

アルミ超伝導トンネル接合素子(AL-STJ) を用いたCMB偏光カメラの開発 -エネルギーギャップとアルミの 厚さの相関、最適化-

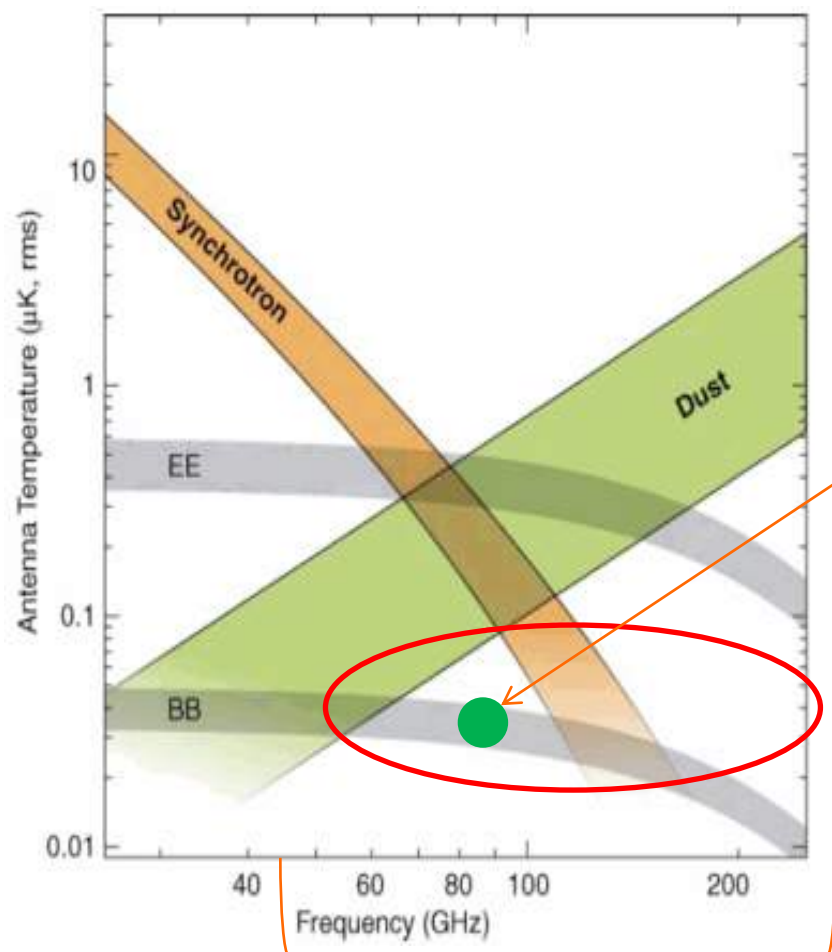
1

総研大、高エ研A、岡山大B、理研C
渡辺広記○、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、美馬寛^B、石野宏和^B、樹林
敦子^B、佐藤広海^C、有吉誠一郎^C、大谷知行^C、
他KEK測定器開発室:超伝導ミリ波カメラ開発グループ

目次

- 研究背景
- STJのデザイン
- Alに対するNbの近接効果
- STJの作成
- STJの測定方法(IV測定)
- まとめ、今後の予定

研究背景



- 現在我々はB-modeの精密測定を目的とした小型衛星 LiteBIRDを計画している
- LiteBIRDでは60～250GHz(Energy Gap $2\Delta \leq 120\text{GHz}$)の検出器を搭載予定。この範囲をカバーする検出器が要求される

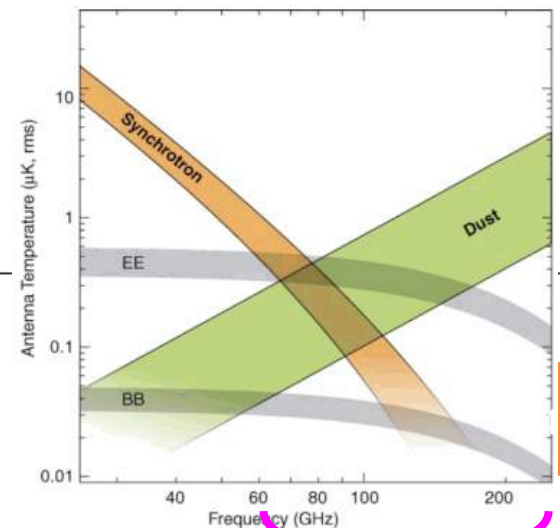
超伝導体の選択

エネルギーギャップ 2Δ (0Kのとき) と超伝導転移温度 T_c の関係式

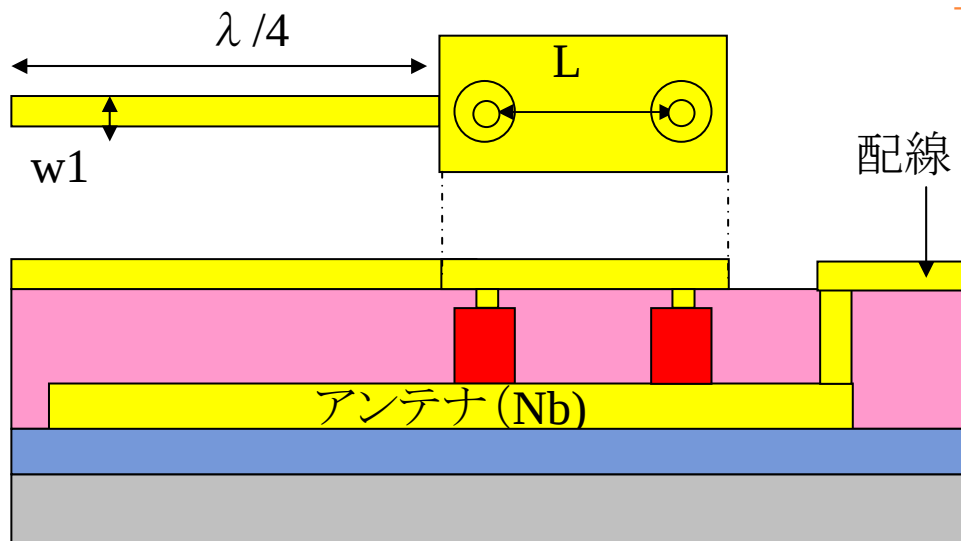
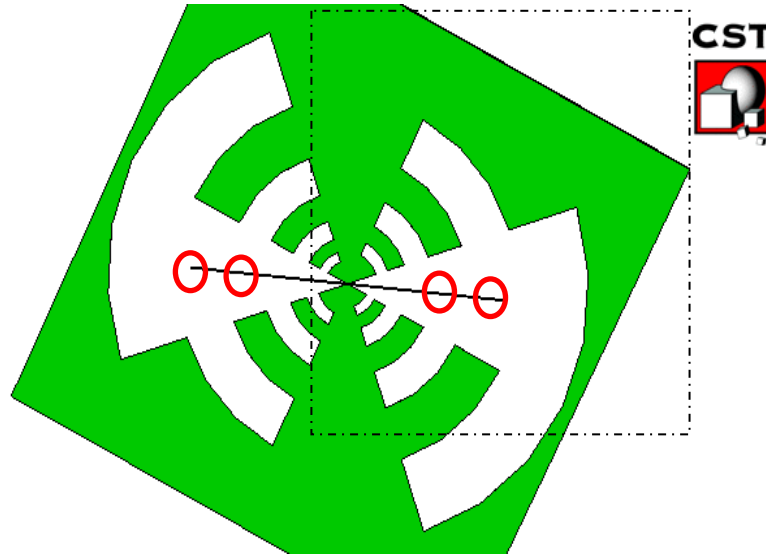
$$2\Delta(0K) = 3.528kT_c$$

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	
Zn	0.852	0.22	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、40GHz以上のほぼ全域をカバーできる可能性あり。



AL-STJのデザイン



デザイン

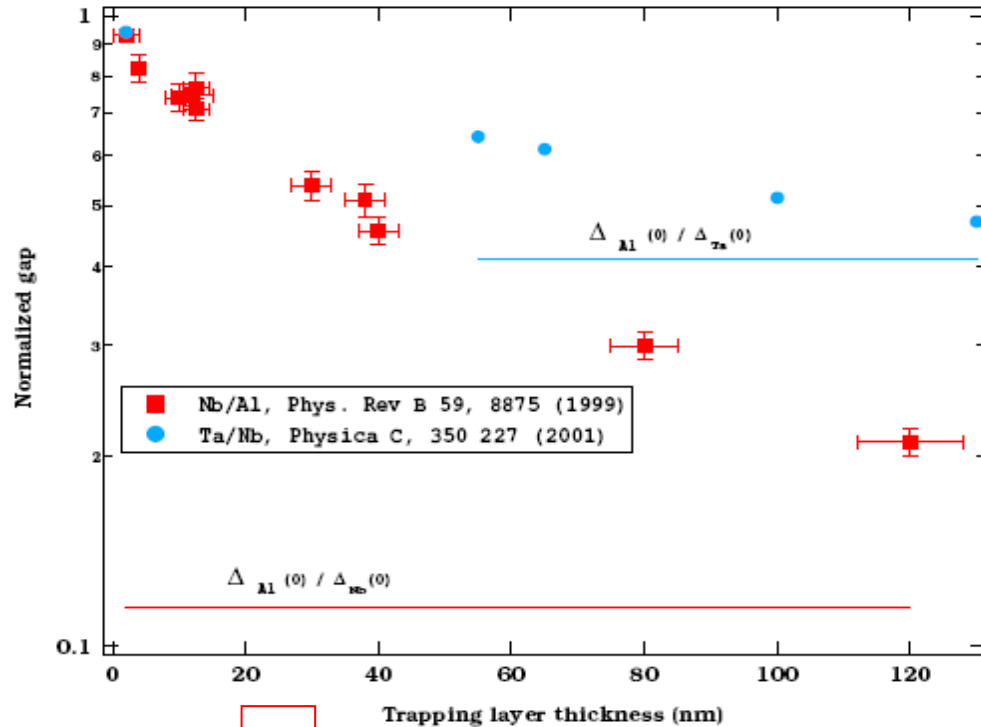
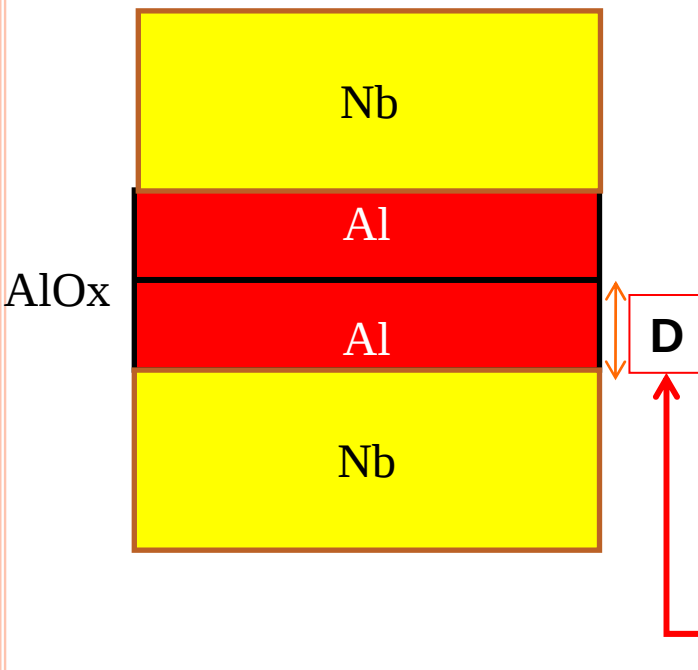
- ログペリアンテナ
- Parallel connected twin junctions
 - STJを二つ以上並べて共振回路を作る

素材

- 基盤: サファイア、Si
- アンテナ・伝送線: Nb
- STJ: Al/AlO_x/Al
- 層間絶縁膜: SiO₂
- バッファ: Al₂O₃

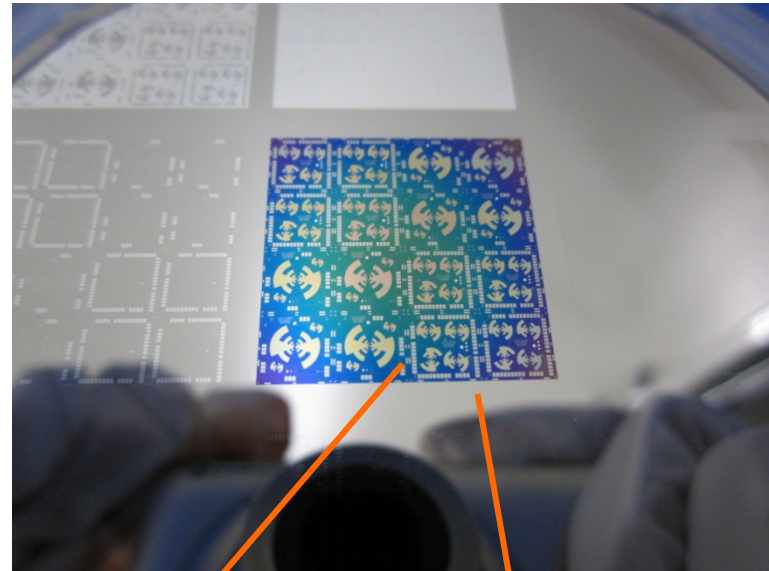
Alに対するNbの近接効果

- 現在のデザインではJunction周辺の構造はNb/Al/AlO_x/Al/Nbとなっている。
- Al膜厚が薄いとNbによる影響で 2Δ が大きくなる(近接効果)



作成したSTJ

- デザイン
 - 50GHz, 150GHz, 400GHz
- 素子のサイズ
 - $5 \times 5\text{mm}$
- アルミの膜厚
 - 5, 15, 30nmの3種類

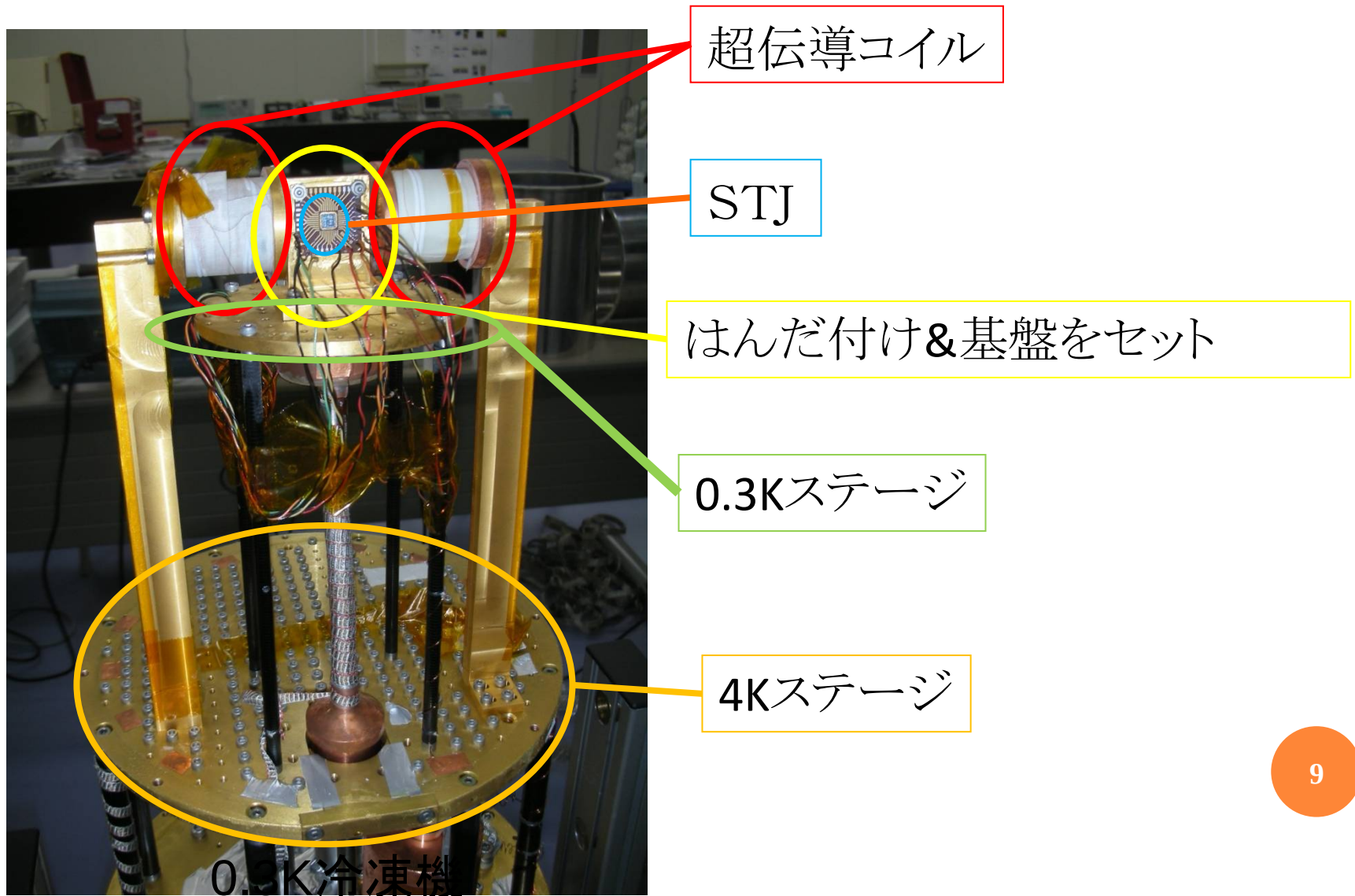


150GHz × 4

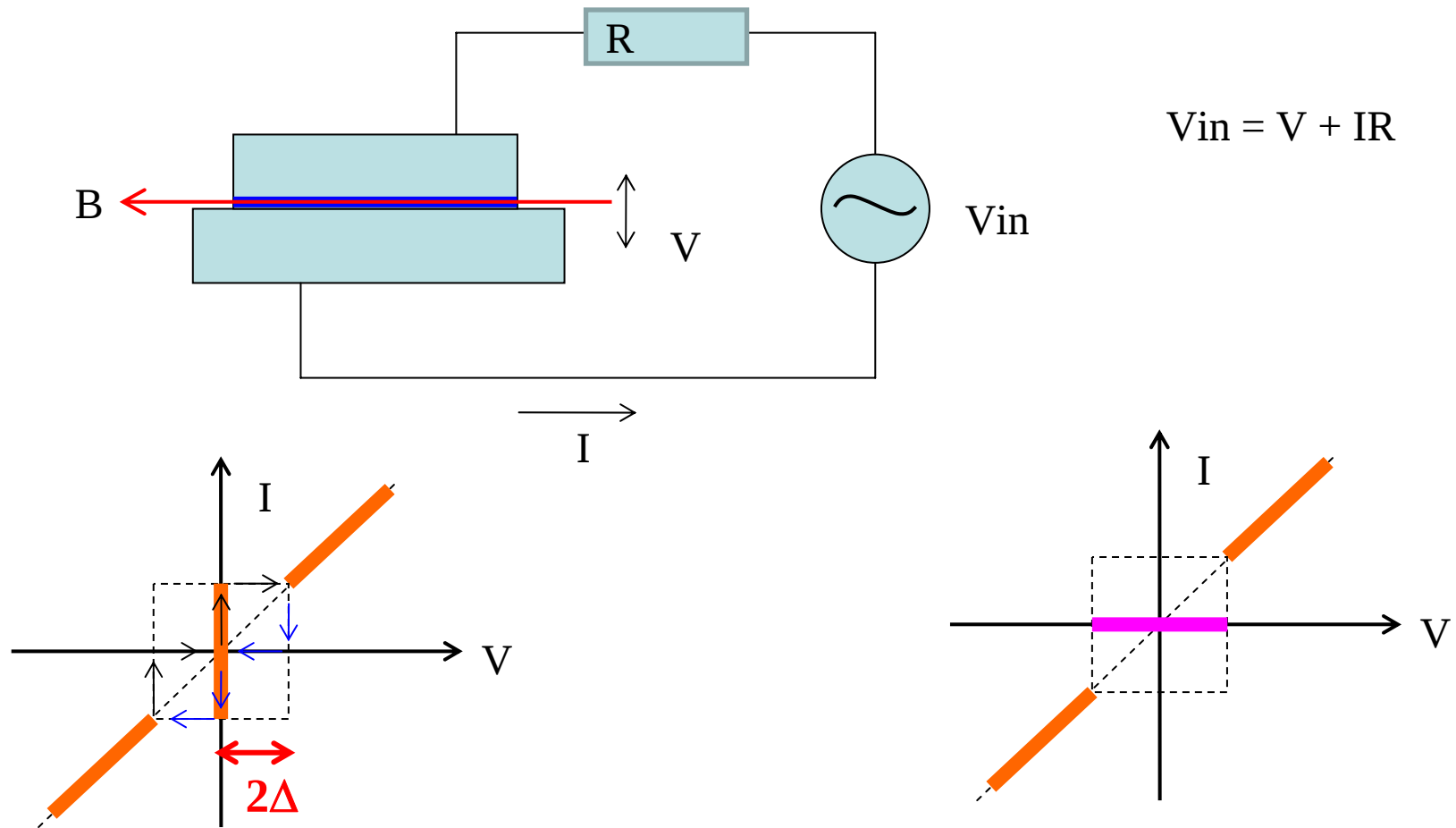
STJの測定

～I-V測定～

0.3K冷凍機への素子のセッティング



I-V測定 = SIS構造がうまく出来ていることのチェック



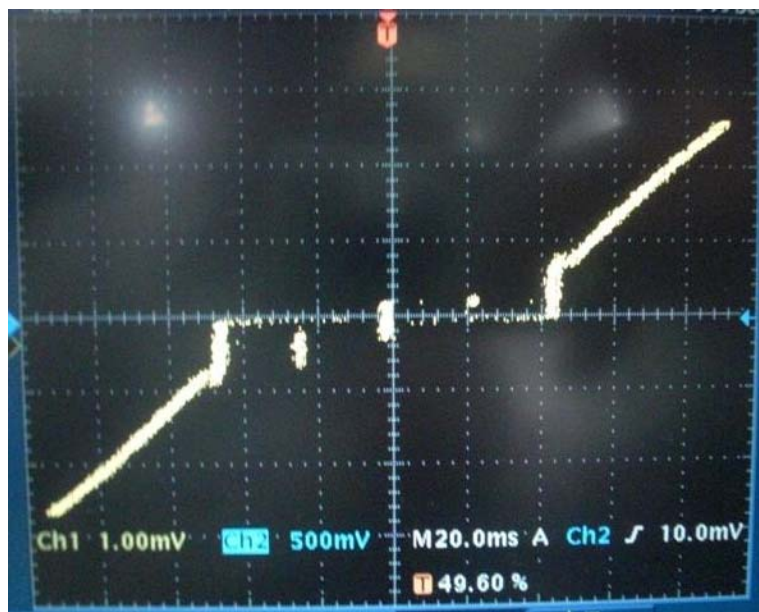
磁場無
トンネルバリアをクーパー対が
抜けられる(直流ジョセフソン効果)

磁場有
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

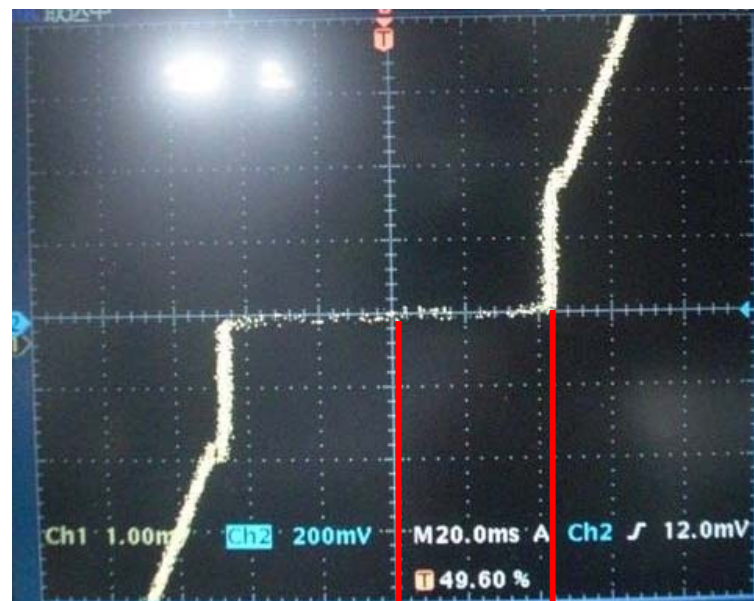
IVカーブの例

- デザインLA03
- Al膜厚～5nm

磁場無し



磁場有り

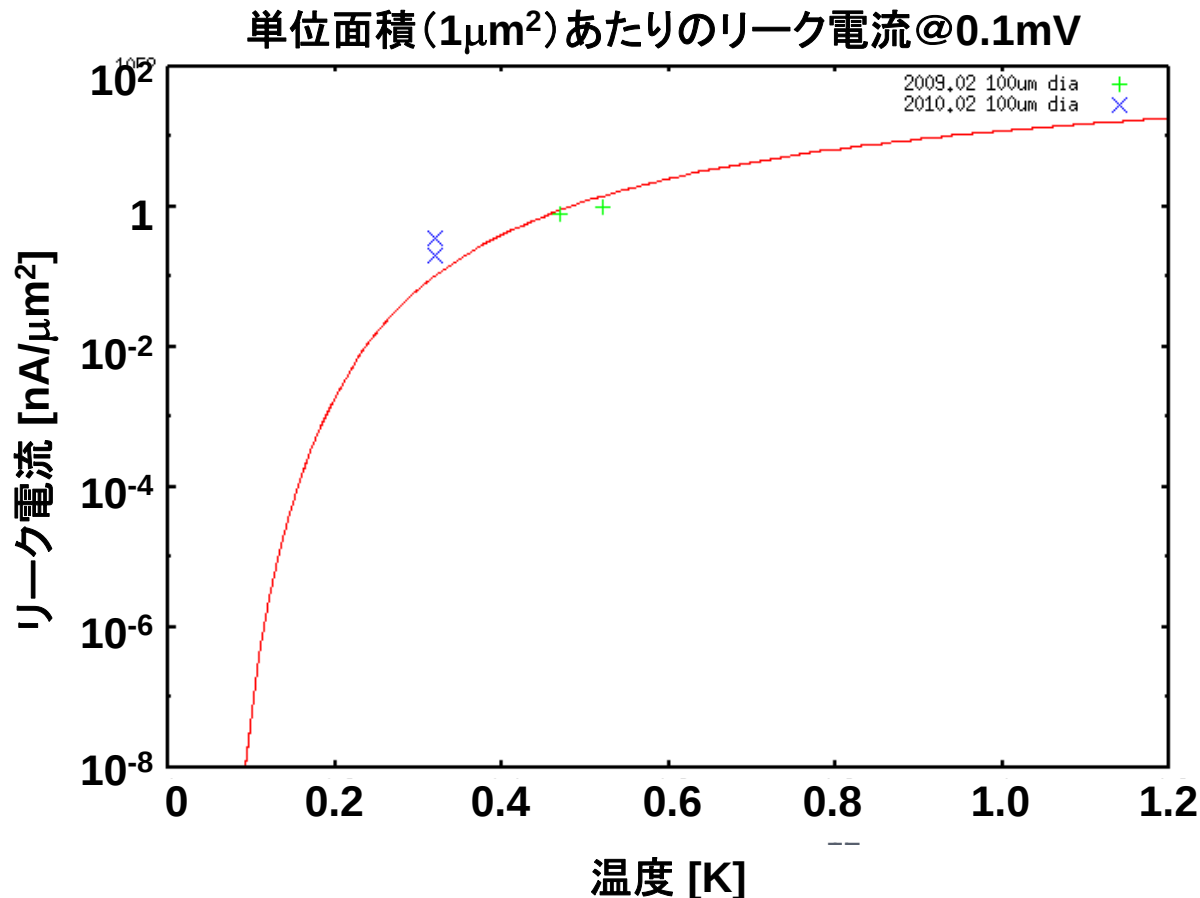


ギャップ $2\Delta = 1.1\text{mV}$

～2.2mV

リーク電流の評価 (0.32, 0.47, 0.52K)

$$I_{leak} = \frac{1}{eR_n} \frac{\Delta + eV_b}{\sqrt{(\Delta + eV_b)^2 + \Delta^2}} \sqrt{2\pi\Delta k_b T} \exp\left(\frac{-\Delta}{k_b T}\right) \quad \leftarrow \text{この式と比較}$$

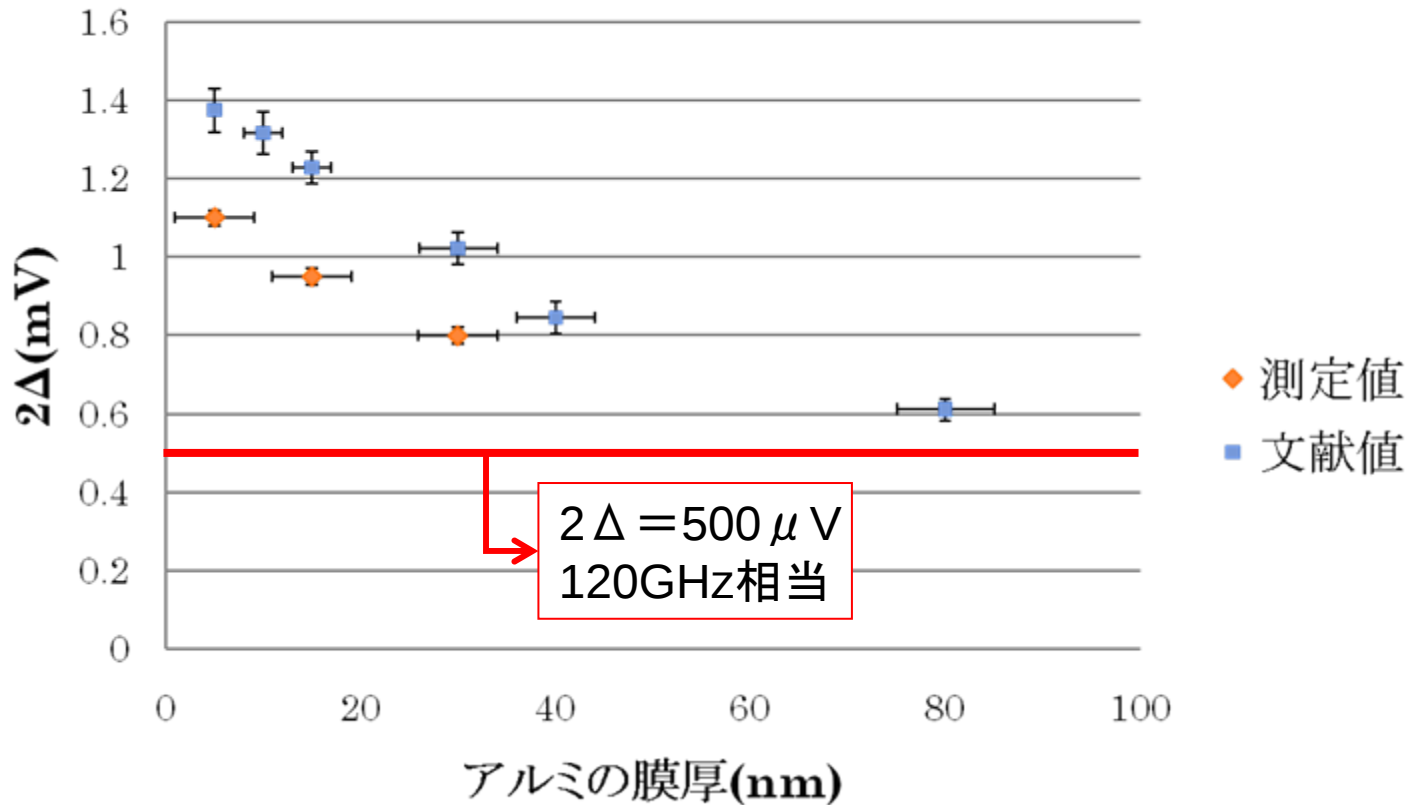


この素子をさらに低温に冷却し、どこまで下がるか調べる

計算に乗ると、
~pA@0.1K

測定結果

アルミの厚さとエネルギーギャップ 2Δ



アルミの膜厚	2 Δ (mV)	対応周波数(GHz)
5	1.1	266
15	0.95	230
30	0.8	193

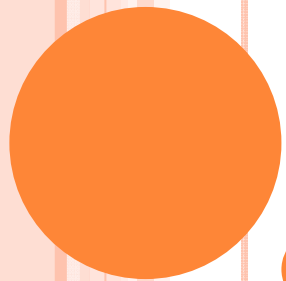
まとめ、今後の予定

○ まとめ

- リークカレントについては飽和の兆しがあるので、0.3Kよりさらに低温での測定が必要である
- 作成したAl-STJのエネルギーギャップ 2Δ についてはNbによる近接効果による影響がみられた

○ 今後の予定

- エネルギーギャップの測定値と文献値に開きがある原因を明らかにする
- Alの膜厚が厚い(～80nmなど)素子を作成し測定
→ $2\Delta \leq 120\text{GHz}$ を目指す
- Nbによる近接効果をなくすために新しいデザインの検討



BACK UP

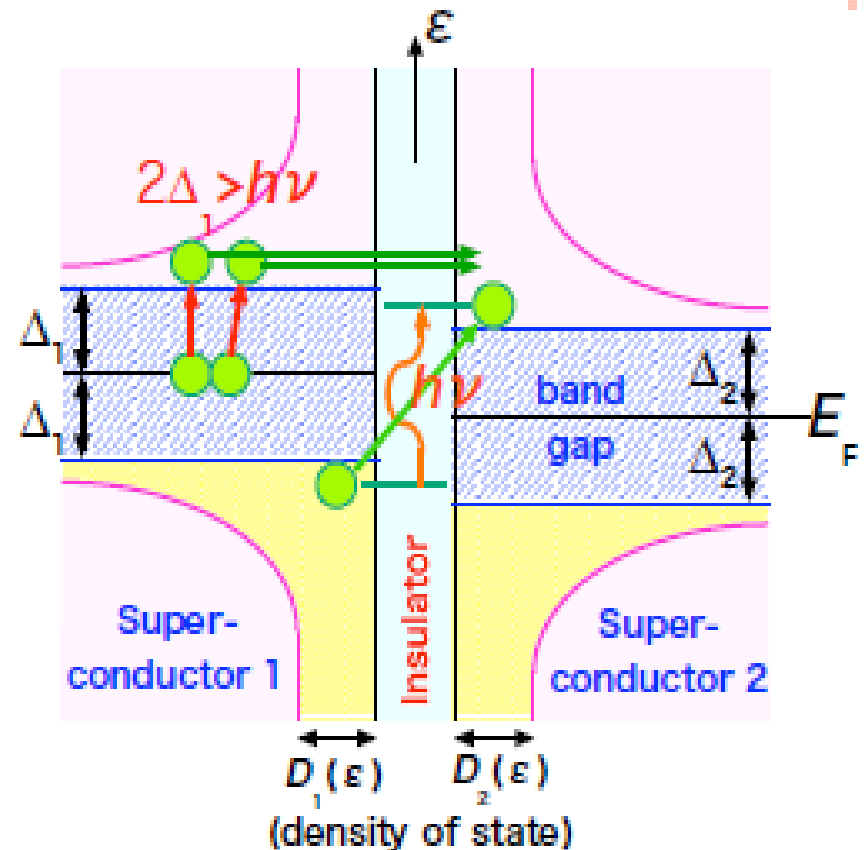
ビデオ検出器の原理と性能

- 検出器の性能は、感度 (S)、雑音 (N)、NEP (Noise Equivalent Power) で表される。

- $S = \eta \cdot e/h \nu$ [A/W]
- $N = \sqrt{2eI_0}$ [A/ $\sqrt{\text{Hz}}$]
- $\text{NEP} = N/S$ [W/ $\sqrt{\text{Hz}}$]

η : 量子効率

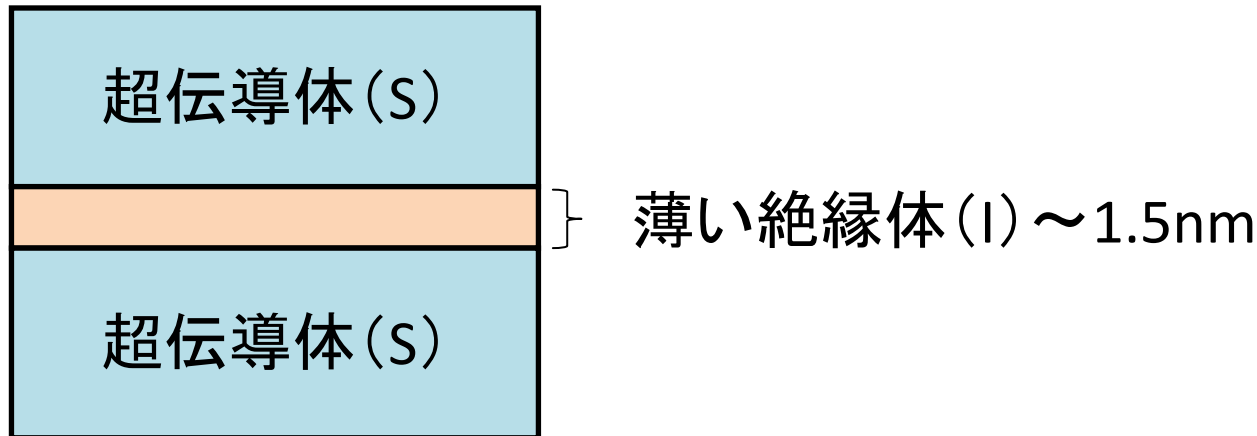
I_0 : リーク電流

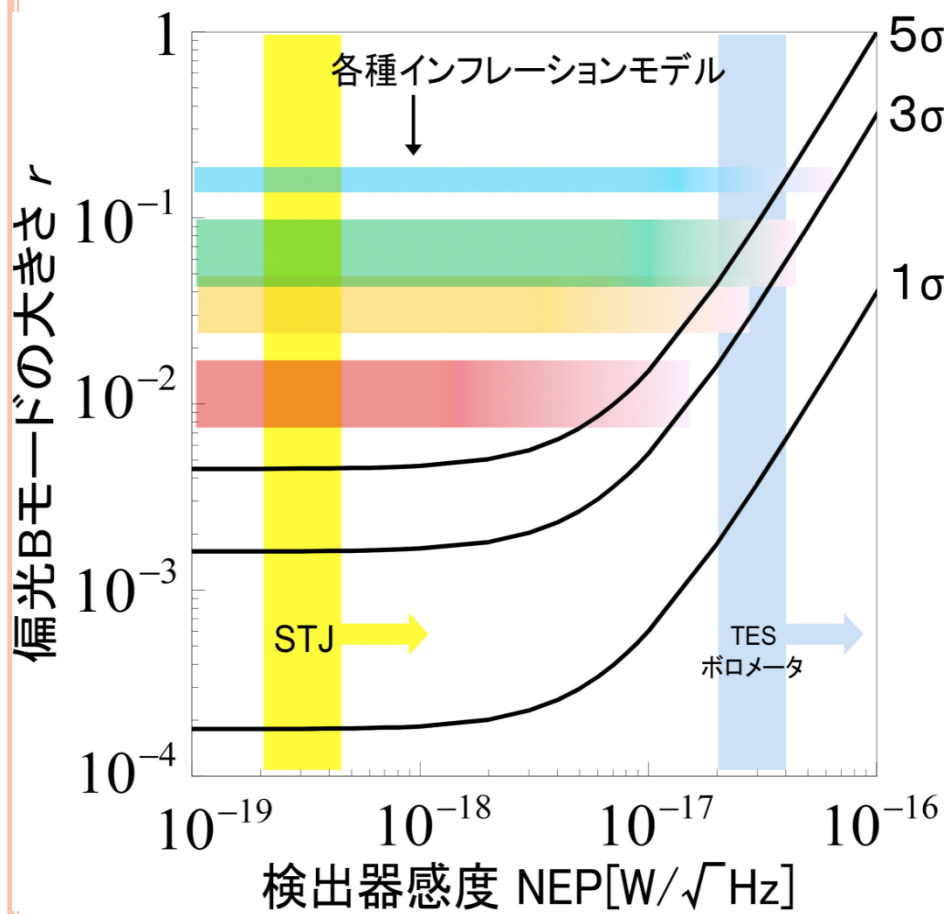


STJ (Superconducting Tunnel Junction)

- ジョセフソン素子

超伝導体 (S) - 絶縁体 (I) - 超伝導体 (S) (SIS素子)

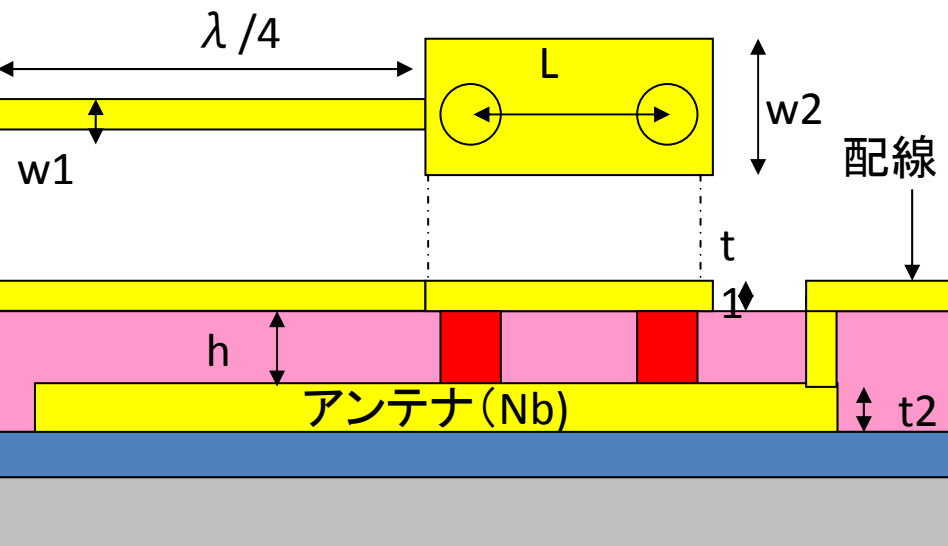
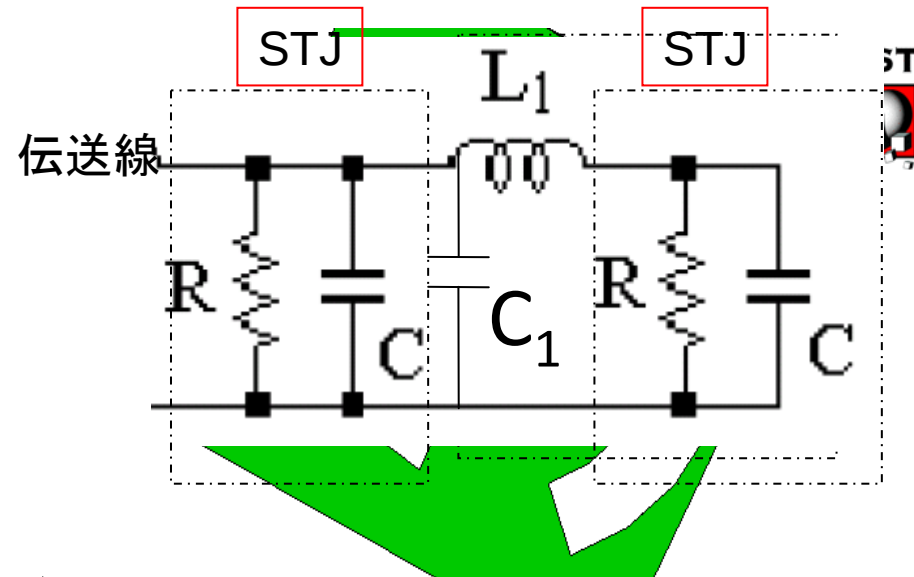




STJアレイ検出器

- ・量子力学的トンネル効果
- ・ $NEP \approx (2-4) \times 10^{-19} \text{ W}/\sqrt{\text{Hz}}$
- ・大ダイナミックレンジ ($> 70 \text{ dB}$)
- ・温度変化に対して安定

全体のデザイン



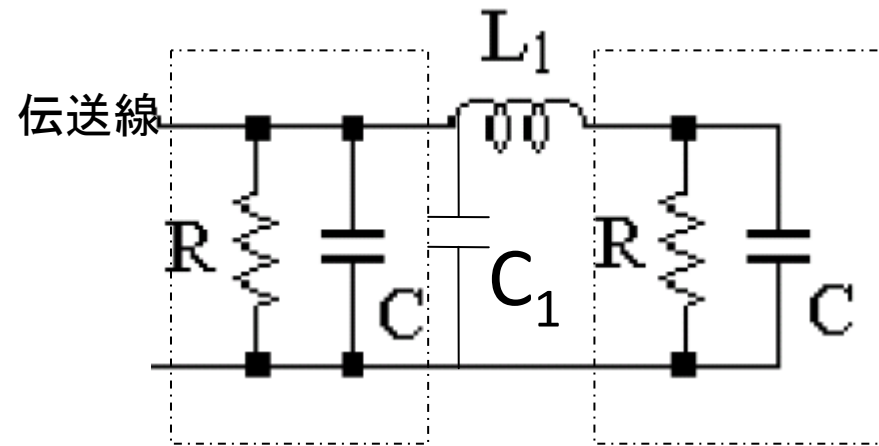
デザイン

- 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

素材

- 基盤: サファイア、Si
- アンテナ・伝送線: Nb
- STJ: Al/AIOx/Al
- 層間絶縁膜: SiO2

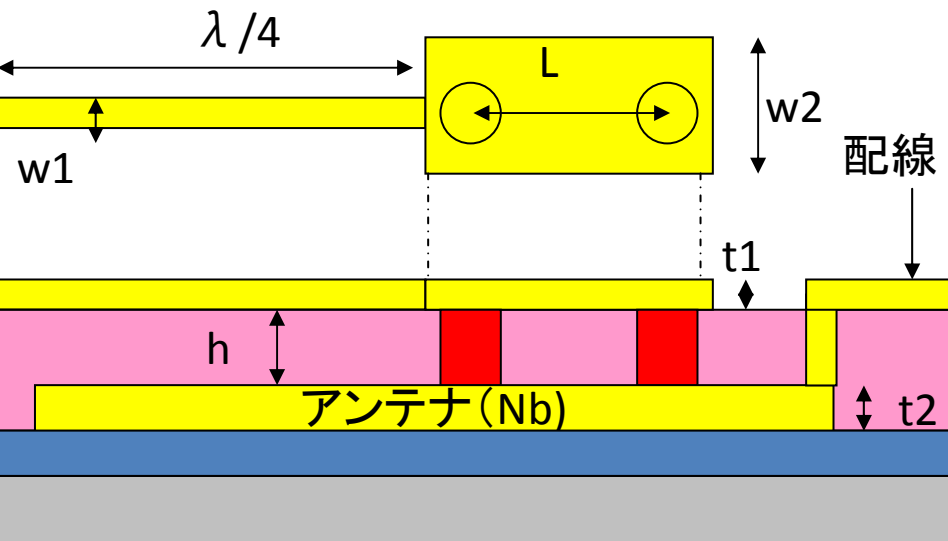
共振周波数にあって Lの L_1 と C_1 を求める



$$Z_{\text{ant}} = 41.3\Omega$$

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

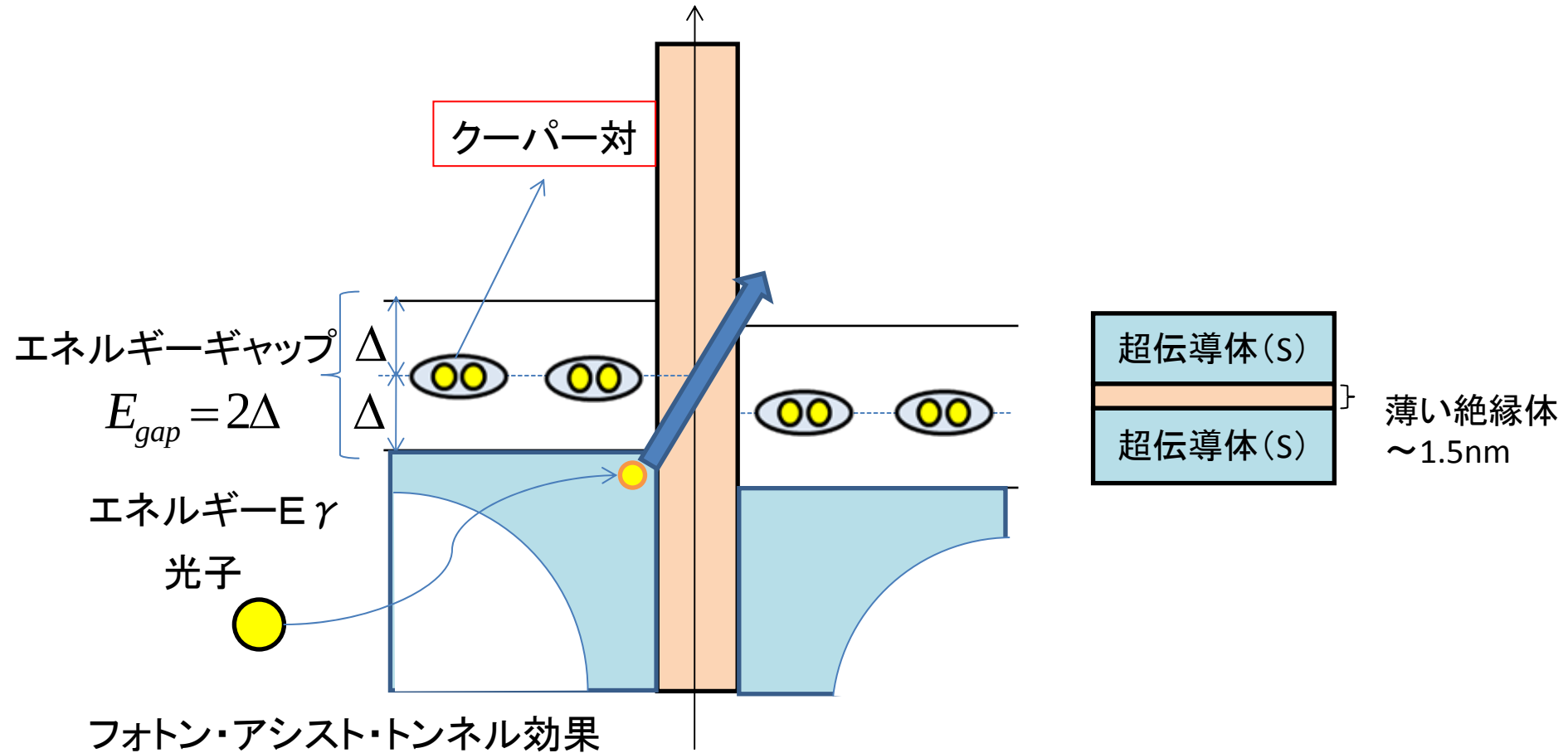
$$Z_{\text{strip}} = \sqrt{\frac{L_1}{C_1}}$$



反射の無いように
インピーダンスマッチ
を行ったデザインをしている

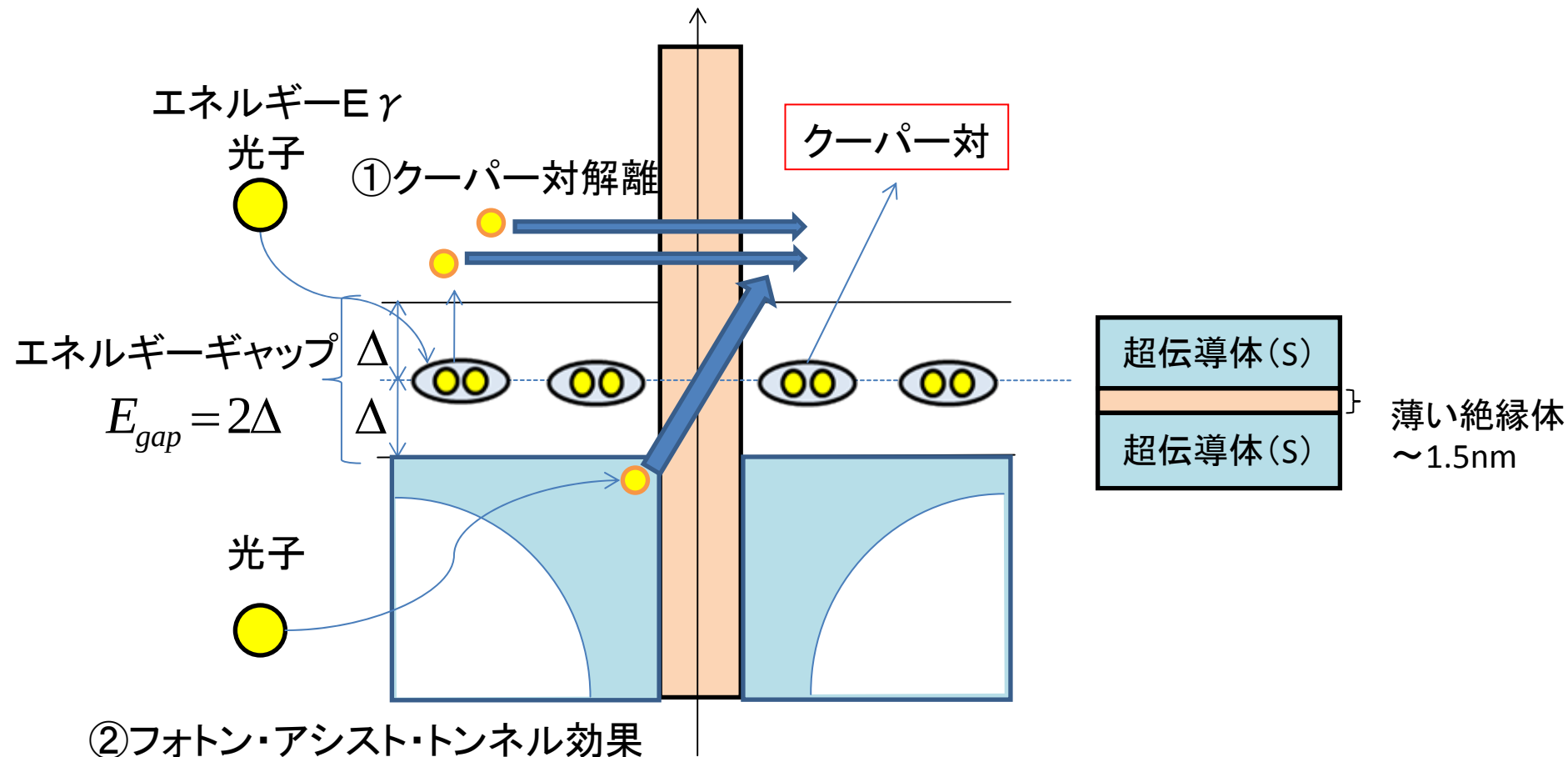
動作原理

エネルギー準位



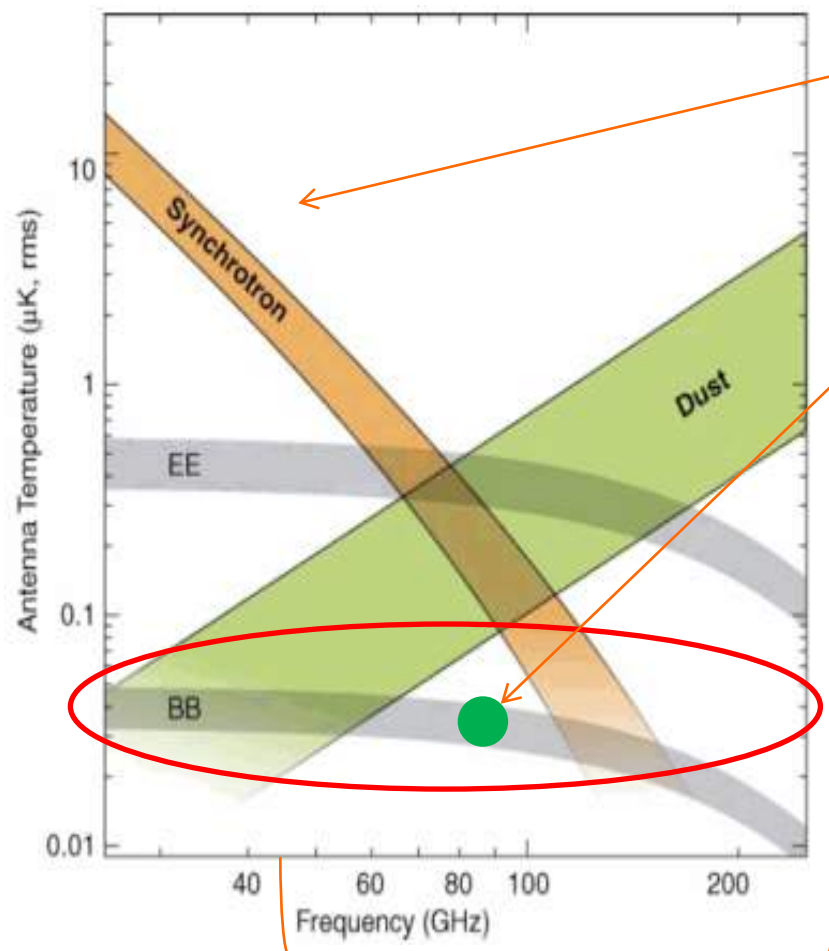
動作原理

エネルギー準位



- ① $E_\gamma > 2\Delta$ の光子を検出できるクーパー対解離
- ② $E_\gamma < 2\Delta$ の光子も検出できるビデオ検出

研究背景



- Foreground (雑音)を理解したい
- 90GHz付近でBモードに対するS/Nが最小になる。この部分を精密に測定したい

40～260GHzを単一技術で検出できるセンサーがほしい

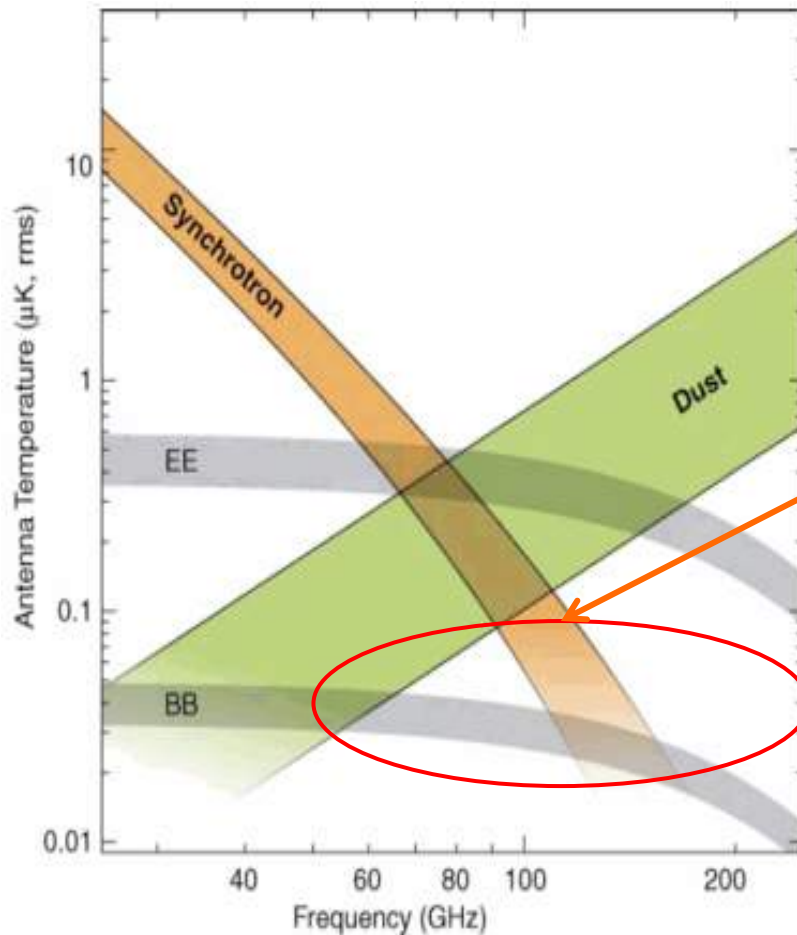


STJ

↑
波長10mm

↑
波長 1mm

研究背景



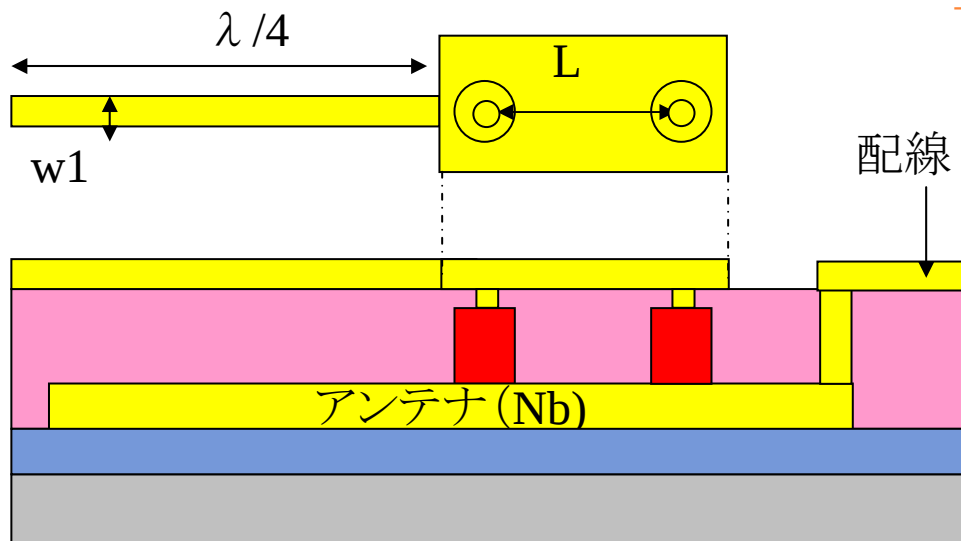
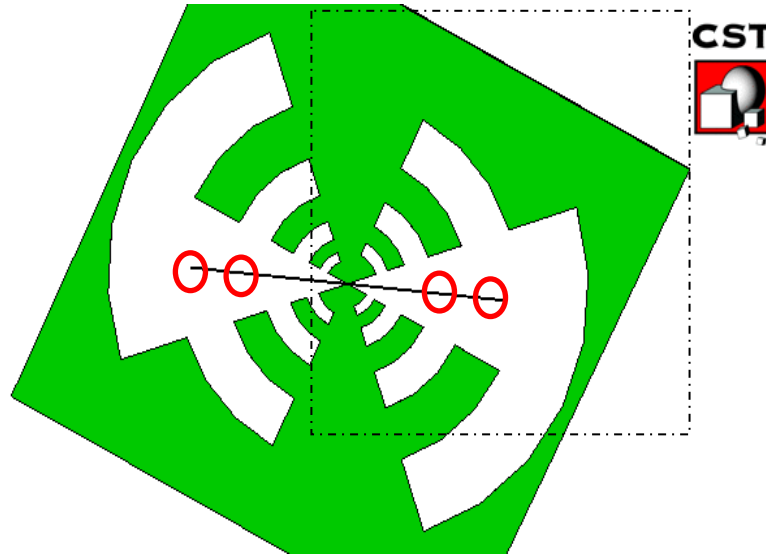
- 現在KEK CMB GroupではCMBのB-modeの精密測定を目的とした小型衛星Lite BIRDを計画している
- Lite BIRDでは60~250GHzをカバーする検出器が要求される



AI-STJ



AL-STJのデザイン



デザイン

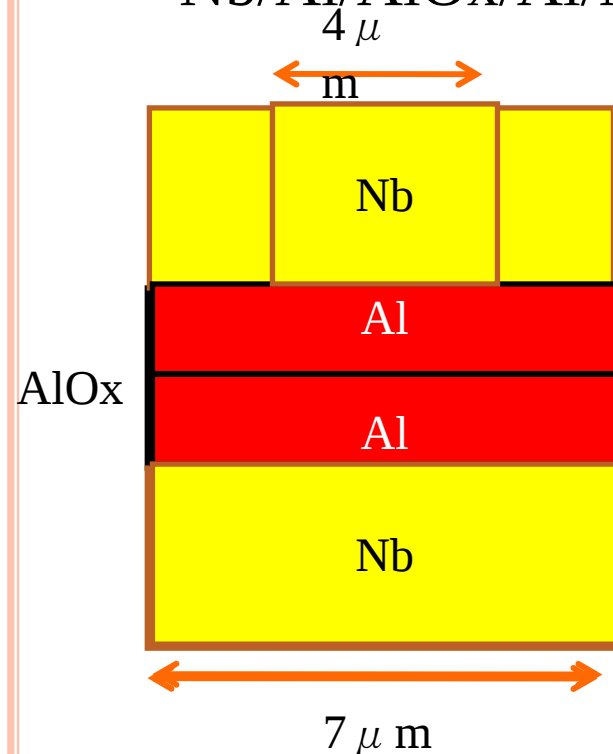
- ログペリアンテナ
- Parallel connected twin junctions
 - STJを二つ以上並べて共振回路を作る

素材

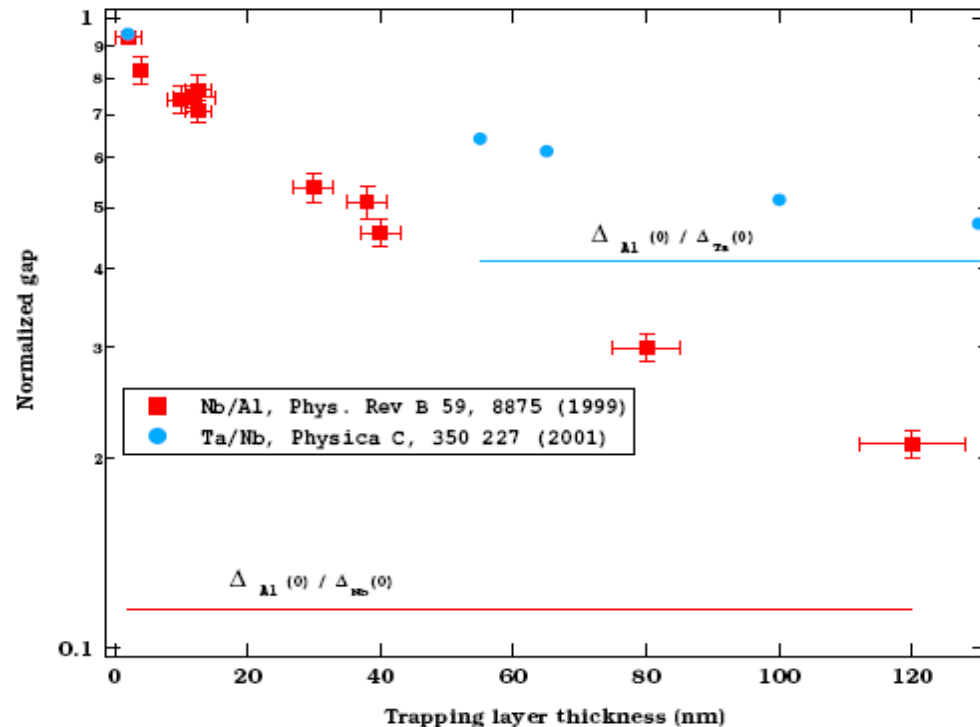
- 基盤: サファイア、Si
- アンテナ・伝送線: Nb
- STJ: Al/AlO_x/Al
- 層間絶縁膜: SiO₂
- バッファー: Al₂O₃

Alに対するNbの近接効果

- Al膜厚が薄いとNbによる影響で 2Δ が大きくなる(近接効果)
- 現在のデザインではJunction周辺の構造は
Nb/Al/AlO_x/Al/Ta

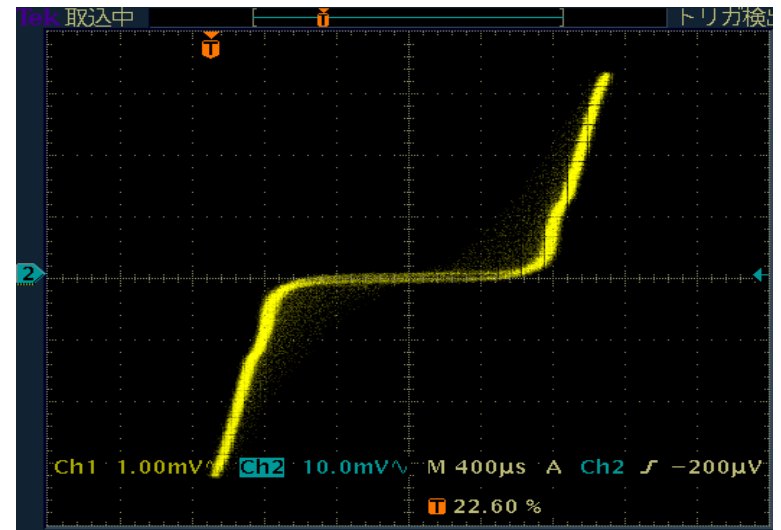


実際の構造

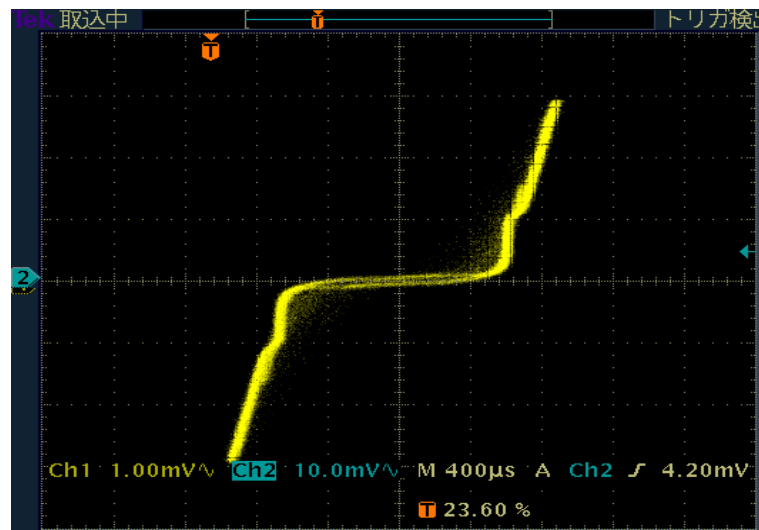




アルミの厚さ10nm
 $2\Delta = 1.1\text{mV}$



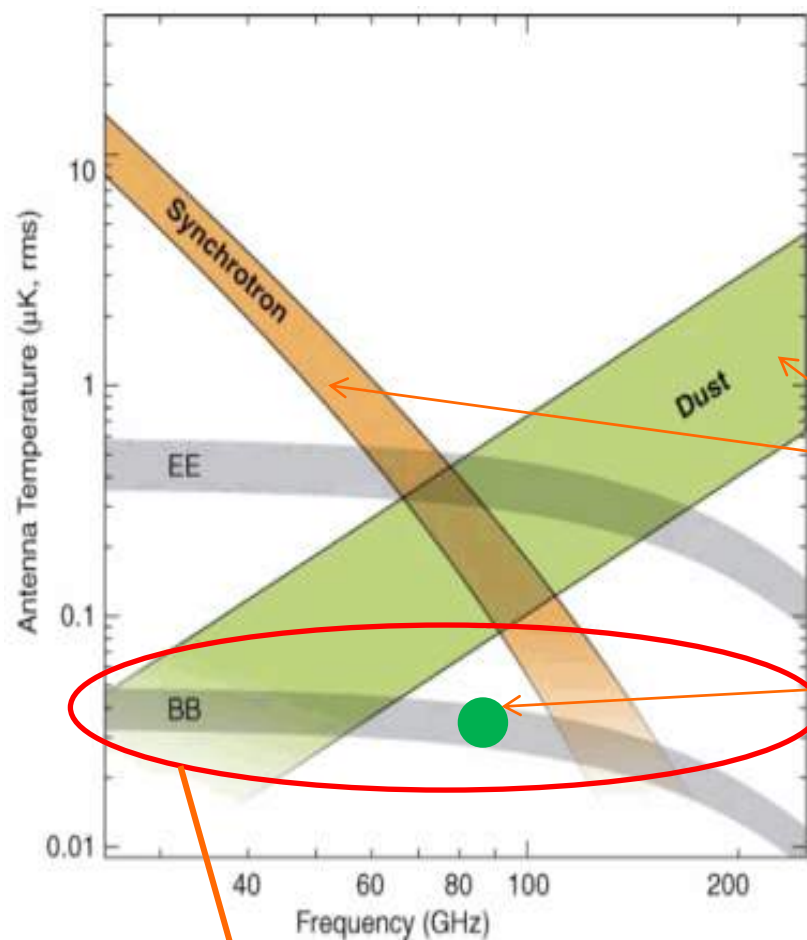
アルミの厚さ30nm
 $2\Delta = 950\mu\text{V}$



アルミの厚さ60nm
 $2\Delta = 800\mu\text{V}$



研究背景



CMBのB-mode偏光

- 我々 CMB GroupではCMBのB-mode偏光測定を通した原始重力波の発見を目的としている
- Foreground(雑音)を理解したい
- 90GHz付近でBモードに対するS/Nが最小になる。この部分を精密に測定したい