

宇宙マイクロ波背景放射(CMB)偏光測定用 Microwave Kinetic Inductance

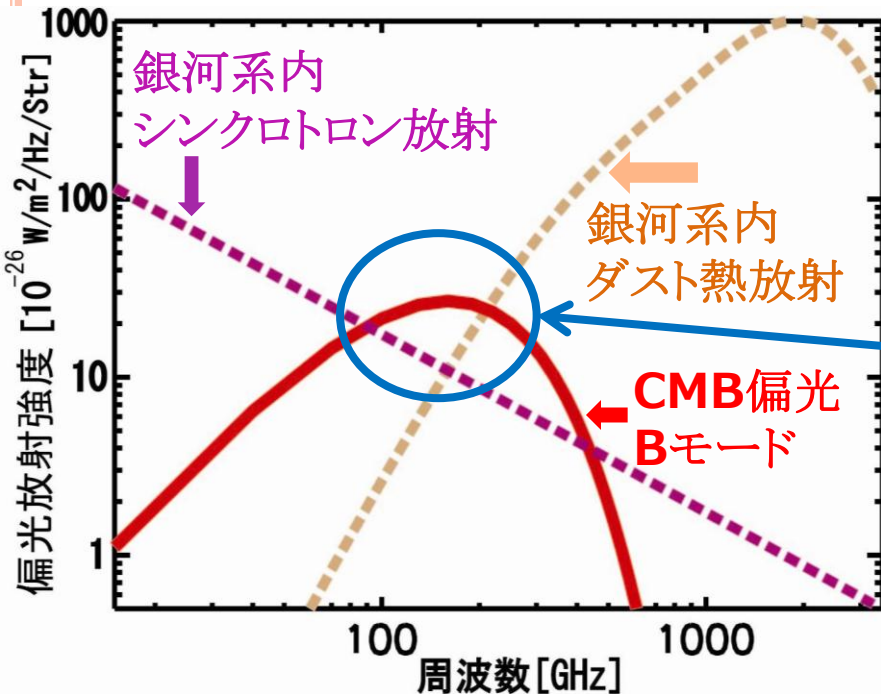
Detectors(MKIDs)の開発

総研大、高エネ研^A、岡山大^B、理研^C、天文台^D
渡辺広記[○]、羽澄昌史^A、吉田光宏^A、佐藤伸明^A、都丸隆行^A、
木村誠宏^A、岡村崇弘^A、石野宏和^B、樹林敦子^B、岐部桂朗^B、美
馬覚^B、山田要介^B、湯浅泰気^B、有吉誠一郎^C、大谷知行^C、野口
卓^D、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
- MKIDsの原理
- 構造・動作
- 高感度MKIDsに向けた改善
- 今後の方針、課題

研究背景



- 現在我々CMBグループでは、CMBのBモード偏光の精密測定を目的とした小型衛星LiteBIRDを計画している

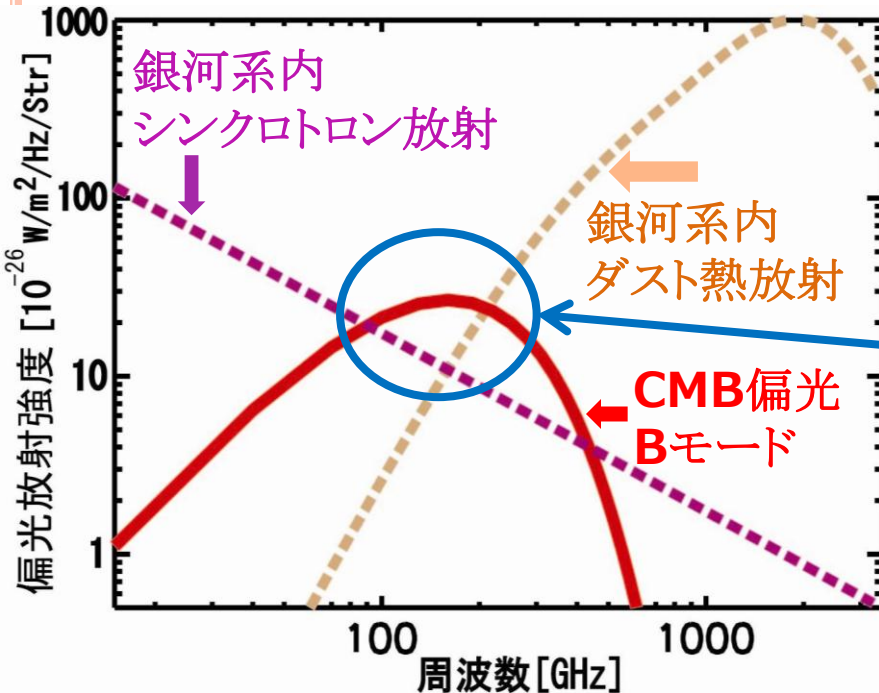
- LiteBIRDからの検出器への性能要求

- 周波数: 60~250GHzで5バンド
 - 帯域幅は30%
- 超高感度: NEP $\sim 10^{-18}$ W/ $\sqrt{\text{Hz}}$
 - CMBのフォトンノイズリミット
- 約2000個のアレイ



- 本発表のMKIDsは、多素子化に対して絶大な能力を発揮することから、よい候補である。

研究背景



- 現在我々CMBグループでは、CMBのBモード偏光の精密測定を目的とした小型衛星LiteBIRDを計画している

- LiteBIRDからの検出器への性能要求

- 周波数: 60~250GHzで5バンド
 - 帯域幅は30%

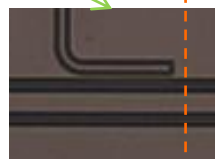
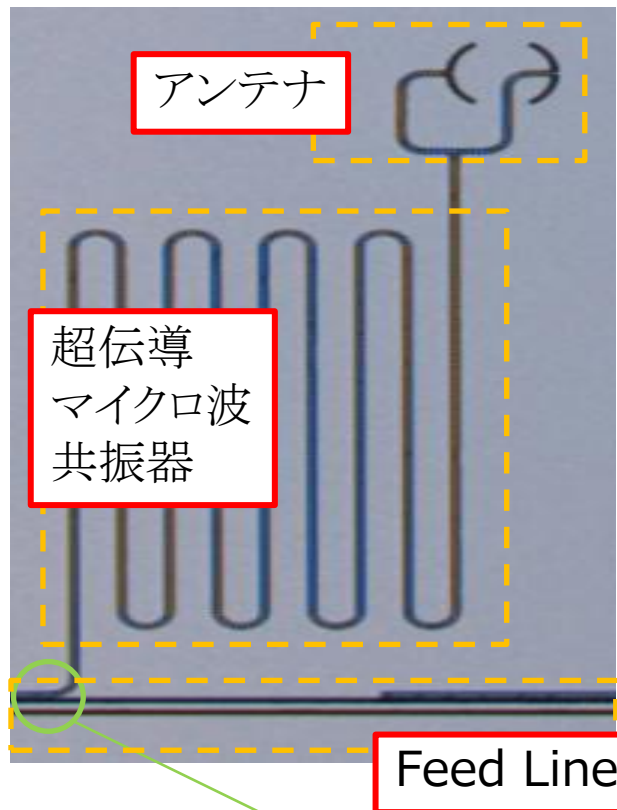
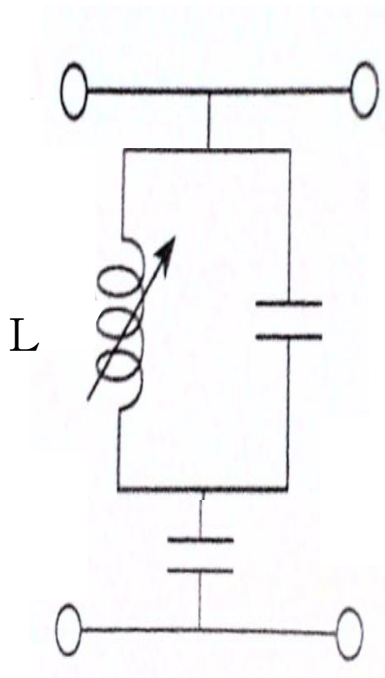
- 超高感度: NEP $\sim 10^{-18} \text{ W}/\sqrt{\text{Hz}}$
 - CMBのフォトンノイズリミット

- 約2000個のレイ

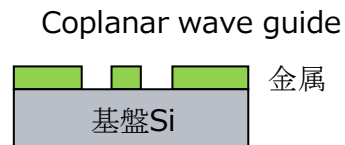
本発表

MKIDsの構造・動作

MKIDsの動作原理

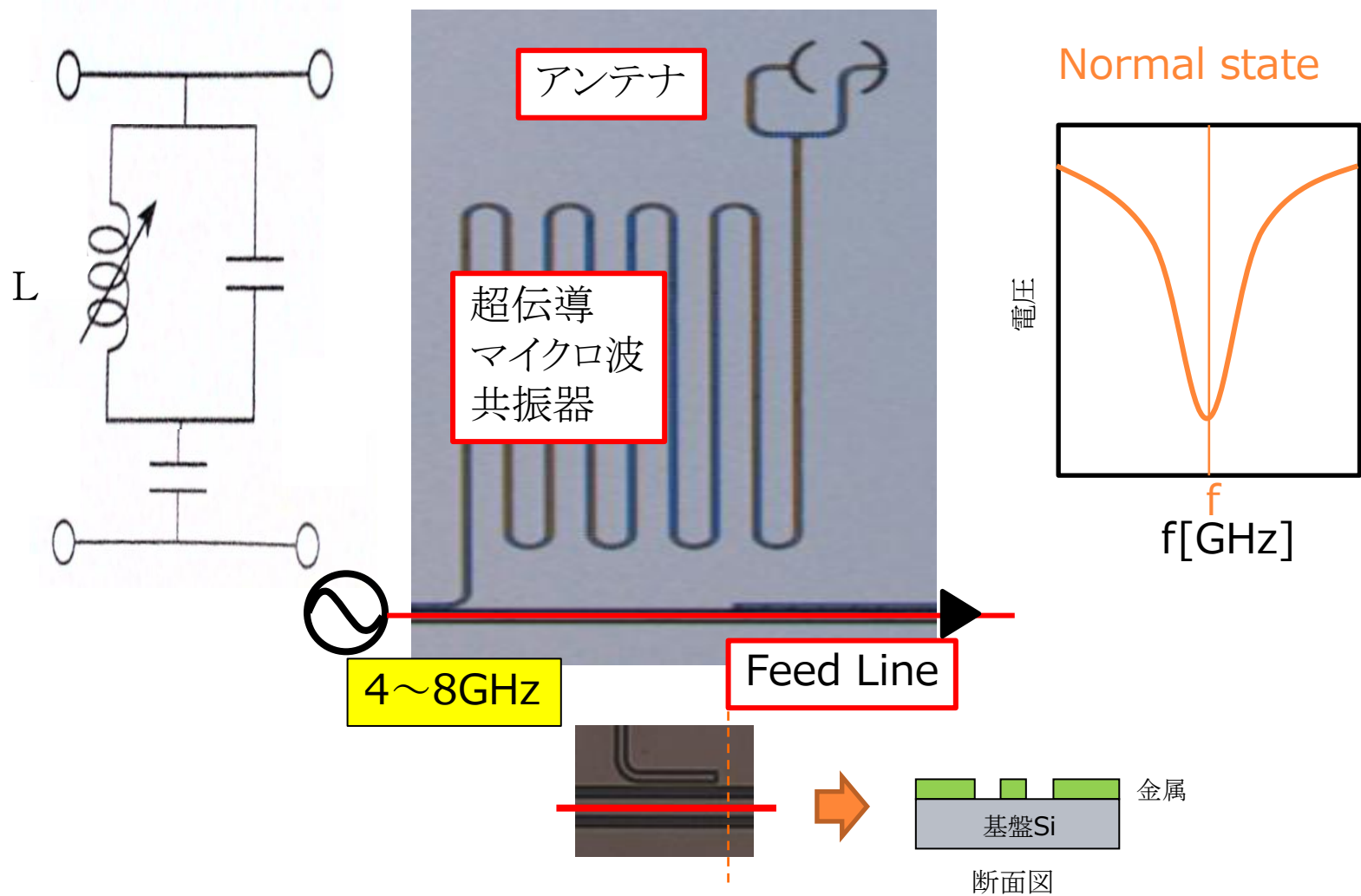


切断面

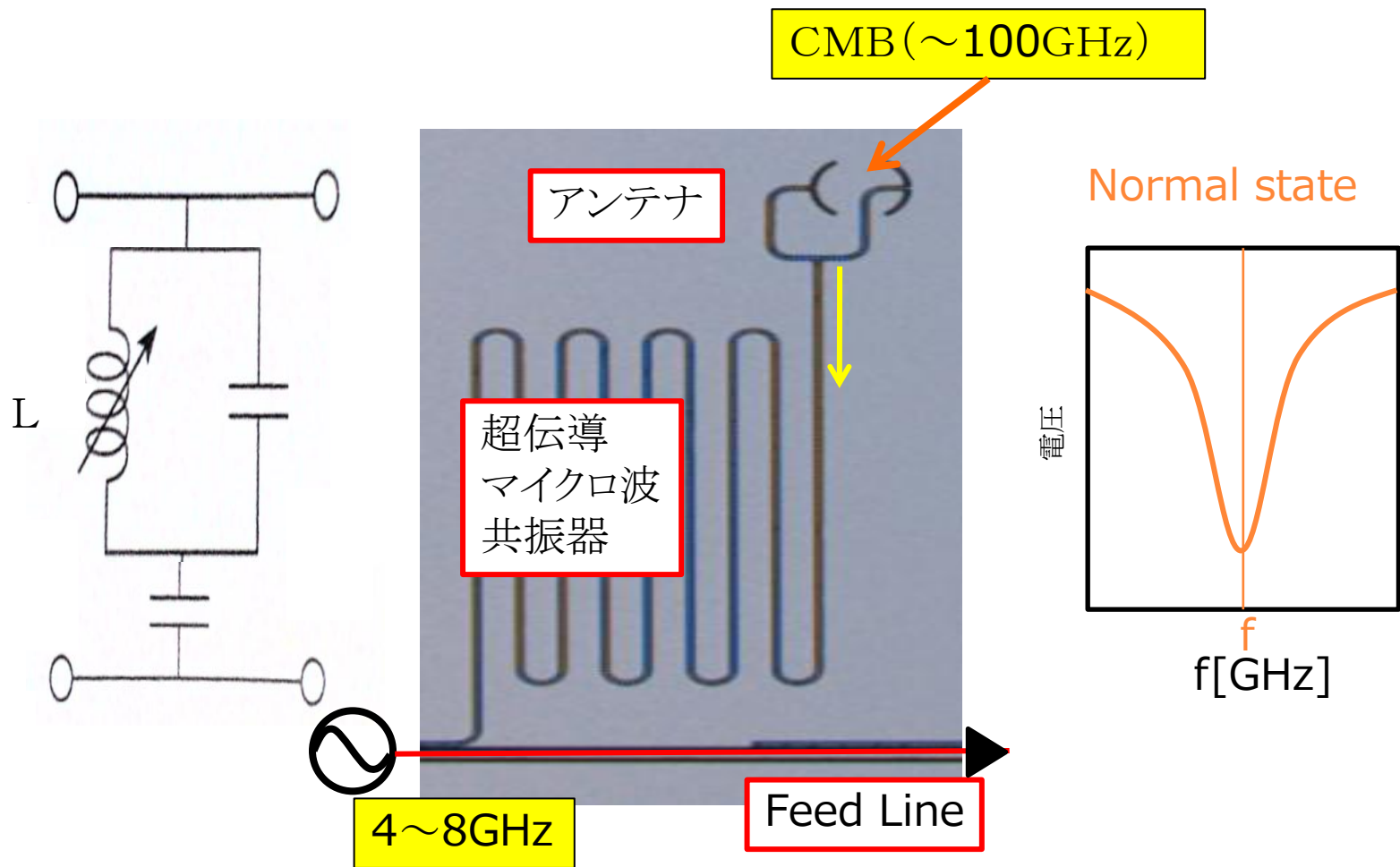


断面図

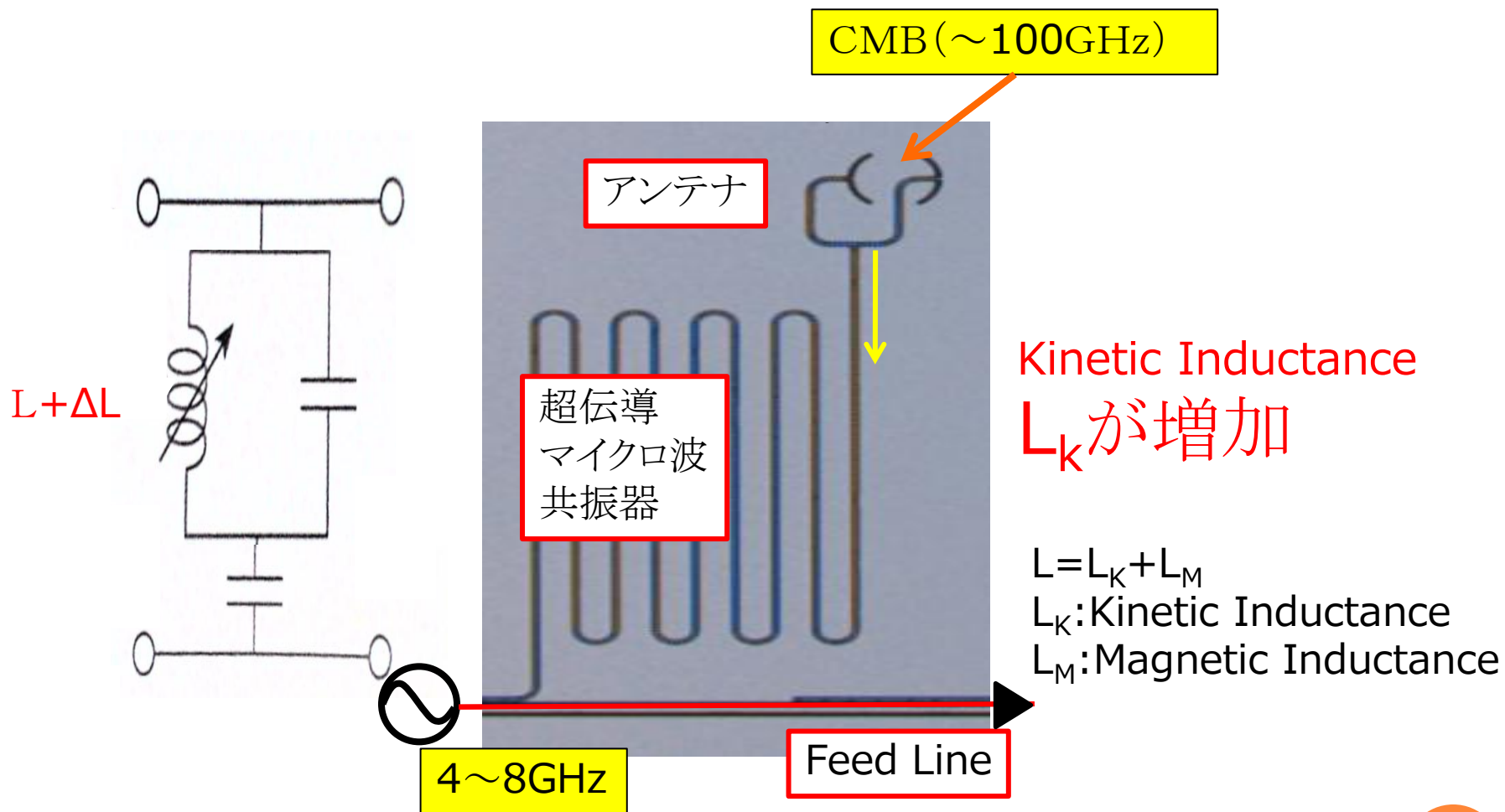
MKIDSの動作原理



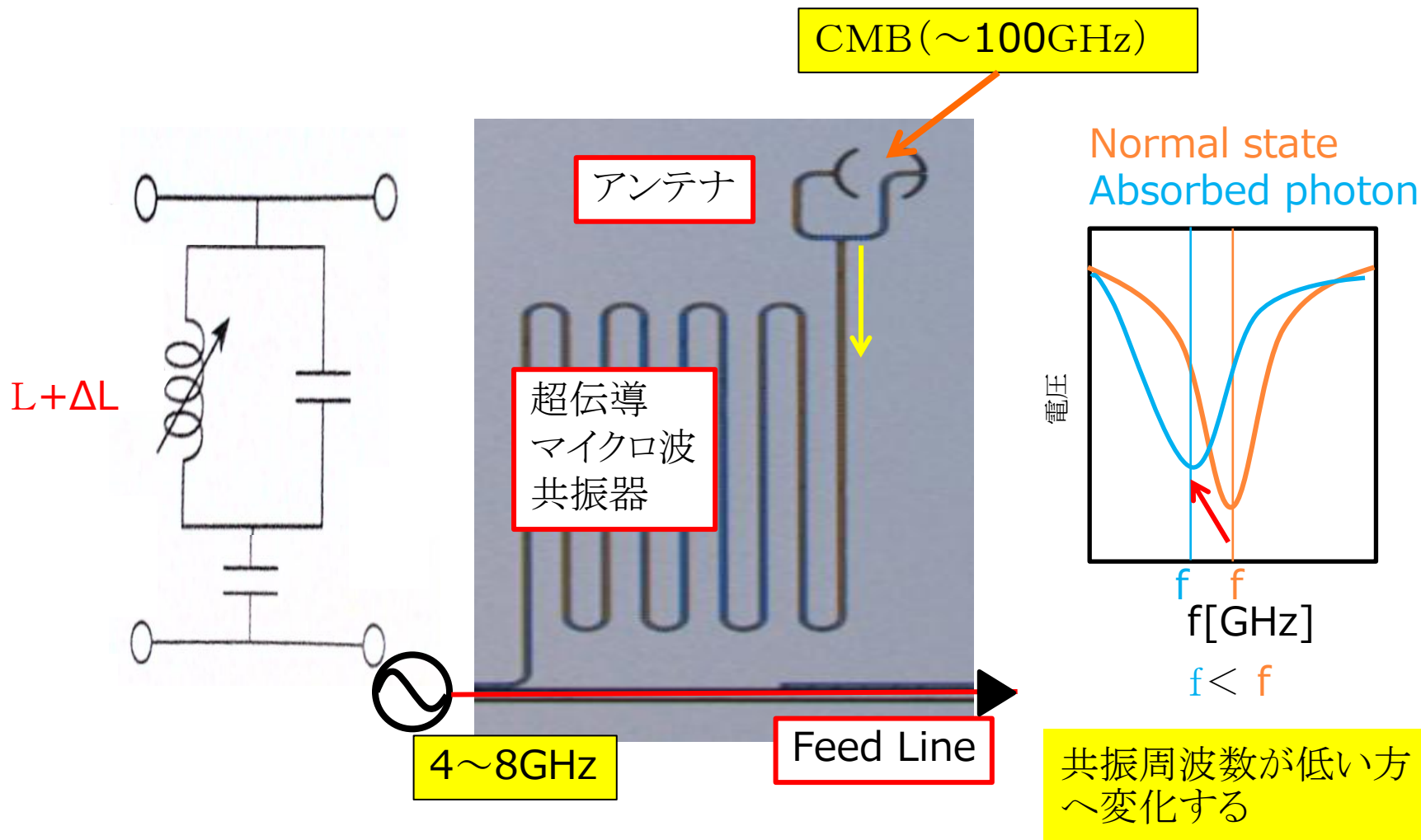
MKIDsの動作原理



MKIDsの動作原理

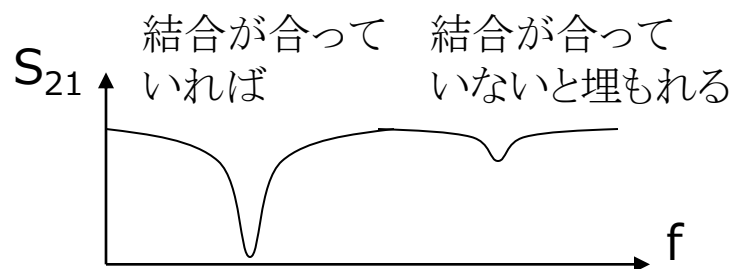
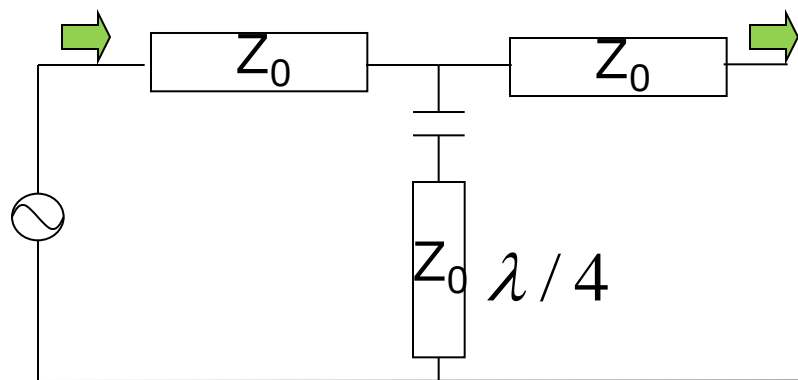


MKIDSの動作原理

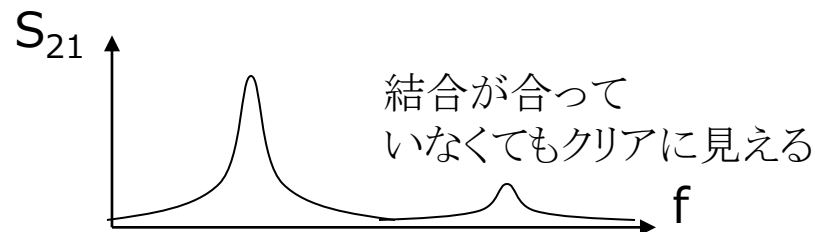
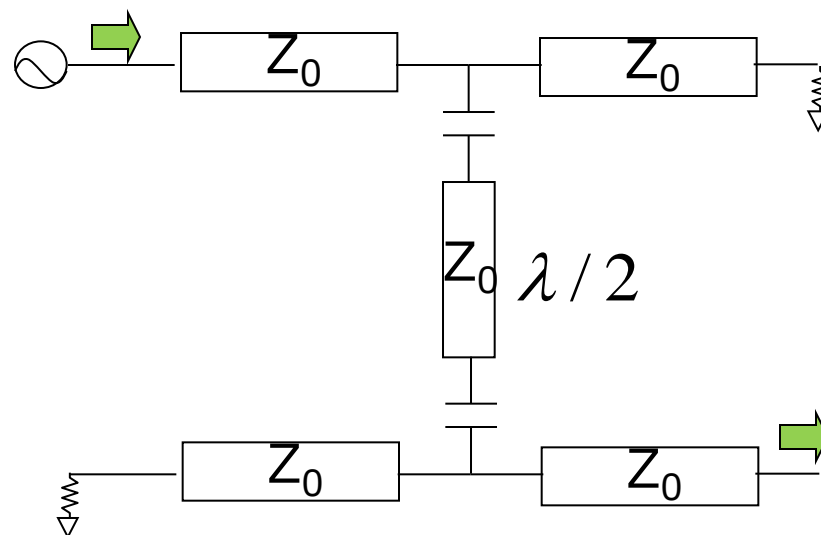


MKIDSの種類: 吸収型、透過型

吸収型: 従来型5-10ページ



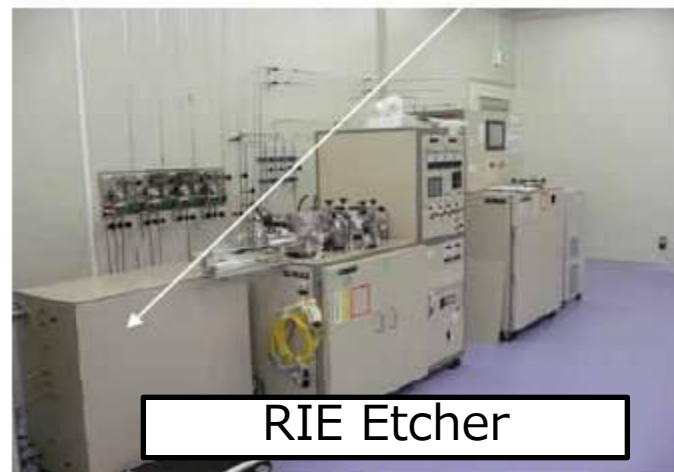
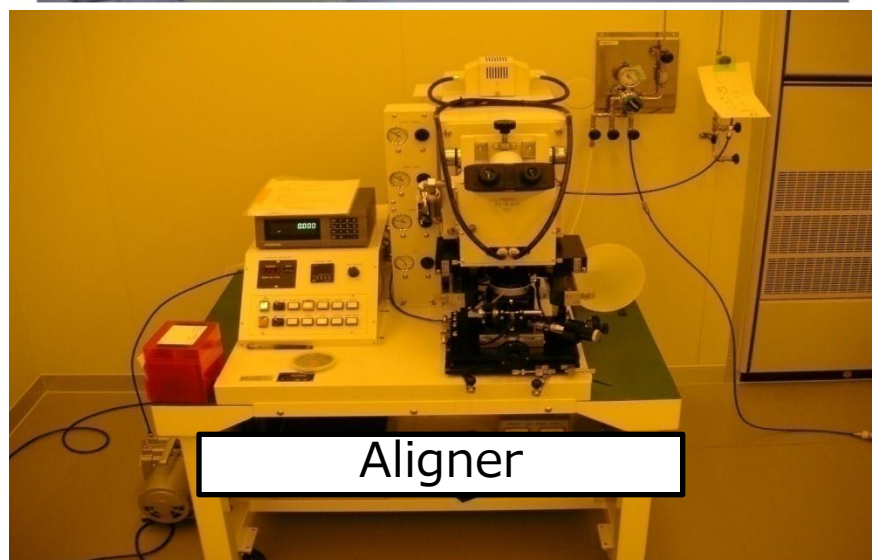
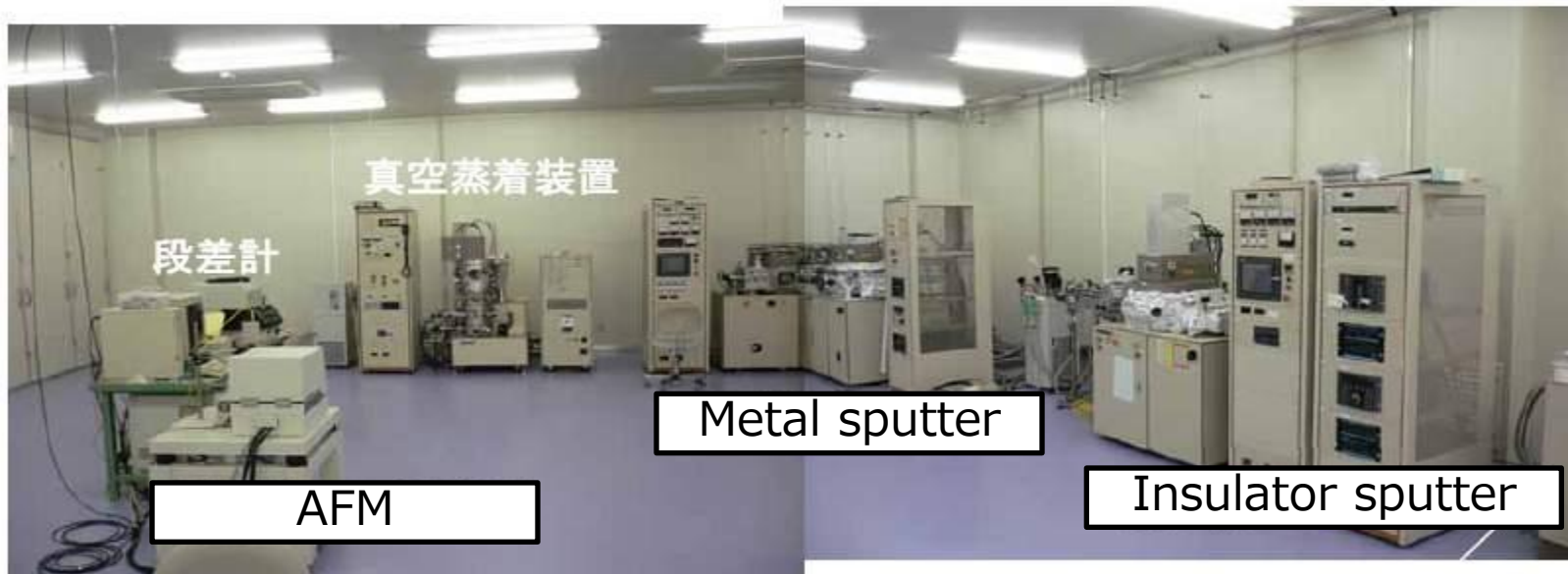
透過型: 本発表



- 結合が不足でもクリアに測定可能
- 位相検出の場合RFの振幅変動に依存しない
- 位相フィードバックによる読み出しが可能 ⇒ 岐部さんの発表

MKIDSsの作製

KEKの超伝導検出器開発装置



製作の様子@KEK



本発表の本題

超高感度: NEP $\sim 10^{-18} \text{W}/\sqrt{\text{Hz}}$
達成に向けて

MKIDSのNEP

NEP : Noise Equivalent Power

検出器で検出可能な最小の入力パワー

↔ S/N = 1 となる入力パワー

$$NEP = \left(\sqrt{S_{\theta}(f)} \left(\frac{\delta\theta}{\delta N_{qp}} \frac{\eta\tau_r}{\Delta} \right)^{-1} \sqrt{1 + (2\pi f\tau_r)^2} \sqrt{1 + (2\pi f\tau_{res})^2} \right)$$

雑音
ノイズスペクトル

τ_r : recombination time

τ_{res} : resonator response time

Δ : superconducting energy

η : absorption efficiency

Material: Al
f ~ 6GHz
T << Tc

$$\frac{\delta\theta}{\delta N_{qp}} = 1.63 \times 10^{-7} \frac{\alpha Q}{V}$$

感度

α : L_K/L_{tot}

Q : Q値

V : 体積

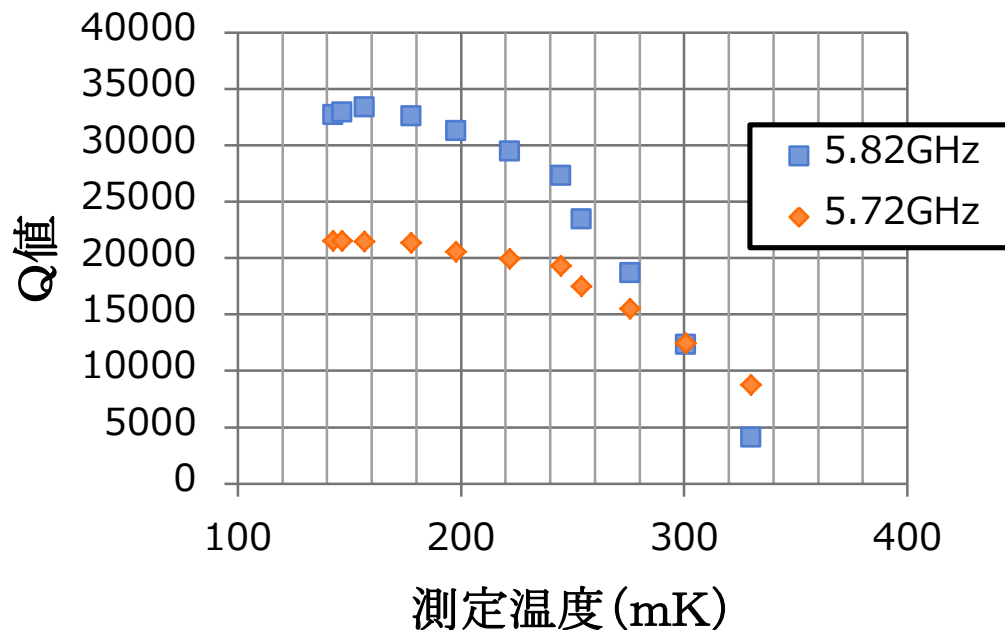
Benjamin A. Mazin, "Microwave Kinetic Inductance Detectors" 2004

NEPをよくするためには高いQ値が重要

Q ~ 5 * 10^5 で NEP ~ 5 * 10^(-18) @ SRON 100mK

前学会での報告

スパッターを使用してRIEでエッチングをし、作成を行ったAI-MKIDsのQ値



測定温度が低くなるにつれてQ値の上昇がみられた。

しかし、140mKでのQ値はそれぞれ約23,000、約34,000と目標より一桁低い値となった

考えられる原因

- 共振器の金属による損失
アルミの純度、共振器外への電磁波の放射
- 構造による損失
フォトレジストの溶け残りによる損失など

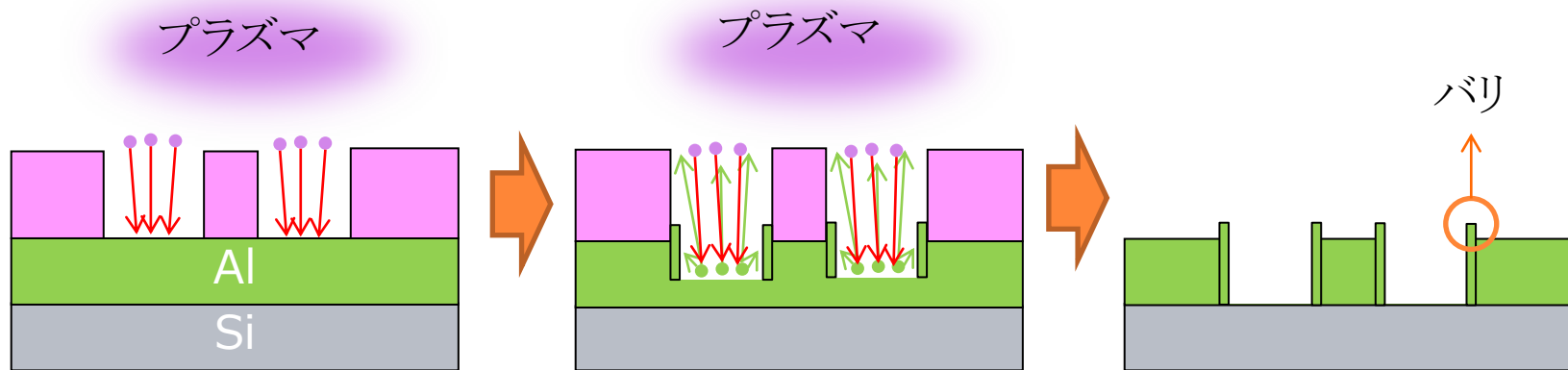
作製方法の変更点

	前回	今回
作成方法	RIEエッチング ⇒	リフトオフ
膜厚	150nm	⇒ 150nm, 500nm

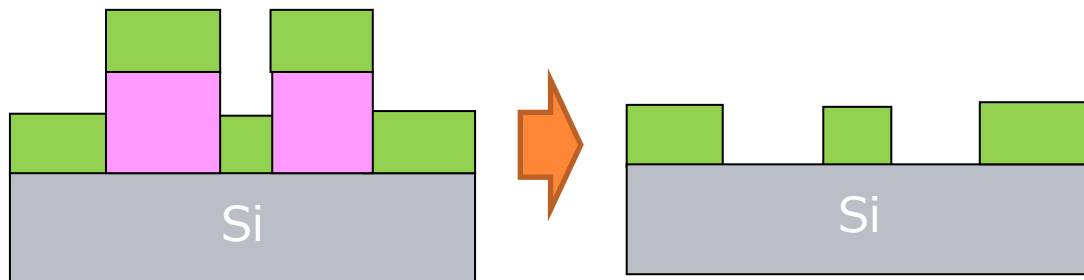
○ リフトオフ ⇒ 構造、汚れの改善

- RIEエッチングの場合、CPWの構造にバリのようなものが出る

RIEエッチングの場合



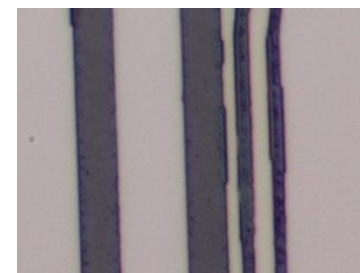
リフトオフの場合



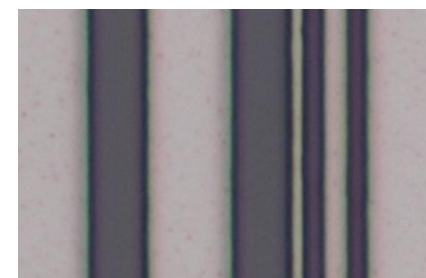
作製の変更点

	前回	今回
エッチング	RIEエッチング ⇒	リフトオフ
膜厚	150nm ⇒	150nm, 500nm

- エッチング ⇒ 汚れ、構造の改善
 - CPWの構造にバリのようなものが出る
 - リフトオフにより改善
 - RIEエッチングによるフォトレジストの焦げ付きを改善
- 膜厚 ⇒ 共振器外への電磁波の放射の抑制



RIEエッチングの例
改善前

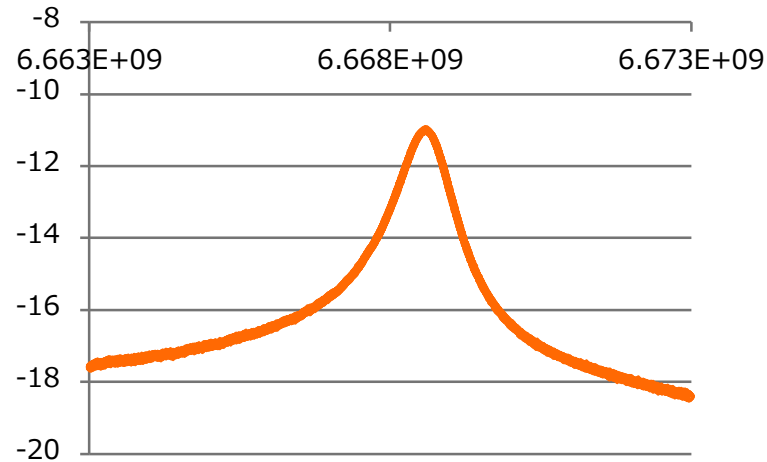


リフトオフの例
改善後

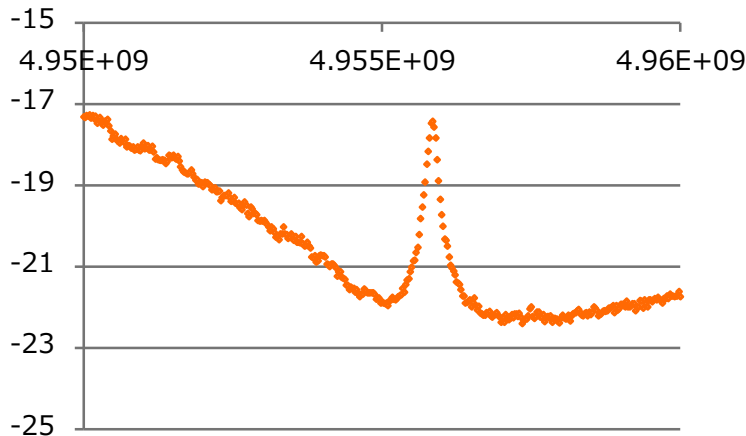
測定結果: Q値の比較

0.3KでのエッチングとリフトオフのQ値

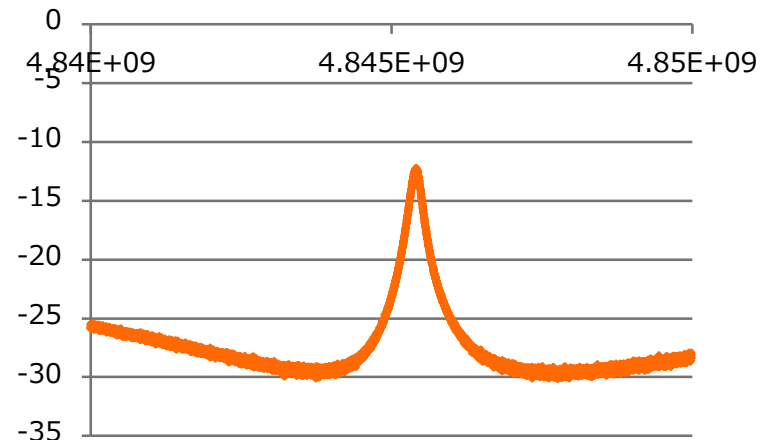
Material: Al



前学会時: エッチング、150nm Q~5,000

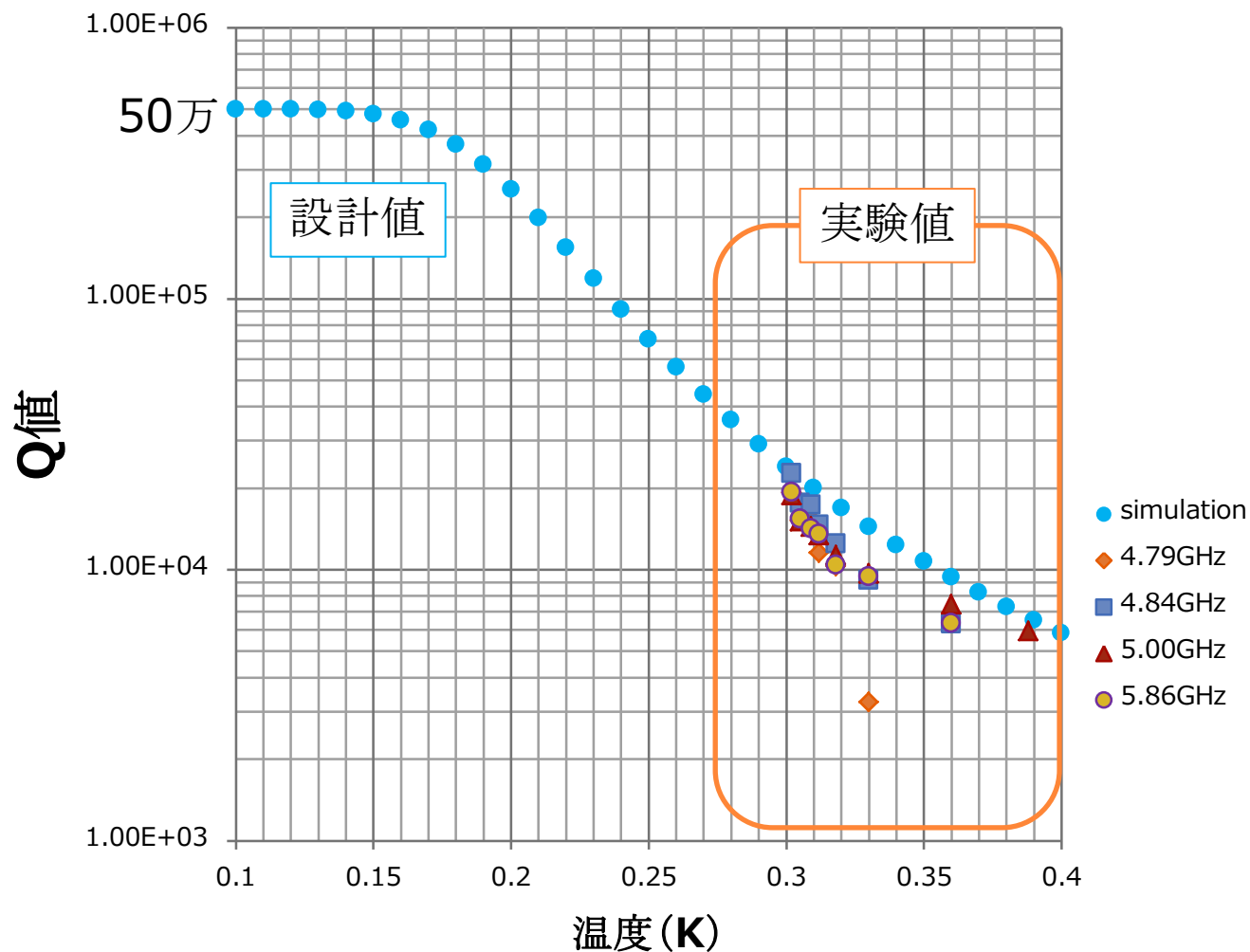


リフトオフ、150nm Q~11,000



リフトオフ、500nm Q~22,000

測定結果: Q値の温度依存性 @0.3K付近



100mKでの測定を行うことで、さらなるQ値の上昇が見込まれる

まとめ・今後の予定

○ まとめ

- 高感度化に向けて
 - 作製方法を変更してAl-MKIDsを作成
 - Q値 $\sim 2 \times 10^4$ @0.3Kの作製に成功
 - さらに低温での測定を行い、目標のQ $\sim 10^5$ を目指す

○ 今後の予定・課題

- 100mKでのAl-MKIDsの測定
- 多色化に向けたデザインの作成・評価

BACK UP

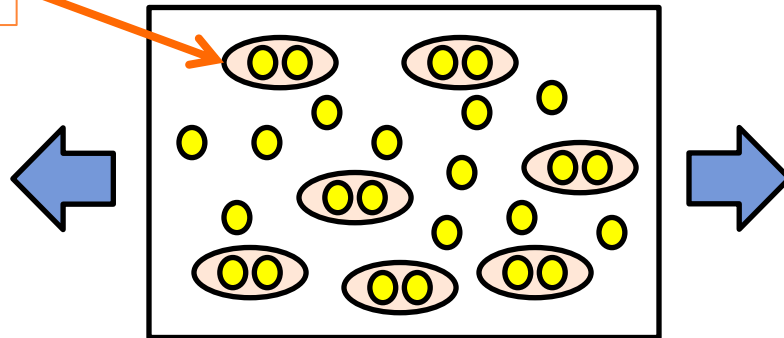
MKIDsの原理

○ MKIDs(Microwave Kinetic Inductance Detectors)

- 超伝導状態の金属を常時電氣的に揺らす。
 - ↓
- 入射photonが超伝導体のCooper pairを解離させ、準粒子が増加する。
 - ↓
- 超伝導の表面インピーダンスが変化
 - ↓
- Kinetic Inductanceが変化

$$\frac{\delta Z_s}{Z_s} = \frac{\delta n_{qp}}{2N_0\Delta}$$

Photon ● 共振周波数が変化→位相が変化→測定



●● Cooper pair
● 準粒子

$$\frac{\delta f}{f} = -\frac{\alpha\delta L}{2L} = -\frac{\alpha\delta\sigma_2}{6\sigma_2}$$

$$\frac{d\theta}{dN_{qp}} = \frac{2Q}{L} \frac{dL}{dN_{qp}} = \frac{2Q}{\sigma_2} \frac{d\sigma_2}{dN_{qp}}$$

NEP : Noise Equivalent Power

○ NEP

- 検出器で検出可能な最小の入力パワー
↳ $S/N = 1$ となる入力パワー

$$NEP = V_n / R \quad [W / Hz^{1/2}]$$

V_n : 雑音電圧

R : 感度 (V_{out}/P_{in})

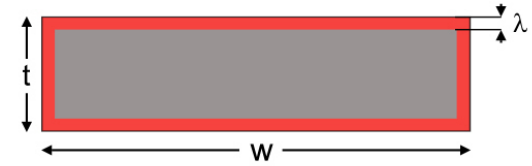
V_{out} : 出力電圧

P_{in} : 入力パワー

Impedance of a superconducting strip

$$t > 2\lambda$$

$$\frac{1}{2} L_K I^2 = \frac{\mu_0 I^2}{8W^2 \lambda^2} 2W\lambda \rightarrow L_K = \frac{1}{2} \frac{\mu_0 \lambda}{W}$$

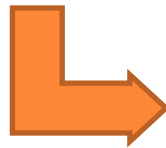


(a)

$$T \ll T_c$$

$$\sigma_{s2} \gg \sigma_{n1}$$

$$Z_s = L_K \omega \frac{\sigma_1 \sigma_2}{\sigma_1^2 + \sigma_2^2} + i\omega \frac{\mu_0 \lambda}{2} \coth\left(\frac{t}{2\lambda}\right)$$



$$Z_s \approx L_K \omega \frac{\sigma_{n1}}{\sigma_{s2}} + i\omega \frac{1}{2} \frac{\mu_0 \lambda}{W}$$

If Photon brake Cooper pairs

$n_s: \downarrow$ therefore $n_n: \uparrow$ $\sigma_{s2}: \downarrow$ $\sigma_{n1}: \uparrow$ $\lambda: \uparrow$ $L_K: \uparrow$

$$R_s: \uparrow \quad X_s: \uparrow$$



$$\text{Resonant Frequency : } \downarrow$$

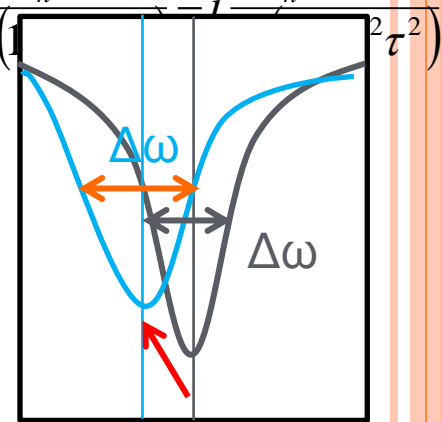
$$\text{Quality Factor : } \downarrow$$

Current flow (red square) No field penetrator (grey square)

Normal state

Absorbed photon

$$\sigma_n = \frac{n_n e^2 \tau}{m} = \frac{i n_n e^2 \omega \tau^2}{m}$$



f [GHz]

$\Delta\omega > \Delta\omega$

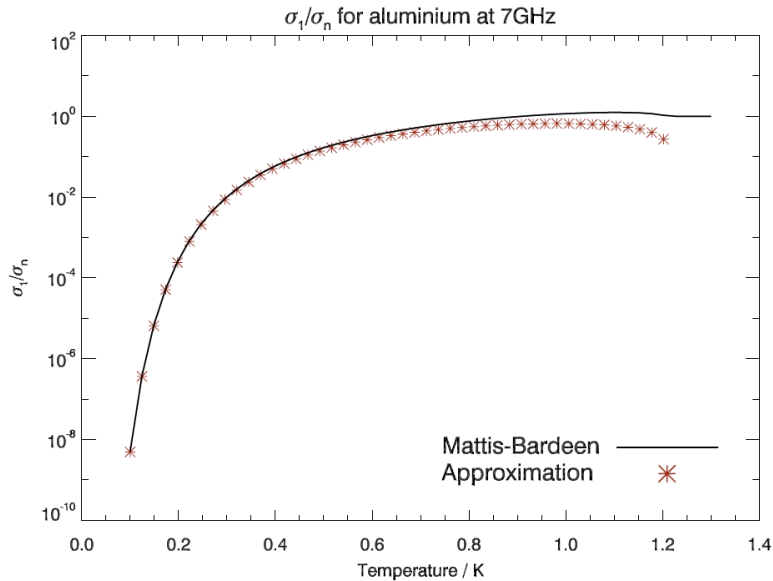
$f < f$



Mattis-Bardeen theory

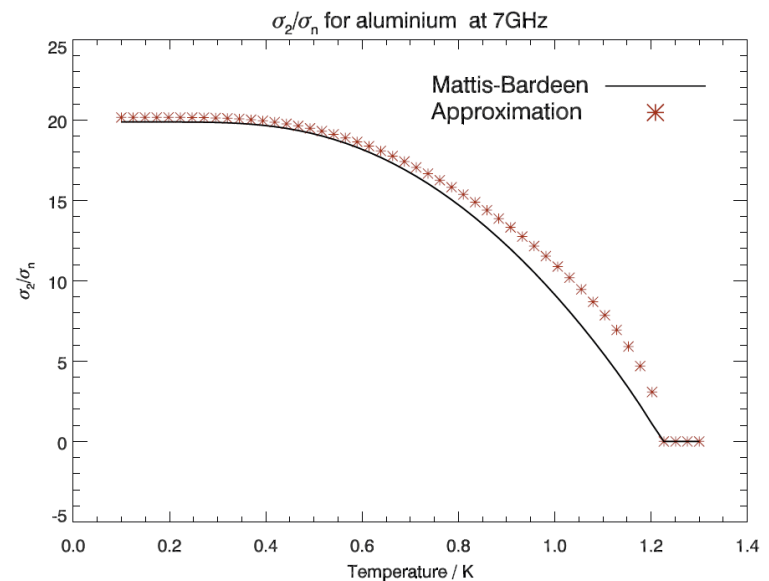
○ 実数項

- 常伝導電子



○ 虚数項

- 超伝導電子

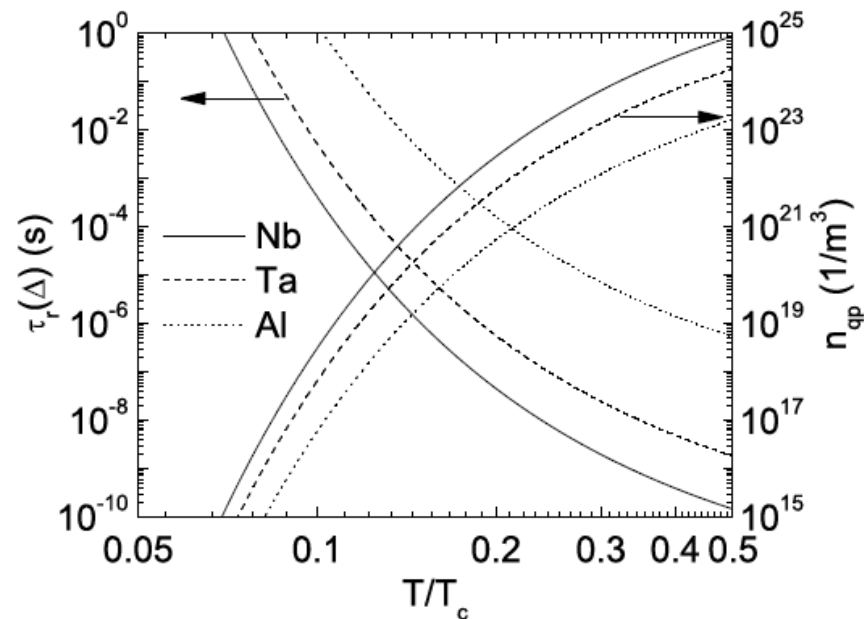


The Density of thermally-excited quasiparticles

$$n_{qp}(T) = 2N_0 \sqrt{2\pi k_B T \Delta(0)} \exp(-\Delta(0)/k_B T)$$

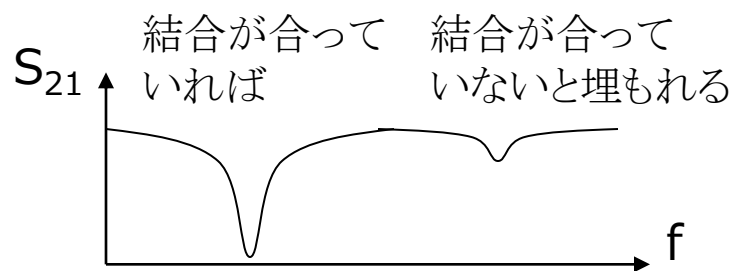
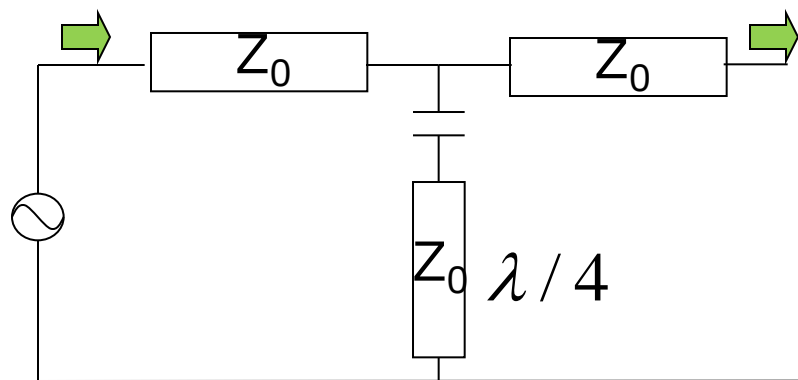
Quasiparticle Life Time

$$\frac{1}{\tau_{qp}} = \frac{\pi^{1/2}}{\tau_0} \left(\frac{2\Delta}{k_B T_c} \right)^{5/2} \left(\frac{T}{T_c} \right)^{1/2} \exp(-\Delta/k_B T)$$

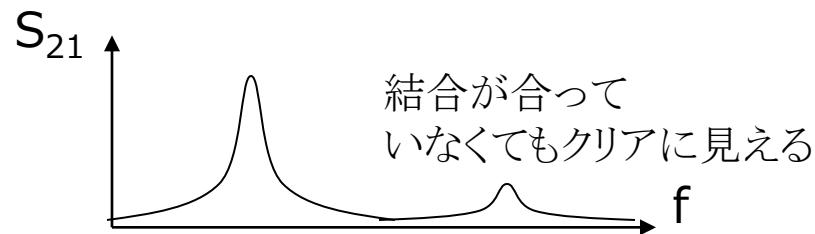
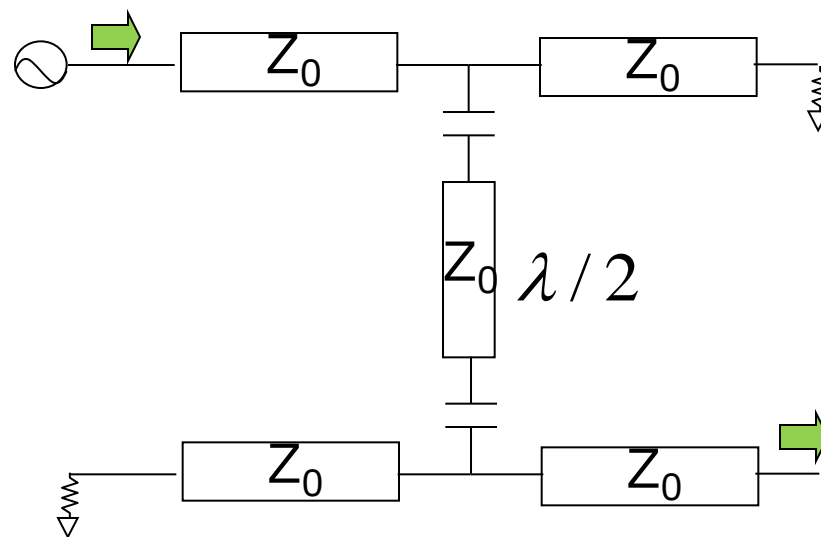


等価回路: 吸収型、透過型 MKIDS

吸収型

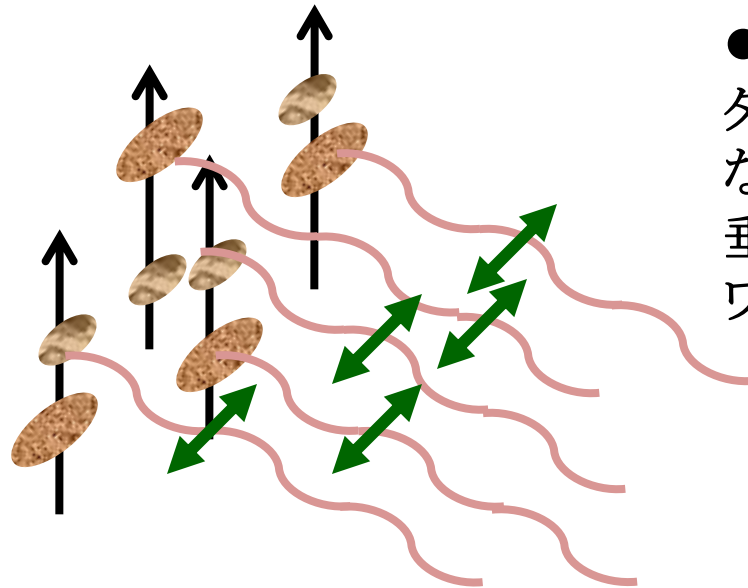


透過型



- 結合が不足でもクリアに測定可能
- 位相検出の場合RFの振幅変動に依存しない

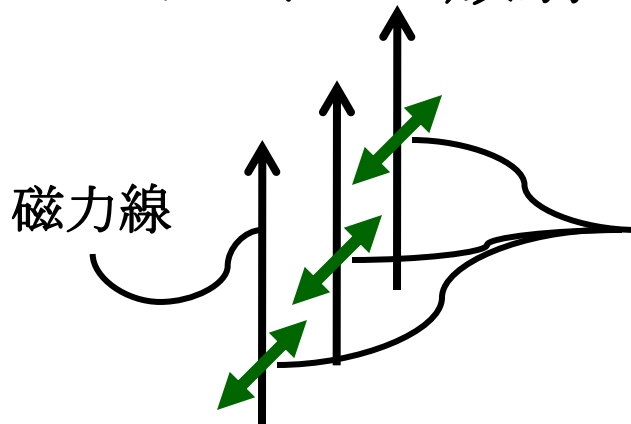
ダストからの放射が偏光する機構はどのようなものか？



●エネルギー的に安定なため、ダストは長軸が磁力線と垂直になるように整列する。＝磁力線に垂直方向にワイヤーが張られたワイヤーグリッドが置かれた状態と等価

●ダストからの熱放射は、ダストの長軸に沿った方向
≈磁力線に垂直方向に偏光する。

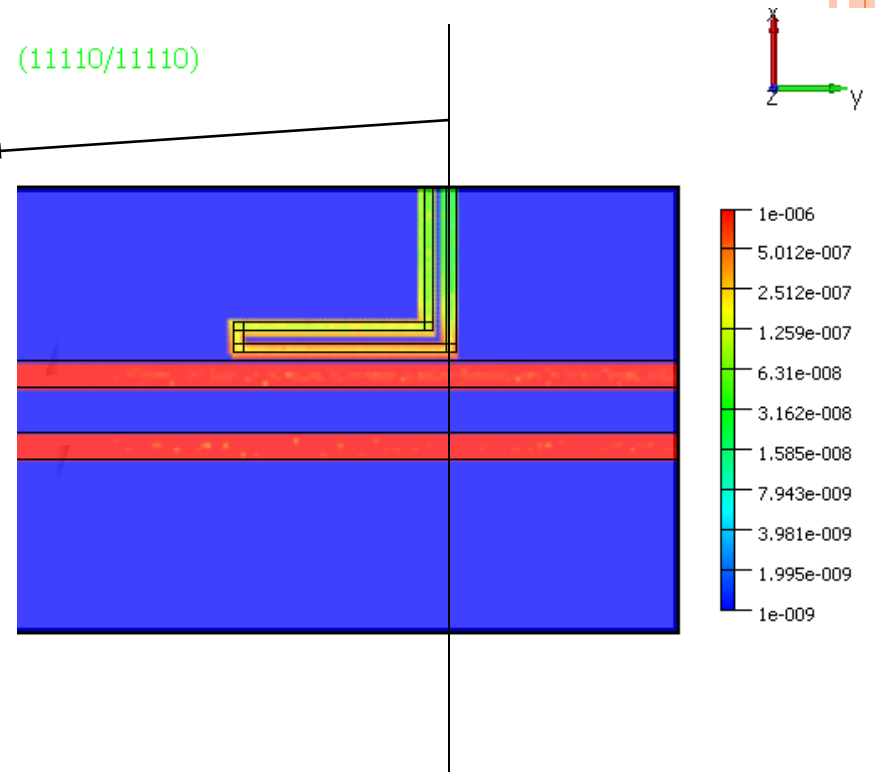
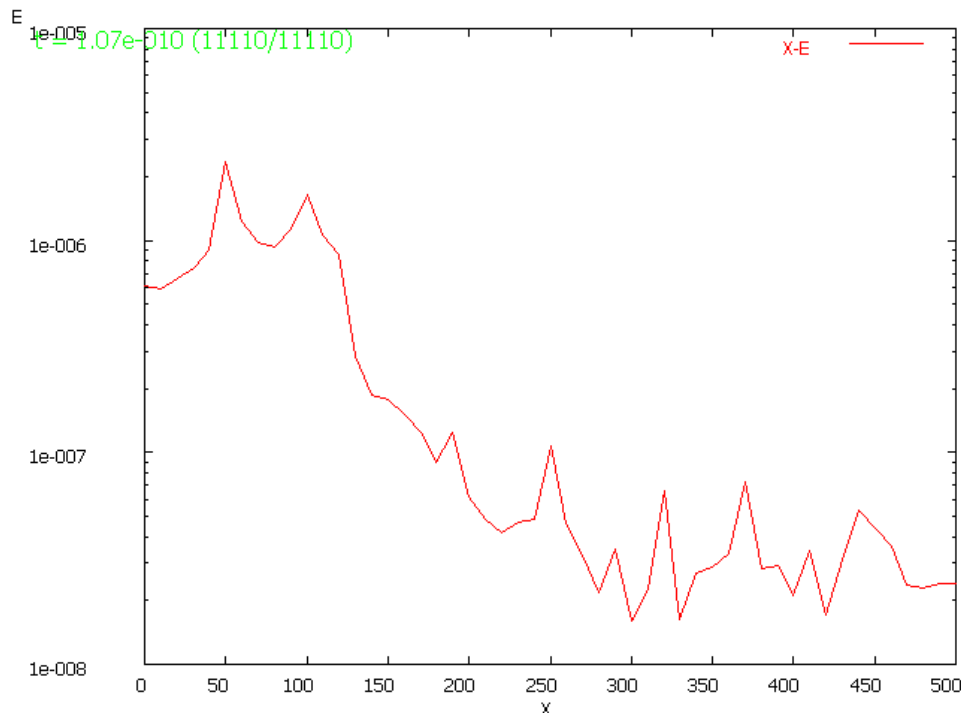
シンクロトロン放射の偏光の様子



シンクロトロン放射の偏光状態
磁力線に垂直方向の直線偏光



常伝導の S_{13}



$$S_{13} \sim 0.02$$

$$\downarrow$$

$$Q = \pi/2/S_{13}^2 \sim 4000$$

超伝導体の選択

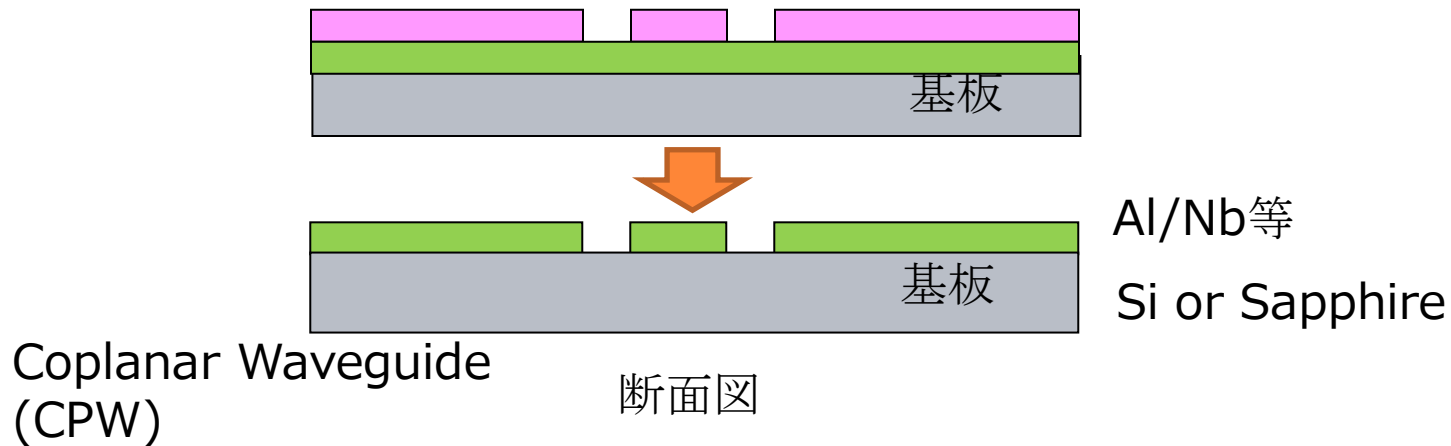
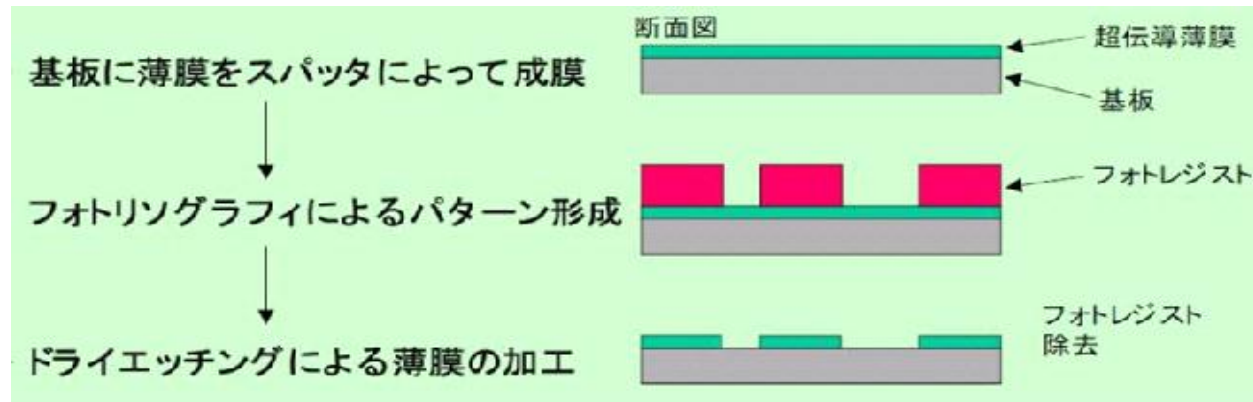
エネルギーギャップ 2Δ (0Kのとき)と超伝導転移温度 T_c の関係式

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

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]
Nb	9.23	3.1	750
Al	1.196	0.34	80

0.3 K の冷凍機ではAlの $T_c/4$ 程度なのでQが低い
→ 共振器の性能は Nb で評価
→ Alでミリ波に対する感度を評価

MKIDsの作成・Al(50nm)、Nb(200nm)



0.3 K の冷凍機ではAlの超伝導転移温度の1/4程度なのでQが低い
Nb:共振器の性能、原理検証
Al:CMBに最適な超伝導ギャップ(80GHz)を持っている
→ミリ波に対する感度を評価

ミリ波の照射からのNEP算出

$$\frac{\delta Z_s}{Z_s} = \frac{\delta n_{qp}}{2N_0\Delta} = \frac{\tau_{qp} \eta P_{photon} / h\nu}{2N_0V\Delta}$$

$$\tau_{qp} = \frac{2N_0V\Delta \delta f / f}{\eta P_{photon} / h\nu}$$

$$= \frac{2 \times 1.72 \times 10^{10} [\mu m^{-3} eV^{-1}] \times 4000 [\mu m^3] \times 1.8 \times 10^{-4} [eV] \times 3.5 [MHz] / 5200 [MHz]}{0.57 \times 2.9 \times 10^{14} [photons / s]}$$

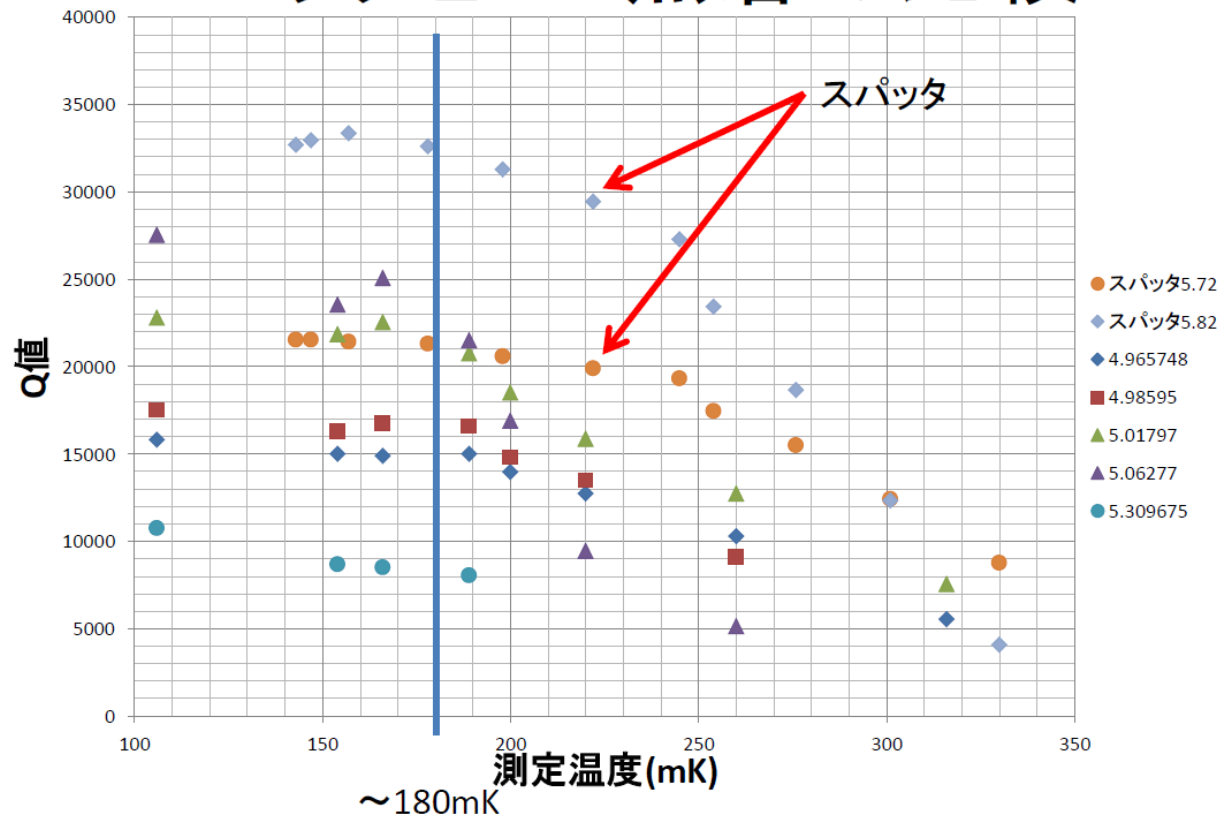
$$= 100 [ns]$$

$$\leftrightarrow \frac{1}{\tau_{qp}} = \frac{\sqrt{\pi}}{\tau_0} \left(\frac{2\Delta}{k_B T_c} \right)^{2.5} \sqrt{\frac{T}{T_c}} e^{-\frac{\Delta}{k_B T}} \rightarrow \tau_{qp} = 4.8 \mu s @ 0.38 K$$

$$NEP_{gr} = 2\Delta \sqrt{\frac{N_{eq}}{\tau_{qp}}} = 2 \times 10^{-14} [W / Hz^{1/2}]$$



スパッタとEB蒸着の比較



○ スパッタとEBはほぼ同等のQ値

- EBに使用したAIの純度がもともと悪かった可能性
- AIの純度よりもフォトレジストによる損失が支配的であるという可能性

MKIDsのノイズ限界

- 理想的には、準粒子のG-Rノイズ（生成消滅のPoissonノイズ）で決まる

$$NEP_{GR} = \frac{2\Delta}{\eta} \sqrt{\frac{N_{qp}}{\tau_{qp}}} \propto \exp\left(-\frac{\Delta}{kT}\right)$$

量子効率 η 準粒子数 N_{qp} 準粒子寿命 τ_{qp}

- 体積を小さくする(薄くする)
- 準粒子の寿命を長くする
- ギャップエネルギーは大きくする
- 温度は低くする