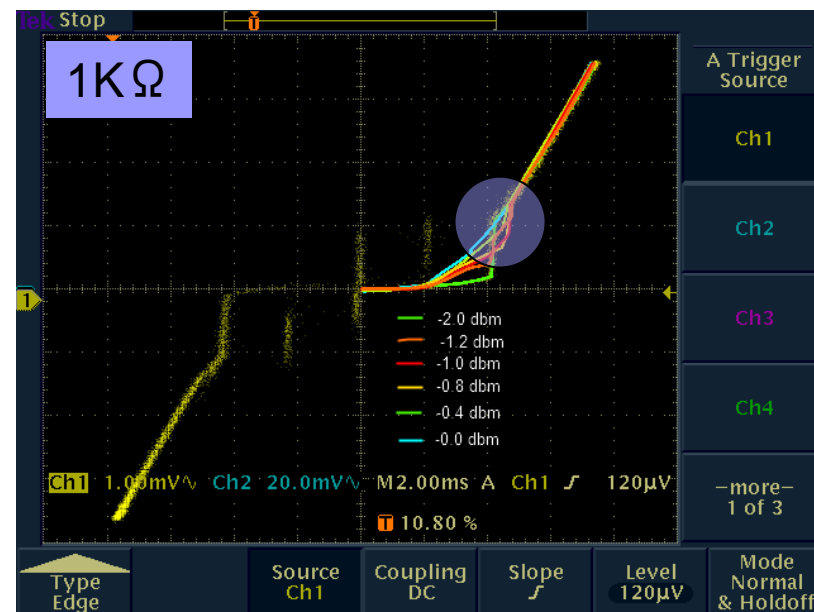


# 温度上昇とミリ波照射の比較

- とともに磁場無し
- 測定条件
  - 上図
    - STJの温度を0.3→2.0Kまで変化させた(赤線)。
    - ミリ波の導入無し。
  - 下図
    - STJ温度:0.3K
    - 温度ミリ波入射(90GHz)の強度を0→-2dbmまで変化。
- 考察
  - 温度上昇ではギャップが外側に広がるようなIVの変化は見られなかった。フォトアシステッドトンネルだと考えられる？大きさは0.3mV程でこれは90GHzに対応

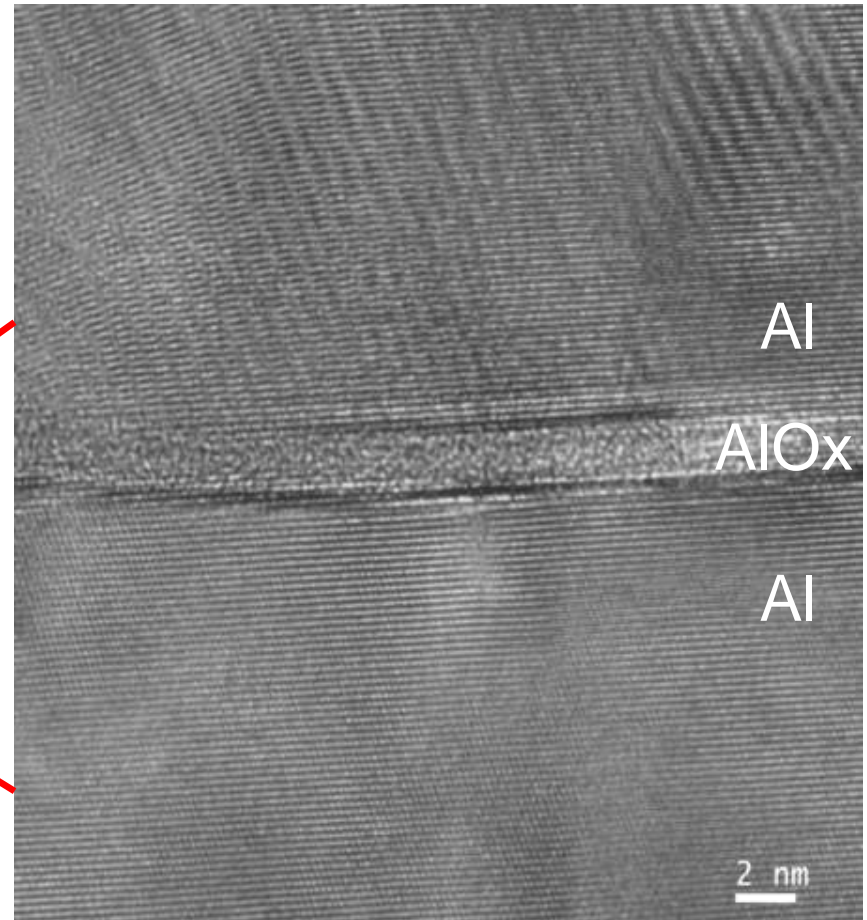
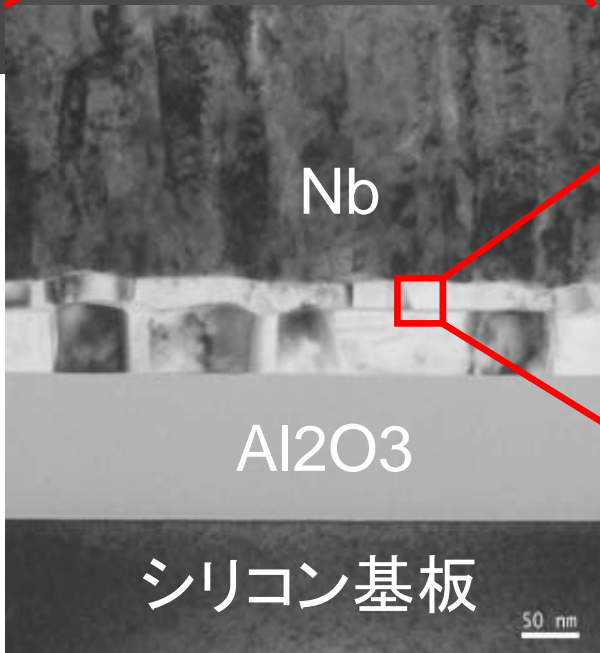
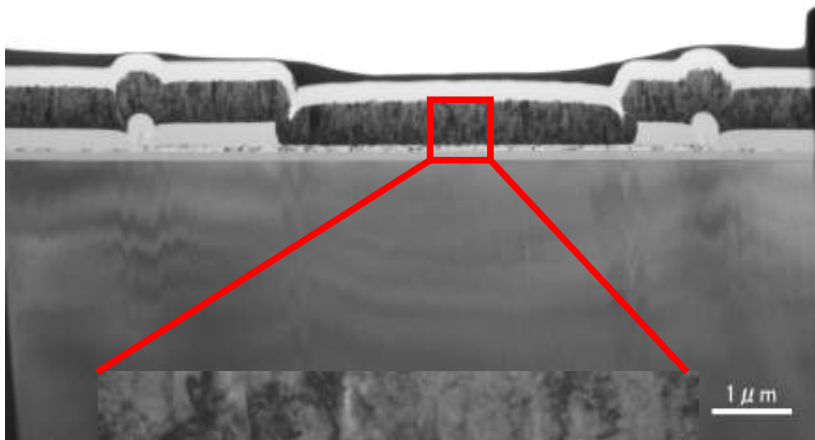
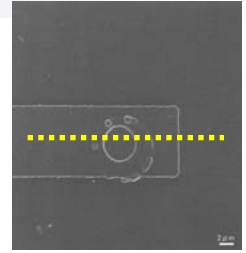


IV測定(温度変化)



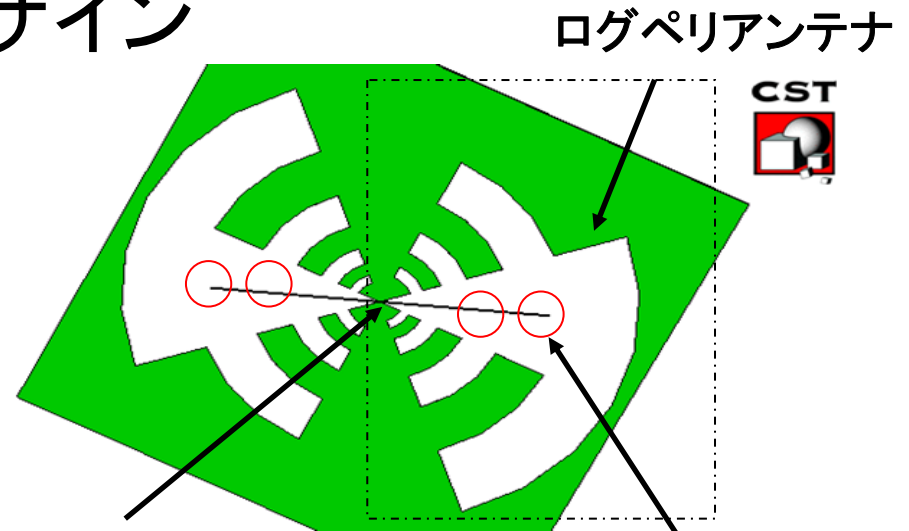
IV測定(入射強度変化)

# TEMによるAl-STJの断層写真



# アンテナ接合AI-STJデザイン

- 構成
  - ログペリアンテナ
  - 伝送線
  - STJの共振回路
- 150GHz、400GHzに感度があるようにデザイン



伝送線

AI-STJ

150GHz周波数特性(計算式)

