

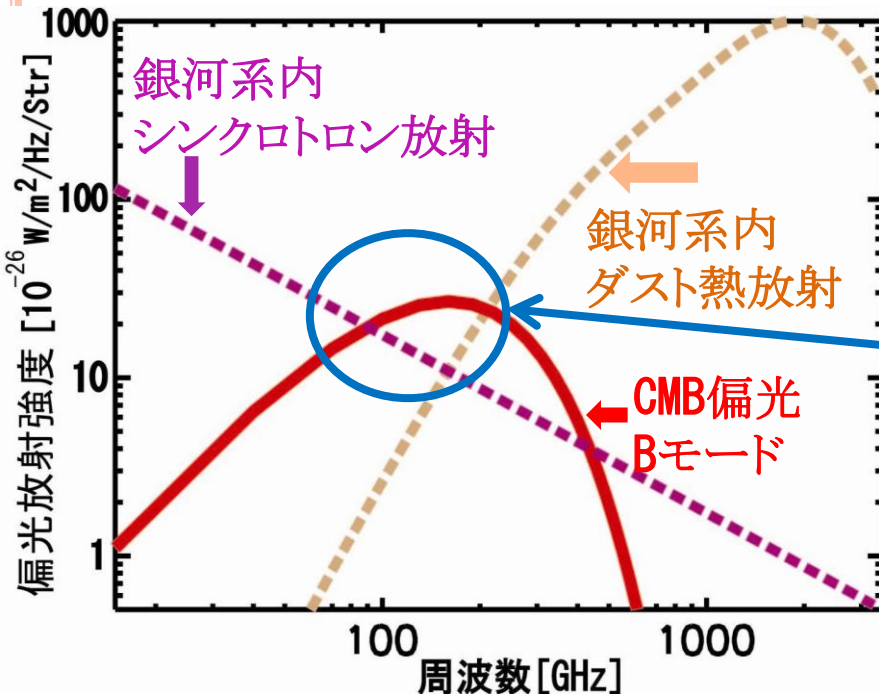
宇宙マイクロ波背景放射 (CMB) 偏光測定用 Microwave Kinetic Inductance Detectors(MKIDs)の開発

総研大、高工研^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、美馬覚^B、服部香里^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^K
EK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
- 作製・評価
- 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

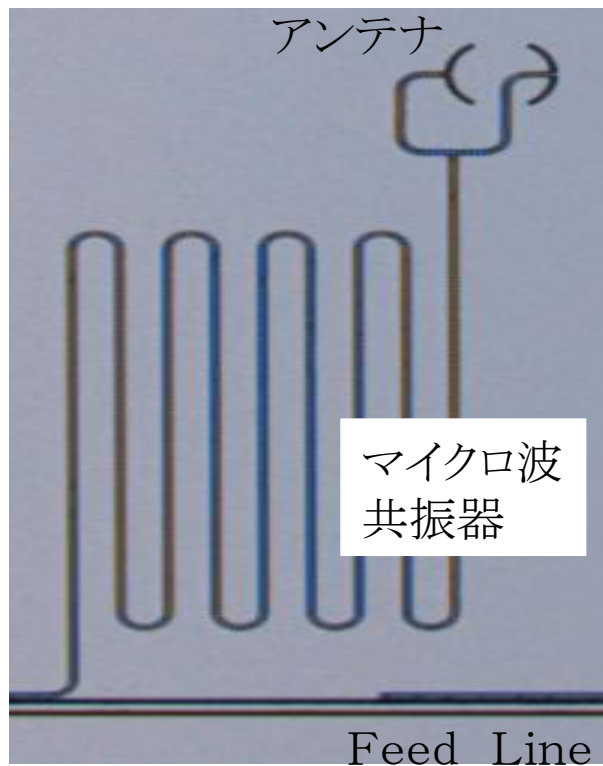
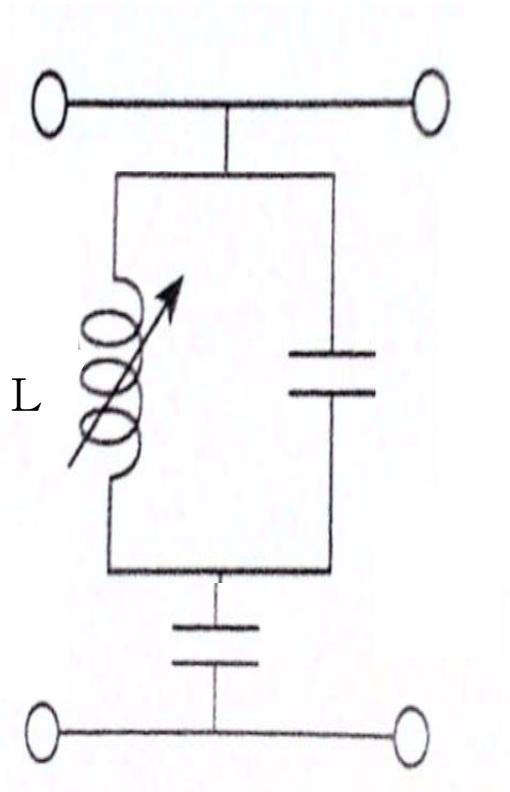
- 周波数: 60~250GHz
- 超高感度: $NEP 10^{-18}$ W/ $\sqrt{\text{Hz}}$
- 1000個以上のアレイ



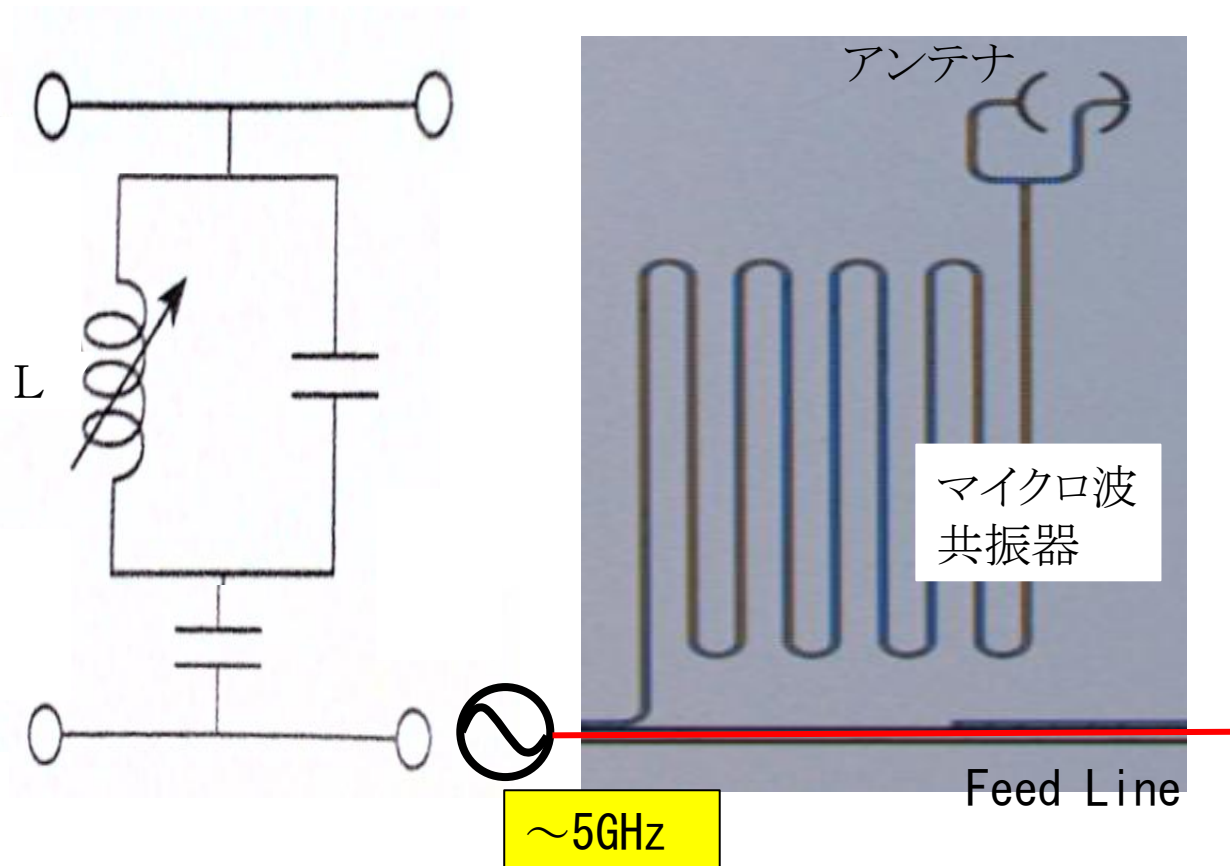
- 多素子化にとっても有利なMKIDsは、良い候補の一つである

MKIDSの構造・動作

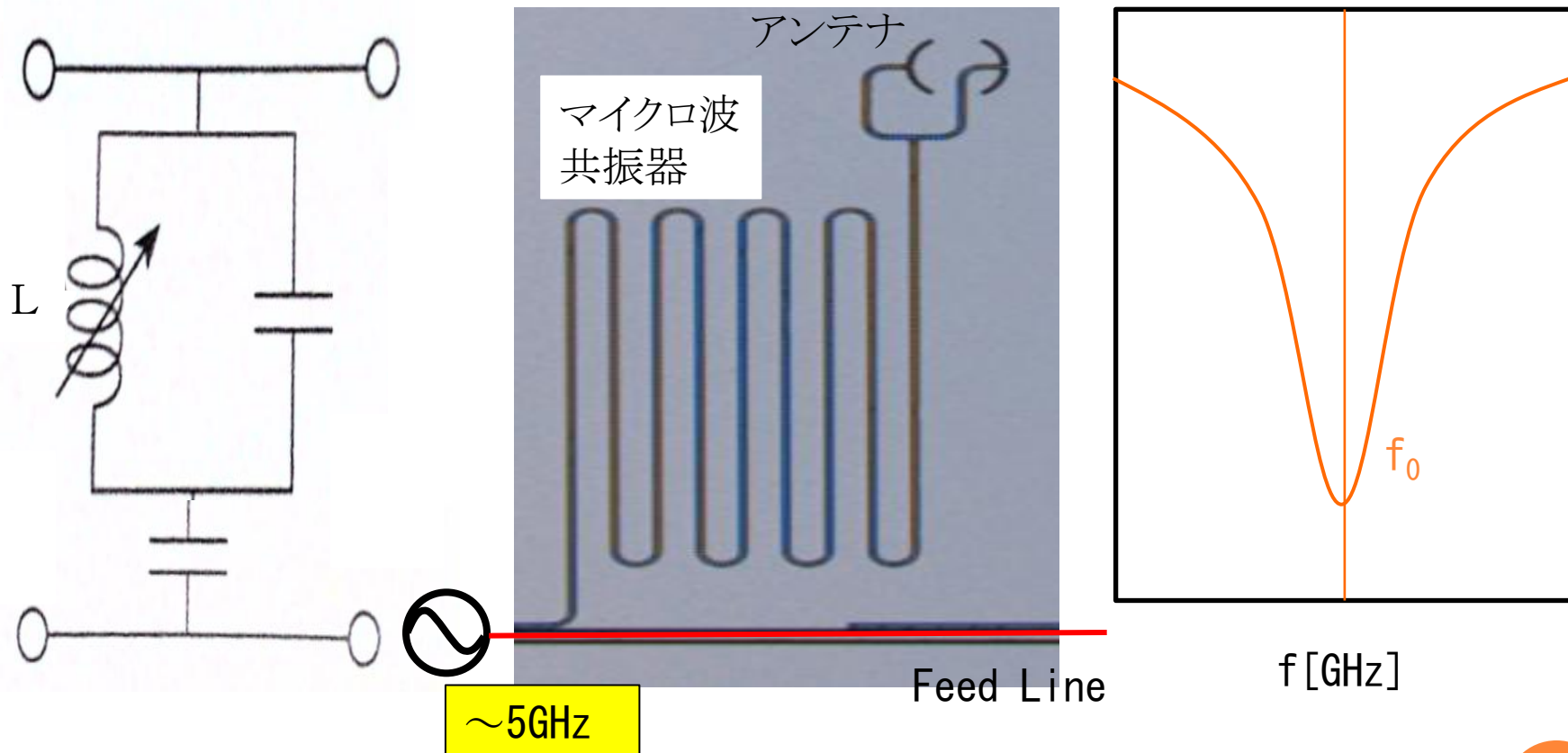
MKIDsの動作原理



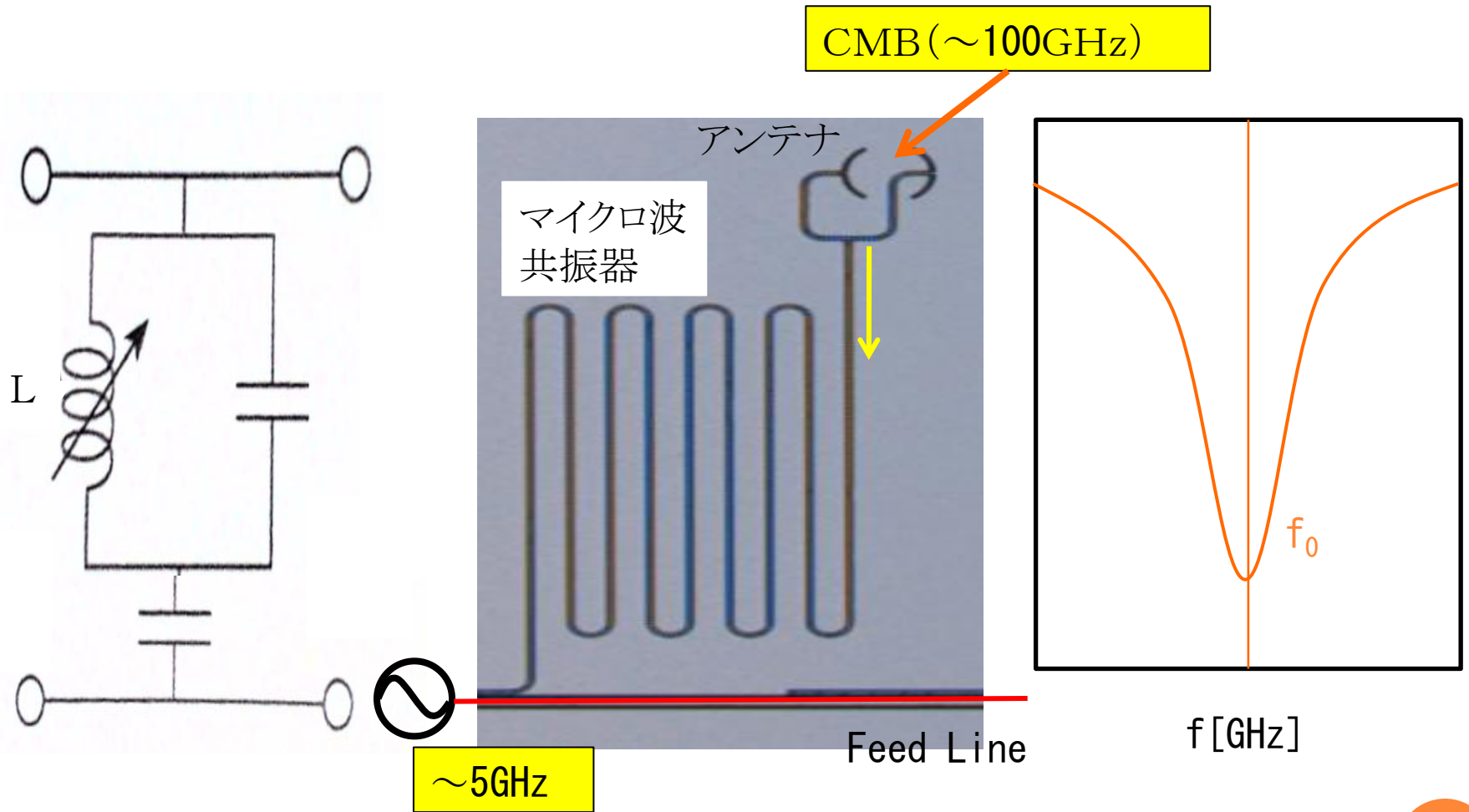
MKIDsの動作原理



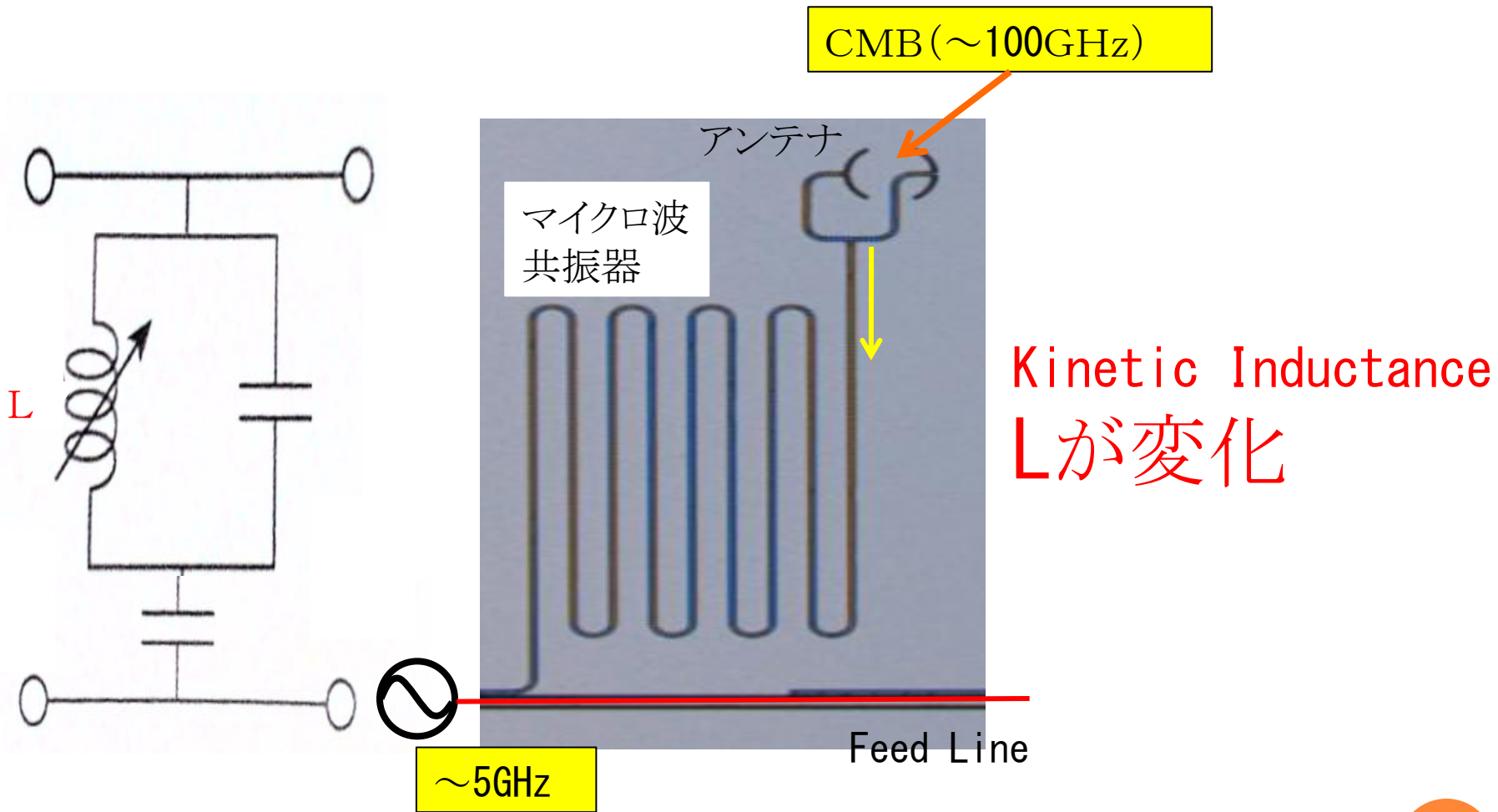
MKIDsの動作原理



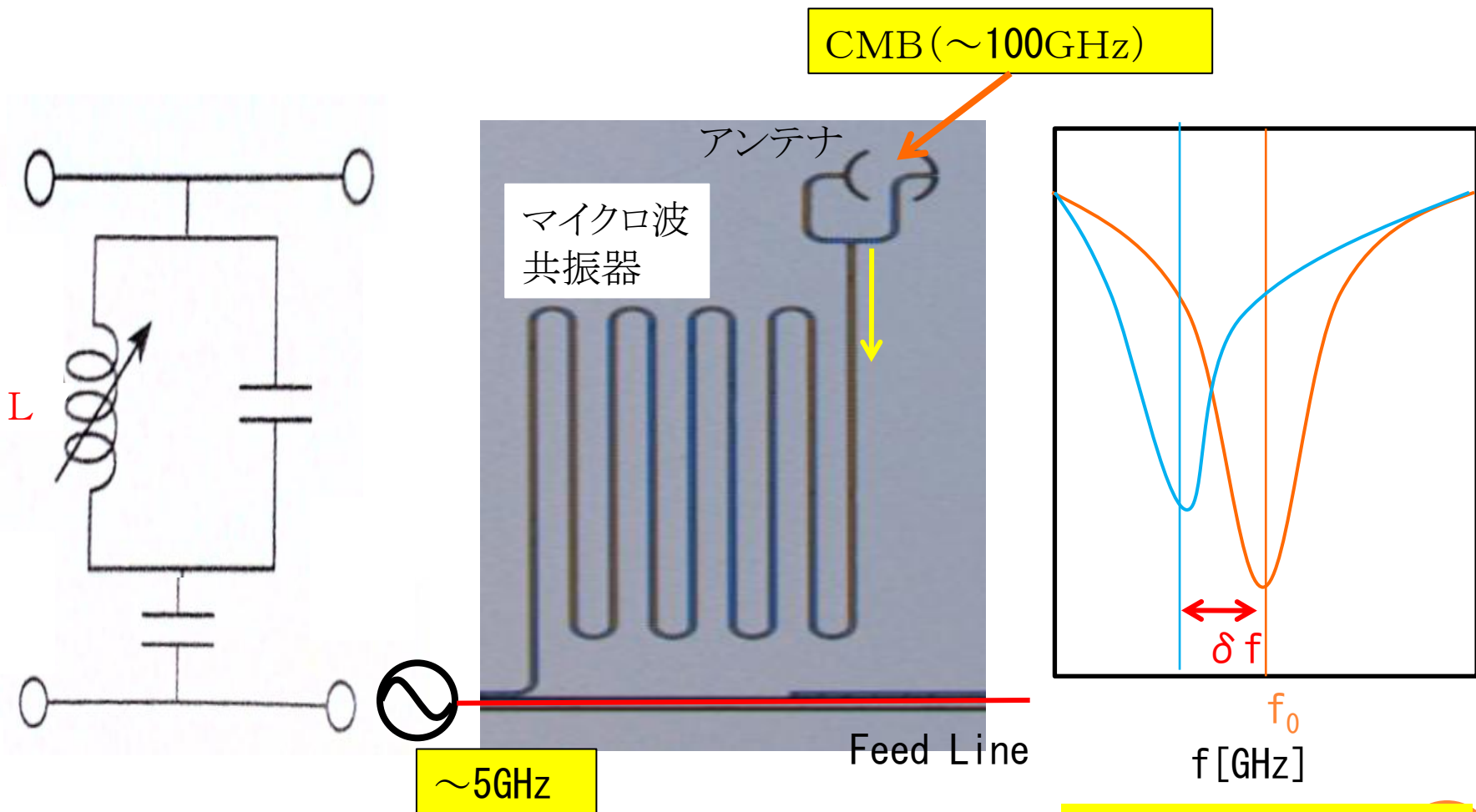
MKIDsの動作原理



MKIDsの動作原理



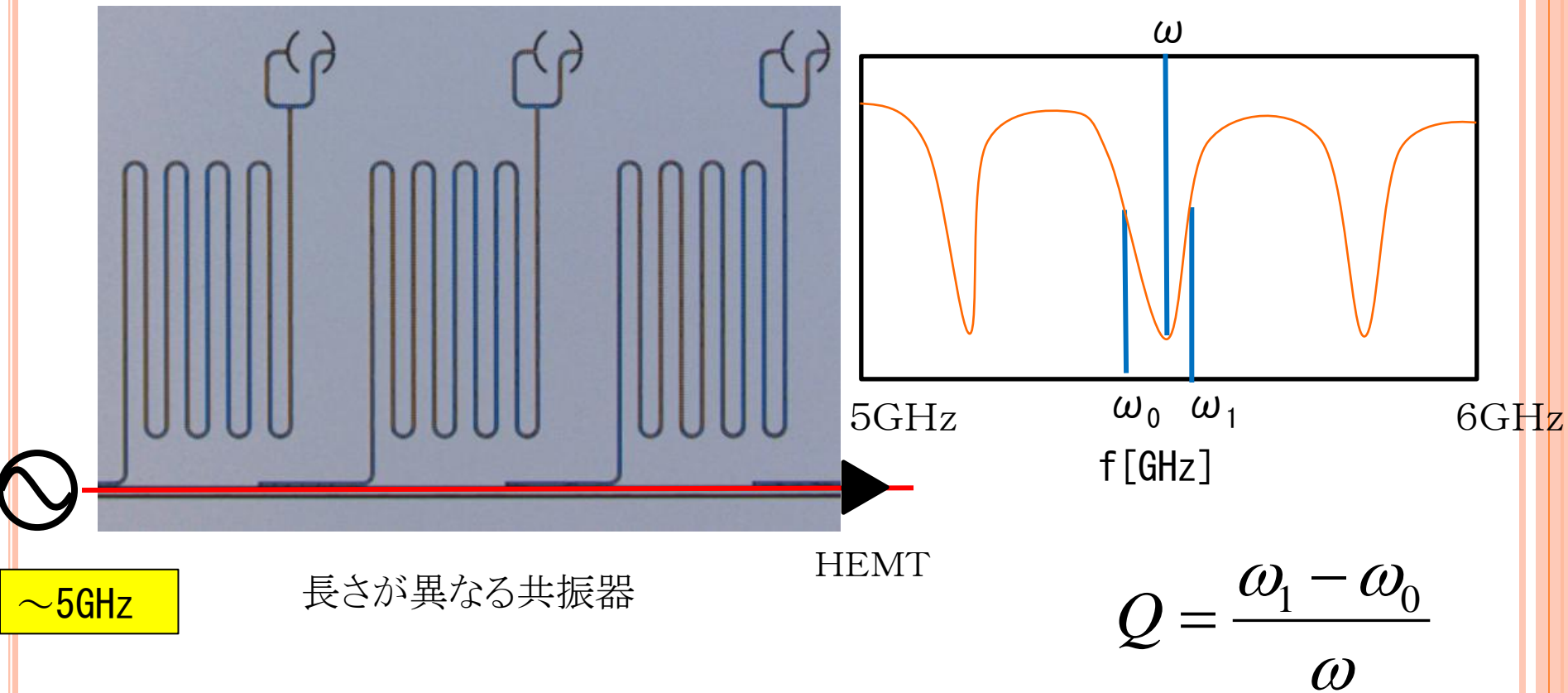
MKIDsの動作原理



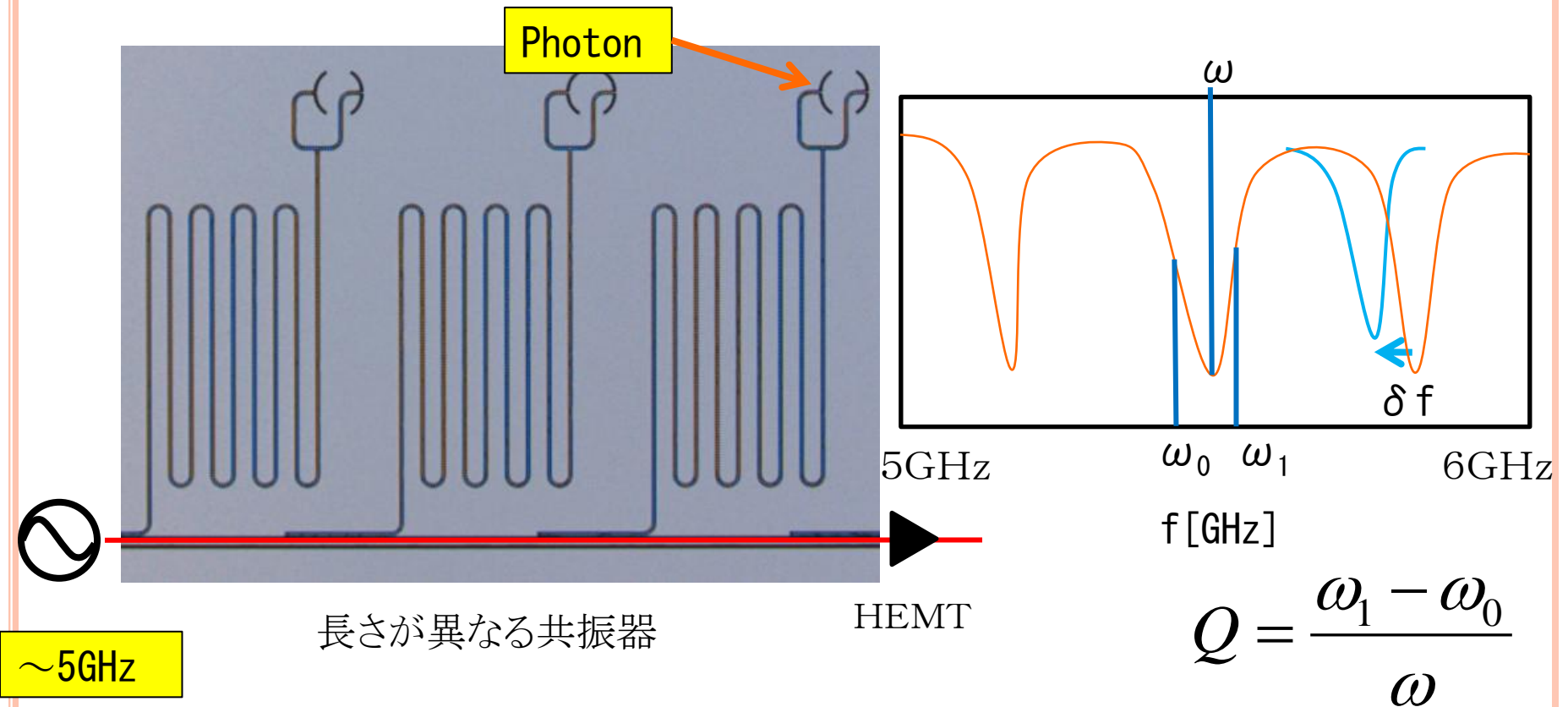
Benjamin A. Mazin, " Microwave Kinetic Inductance Detectors" 2004

共振周波数がずれる

マルチプレキシングの原理

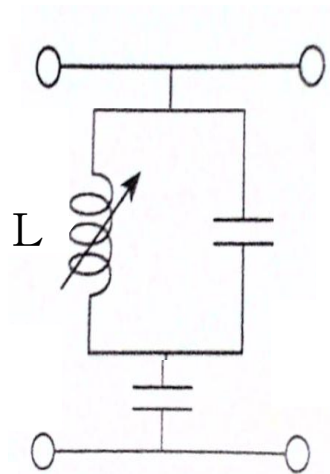


マルチプレキシングの原理

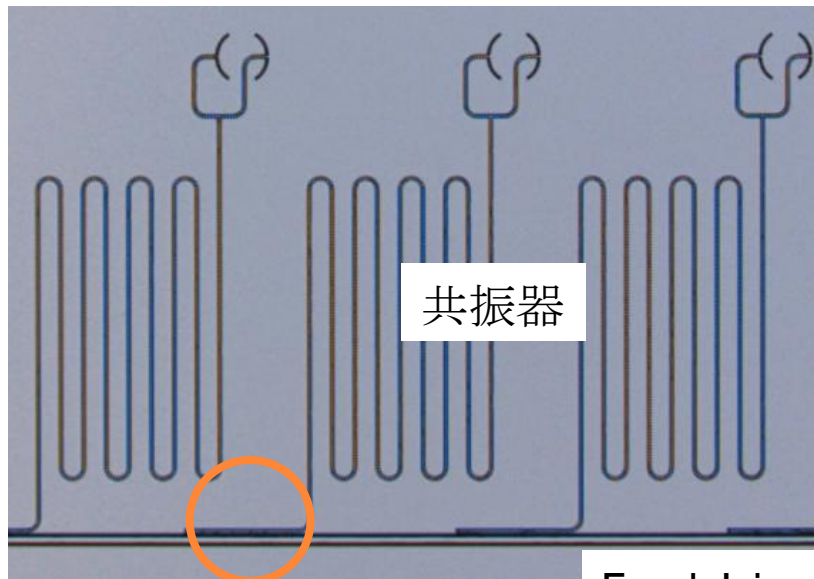
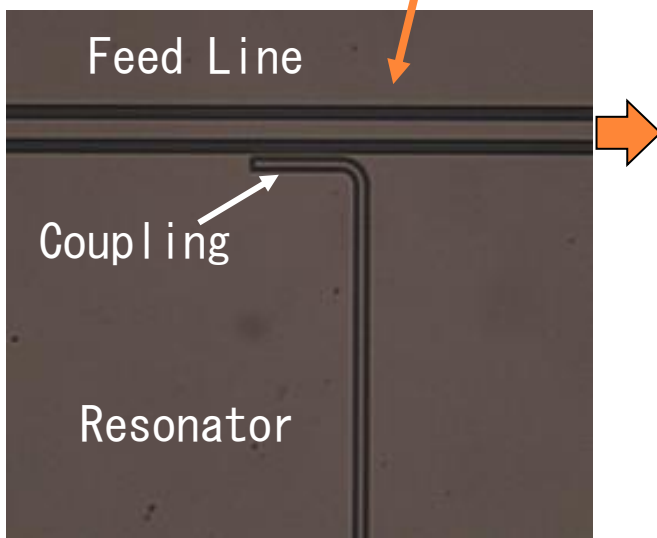


- 共振器の長さが異なるので、共振周波数のずれから入射座標と入力パワーが分かる
- Q値が高いMKIDsを作ることが出来れば、数10MHzのADC一つで1000個の素子の読み出しが可能である

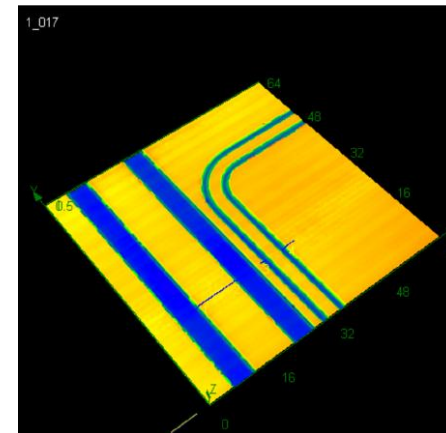
MKIDS の構造



マイクロ波
~5GHz



アンテナ

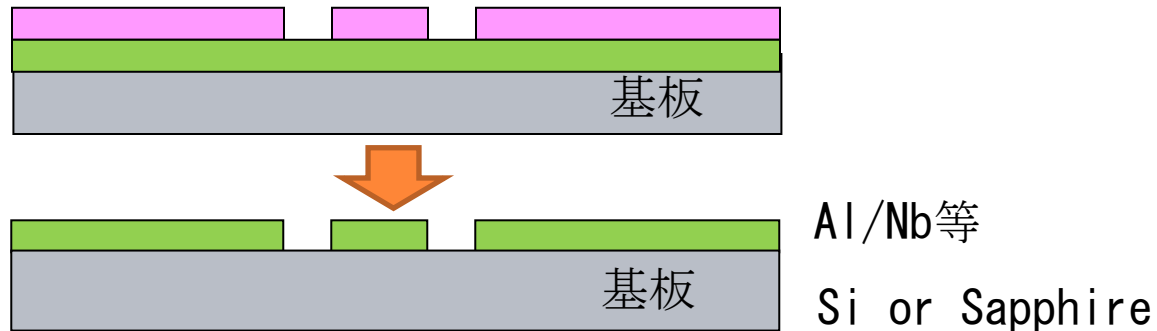
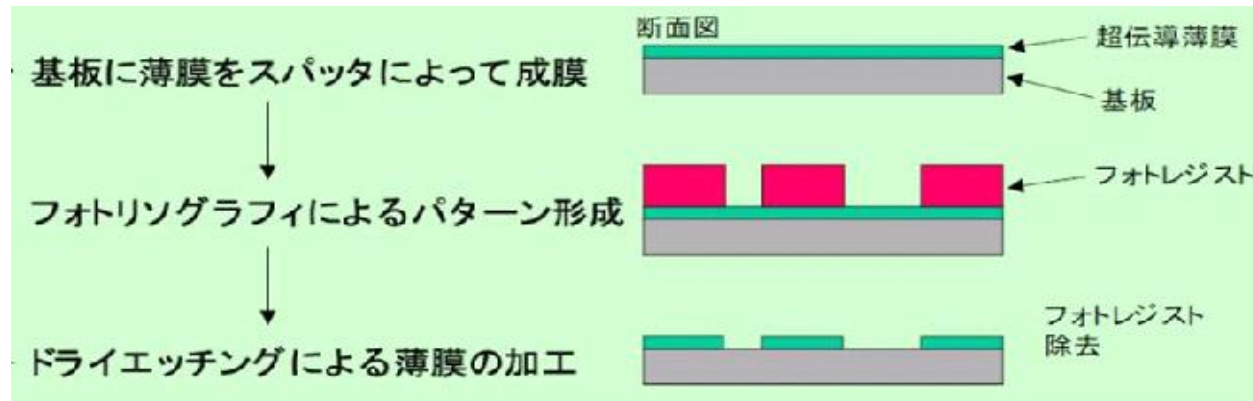


Feed Line



MKIDsの作製・測定

MKIDsの作成・Al(50nm)、Nb(200nm)



Coplanar Waveguide
(CPW)

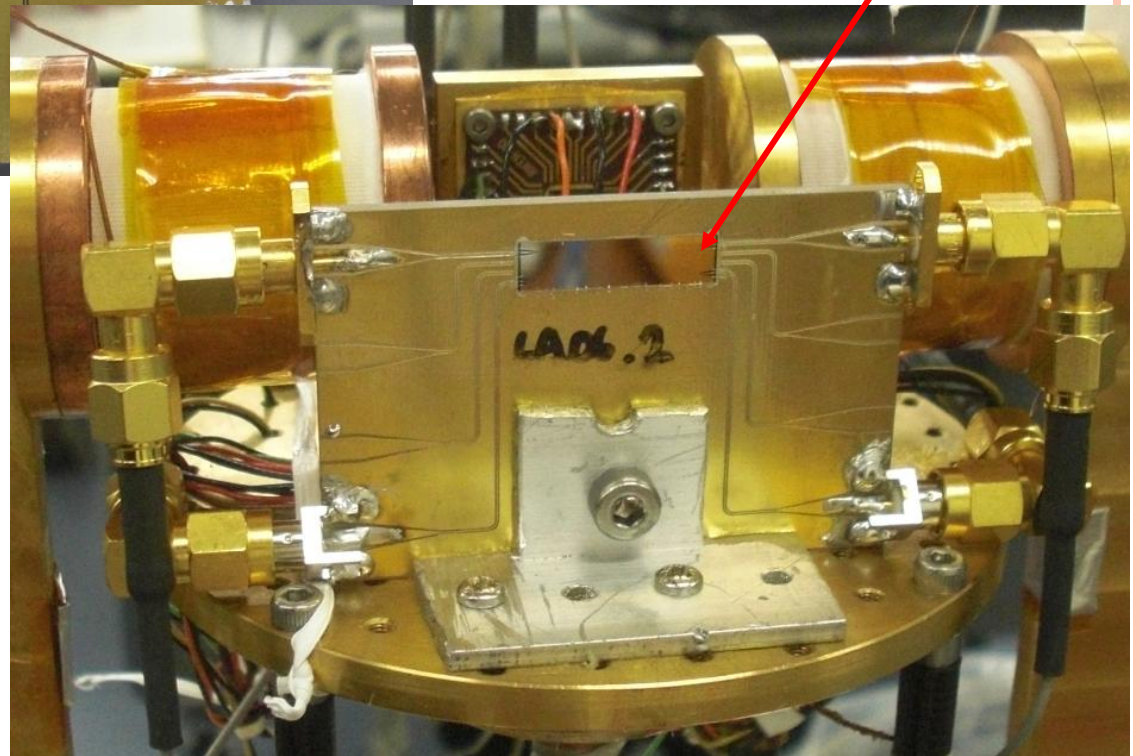
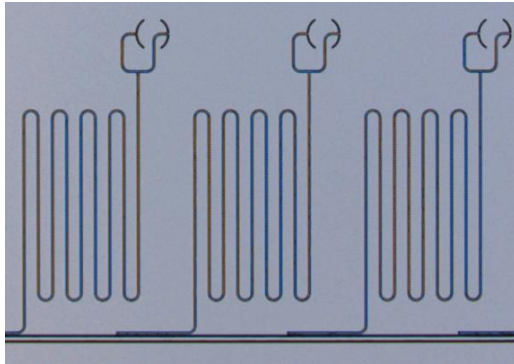
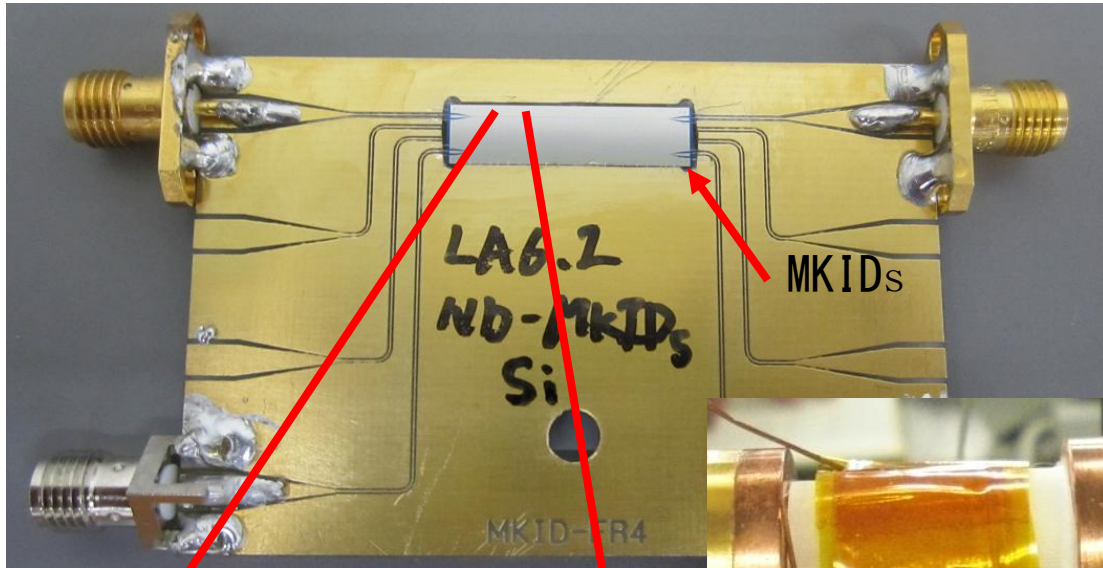
断面図

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

製作の様子@KEK



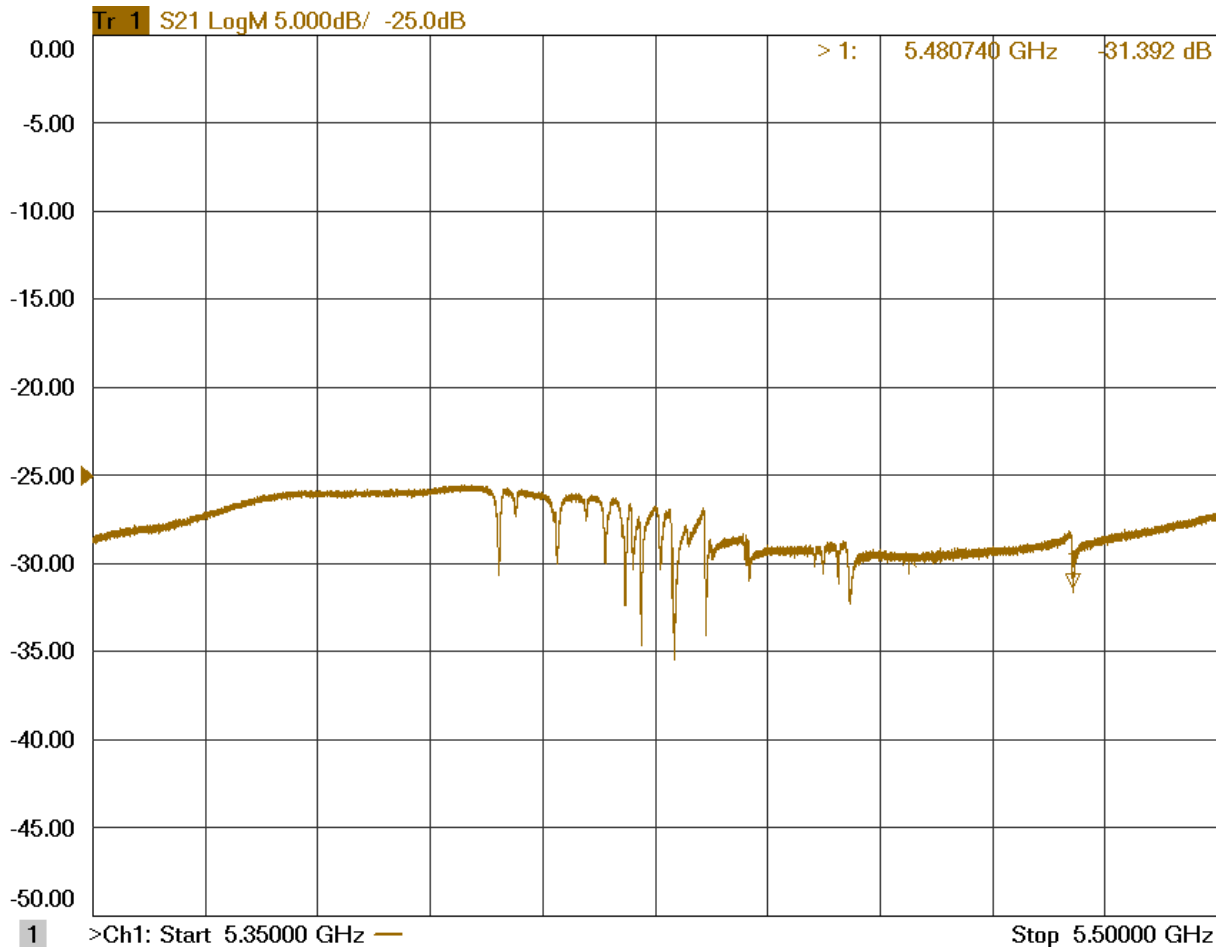
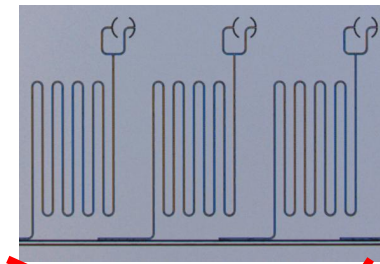
RFフィード(SMAコネクタ ⇔ Si基板)・0.3K冷凍機での測定



↑ 0.3K 冷凍機で試験

測定結果

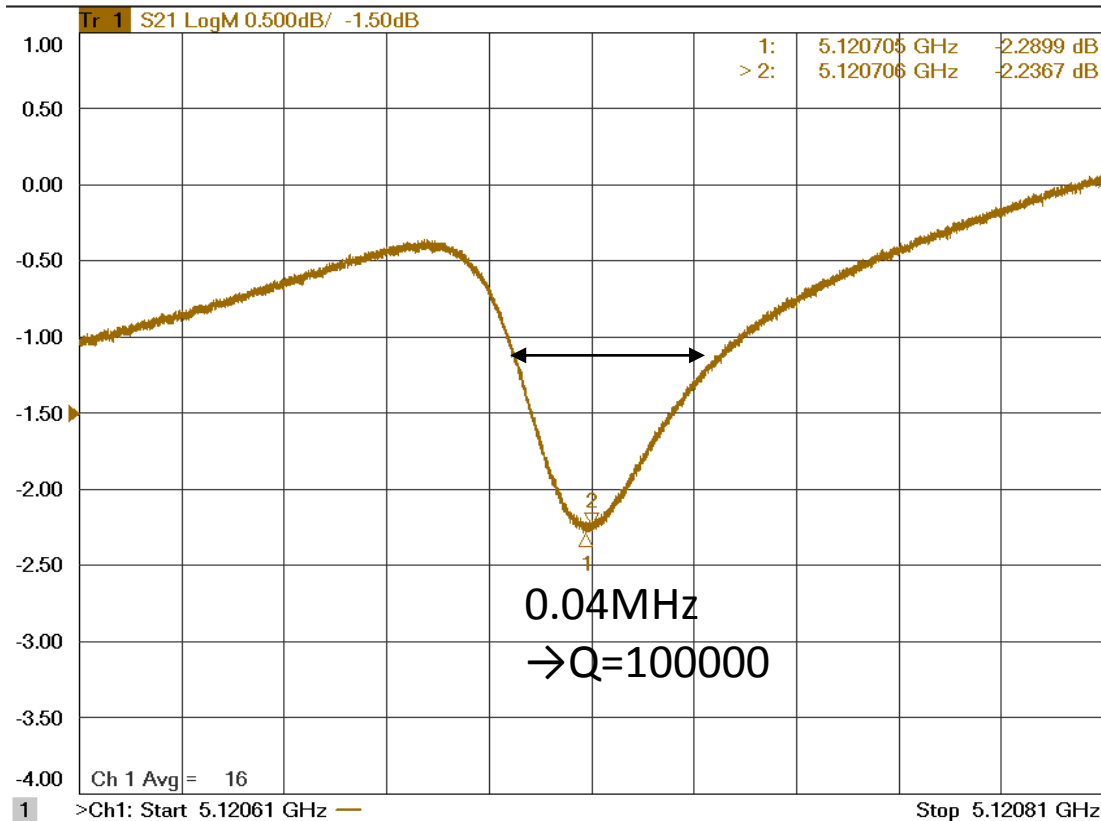
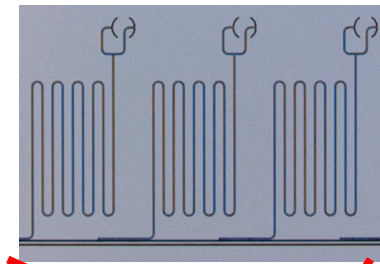
Nb-MKIDs 32ch



- 共振器によるピークを確認
- 問題点
共振周波数が一様に分布していない

測定結果

Nb-MKIDs 32ch

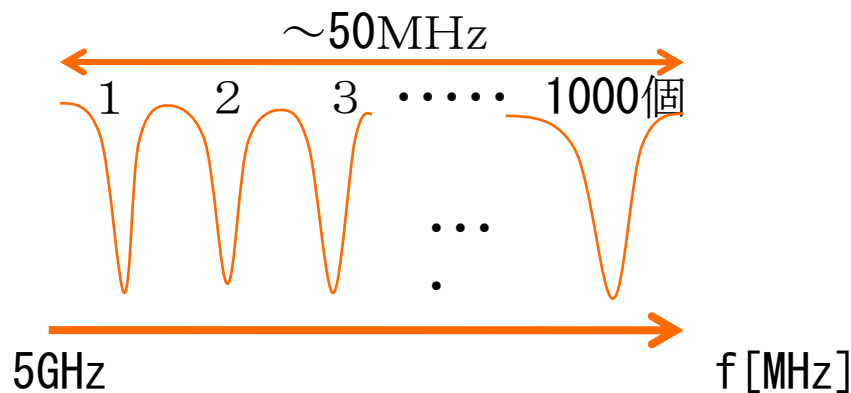


- 0.3Kで最高Q~100000の作製に成功
- 問題点
Q値がそれぞれの場所ではばらつきがある

Q値=10000~100000

考察

- Nbで共振によるピークを検出
- Q値が最高で～100000程度のMKIDsの作製に成功
 - すべてがQ～100000程度のMKIDsを作ることが出来れば、約50MHzのADC一つで1000素子を読み出すことが可能



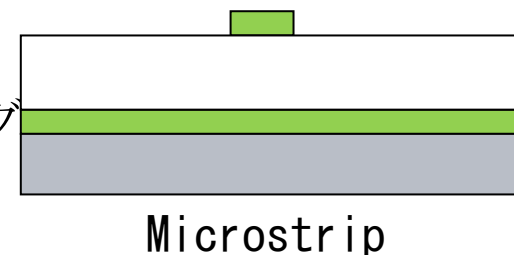
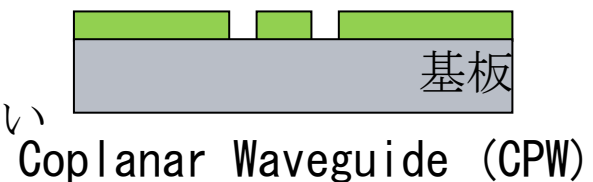
問題点

- それぞれの共振ピークが一様に分布していない
- Q値がそれぞれの共振ピークでずれている

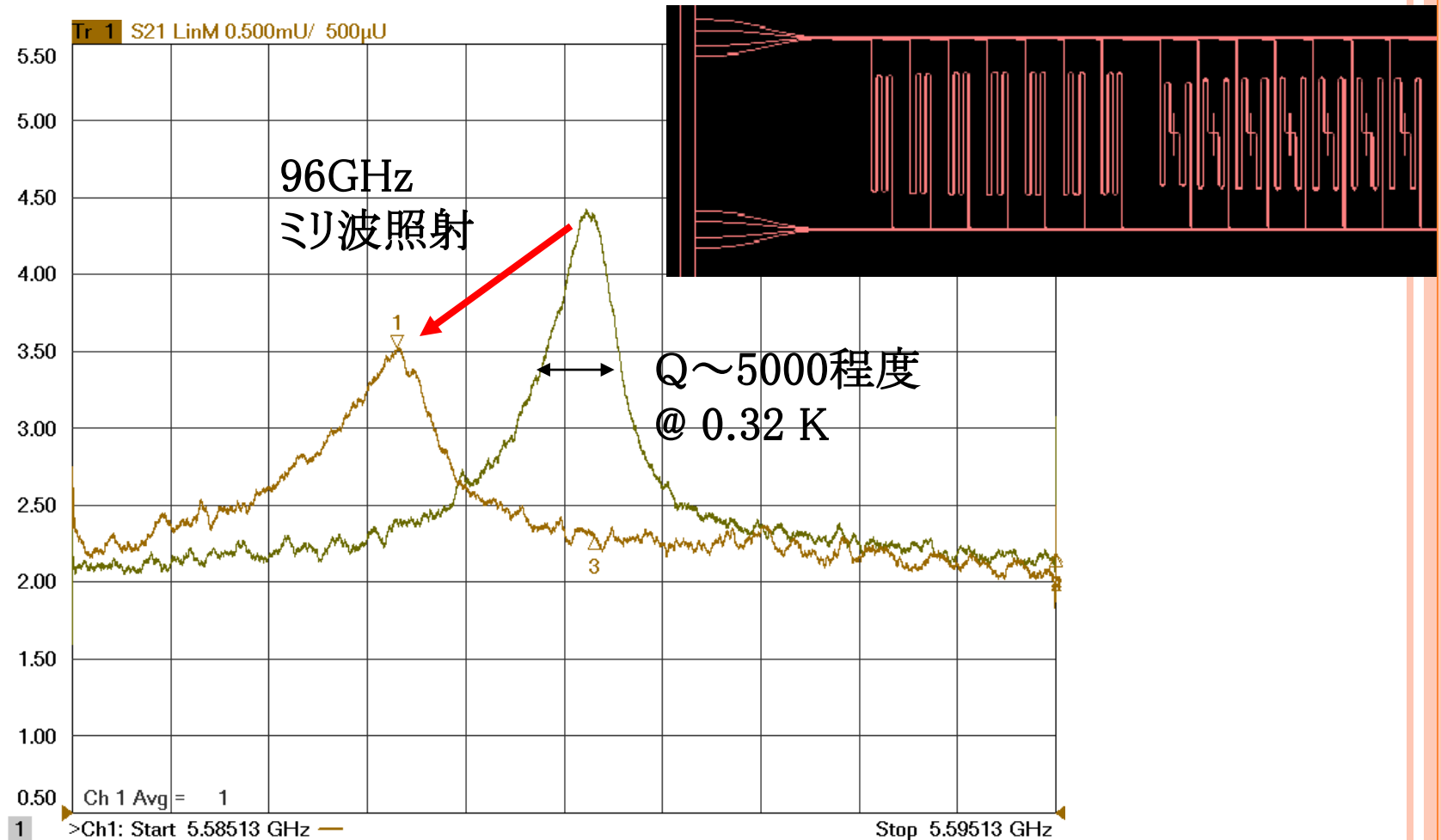
→プロセスの問題

CPW型は溝が細いため、現像、エッチング時にうまくできていない

改善策: Microstrip型のMKIDsの作製



Al-MKIDsへのミリ波の照射結果



ミリ波の検出に成功

Q値の改善に向けて
希釈冷凍機0.1Kでの
Al-MKIDsの測定を予定

まとめ・今後の予定

○ まとめ

- MKIDsをAl、Nbで作製した
 - Nb-MKIDsでは最高Q \sim 100000の作製に成功
 - Al-MKIDsではミリ波に対する応答を確認

○ 今後の予定・課題

- 60GHzを受けることのできる他の材質を検討(TiNなど)
- 多色化に向けたデザインの検討
- Q値、共振周波数のばらつきの改善
- 希釈冷凍機0.1KでのAl-MKIDsの測定

BACK UP

MKIDsの原理

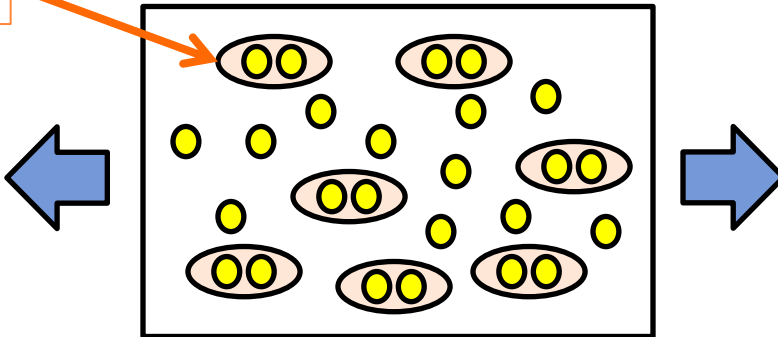
○ MKIDs(Microwave Kinetic Inductance Detectors)

- 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

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

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

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}

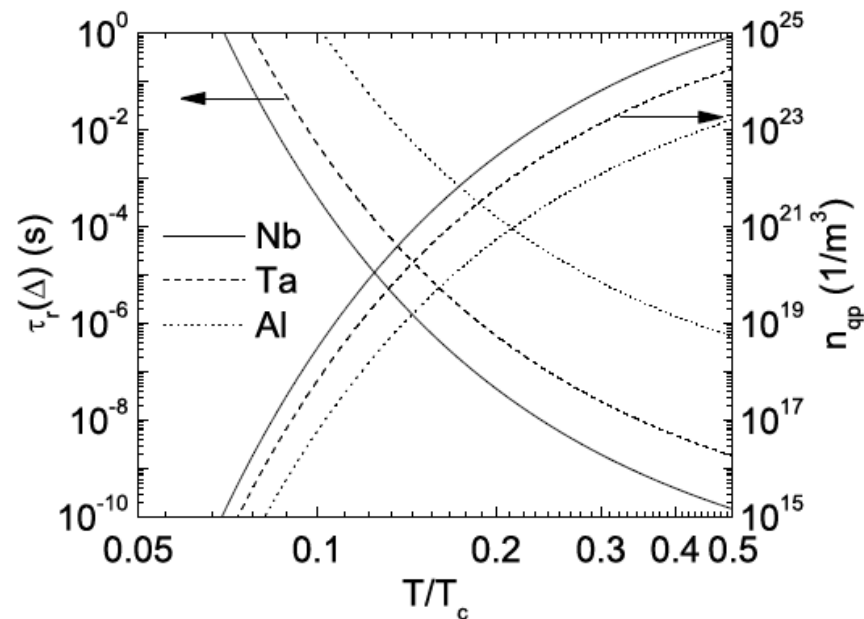
- 体積を小さくする(薄くする)
- 準粒子の寿命を長くする
- ギャップエネルギーは大きくする
- 温度は低くする

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

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

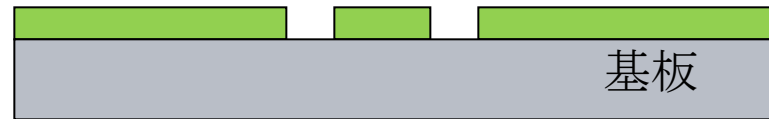


伝送線路 / 共振回路の構造

共振回路 : LCで作る or $\lambda/4$ または $\lambda/2$ 伝送線路

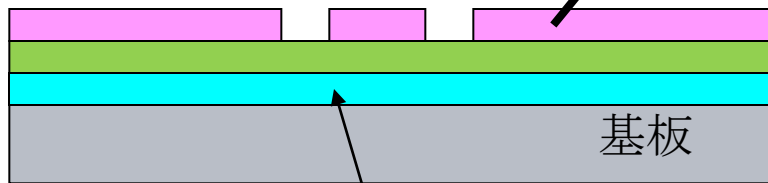
伝送線路

• Coplanar Waveguide (CPW) → 作り易い



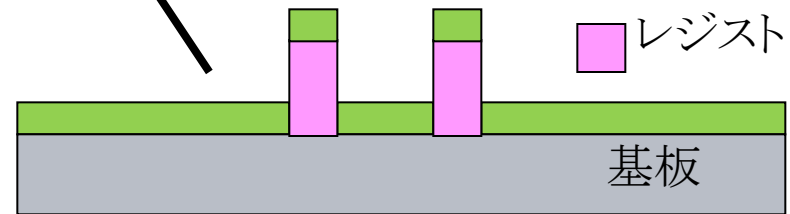
Al/Nb等
Si or Sapphire

[エッチングの場合]



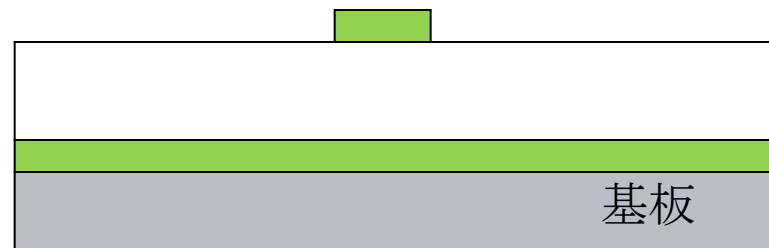
Al より Si の方が削れ易いので
 Al_2O_3 の層

[リフトオフの場合]



レジスト

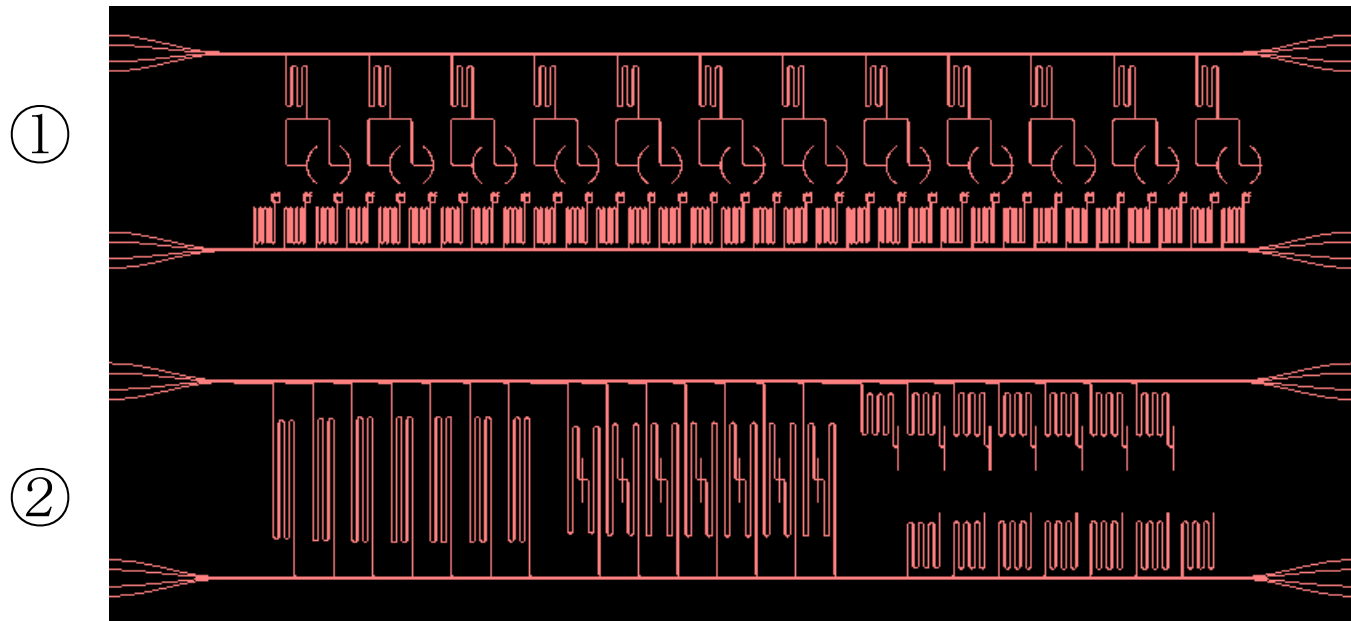
• Microstrip



Al/Nb等
 SiO_2
Al/Nb等
Si or Sapphire



MKIDsのデザイン: LA06(吸収型、透過型)



①プロセスの相対精度の検証

LA05測定を元に結合度固定

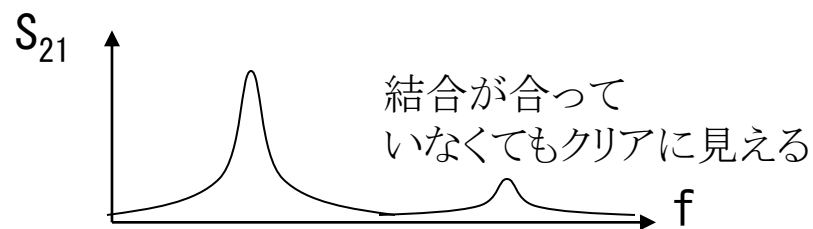
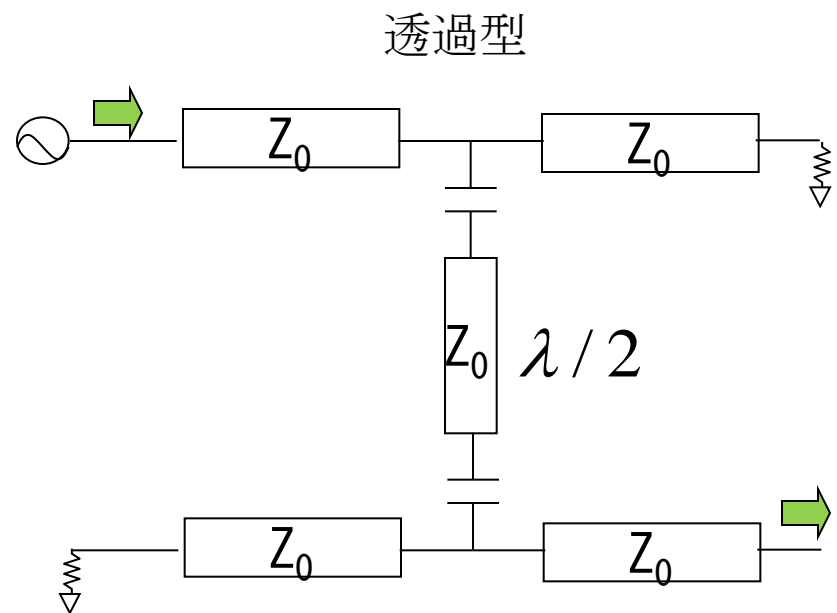
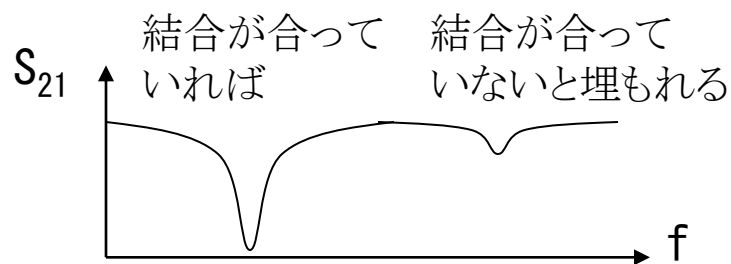
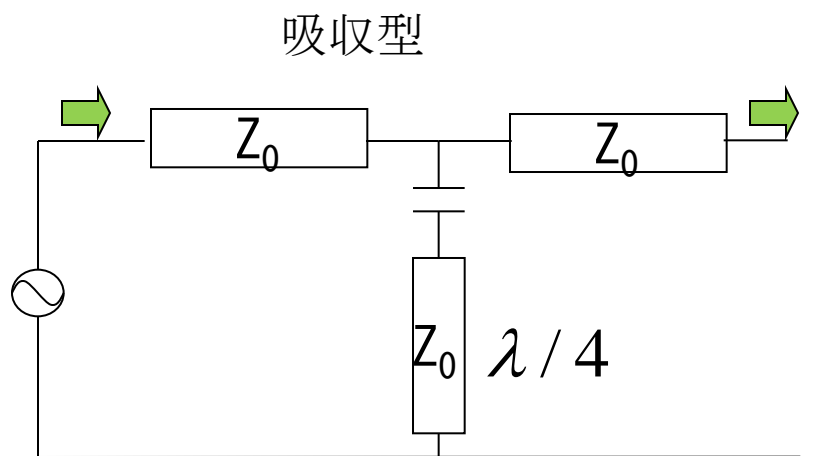
- Al用×12(上) $\Delta f=3.8\text{MHz}$
- Nb用×32(下) $\Delta f=1.6\text{MHz}$

②結合度の測定

結合度を変えてQの測定用

- 透過型 / アンテナ無
- 透過型 / アンテナ有
- 吸収型 / アンテナ有
- 吸収型 / アンテナ無

等価回路: 吸収型、透過型 MKIDS

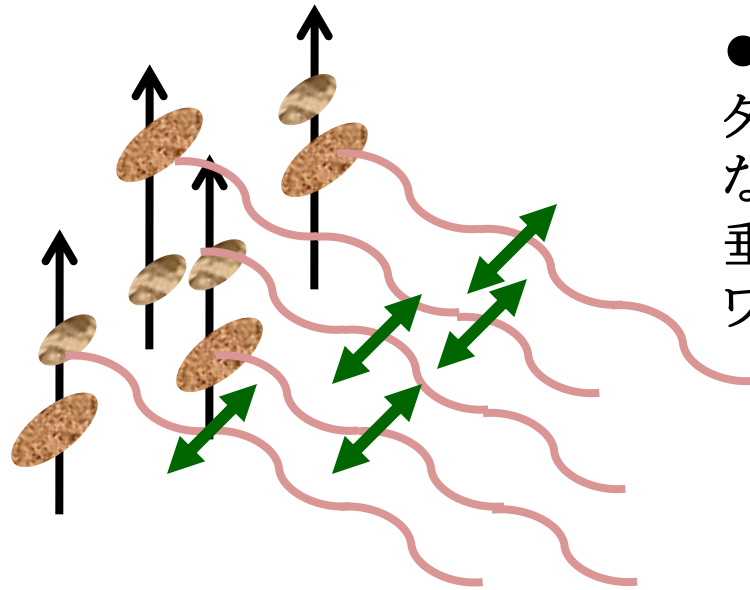


- 結合が不足でもクリアに測定可能
- 位相検出の場合RFの振幅変動に依存しない

KEKの超伝導検出器開発装置



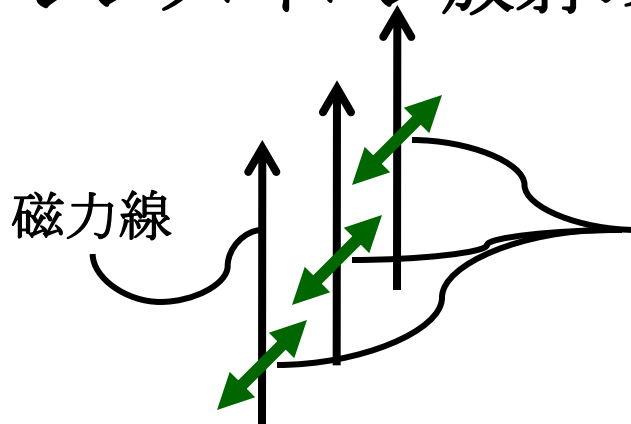
ダストからの放射が偏光する機構はどのようなものか？



●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

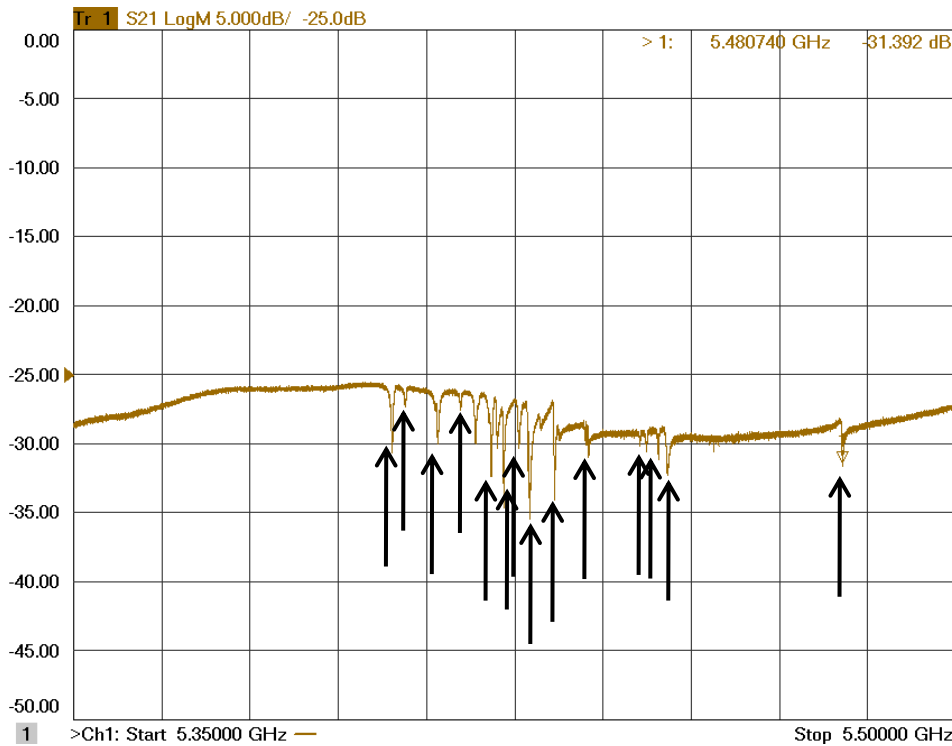
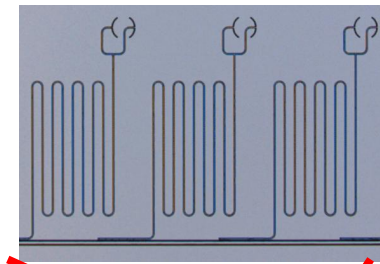


シンクロトロン放射の偏光状態
磁力線に垂直方向の直線偏光

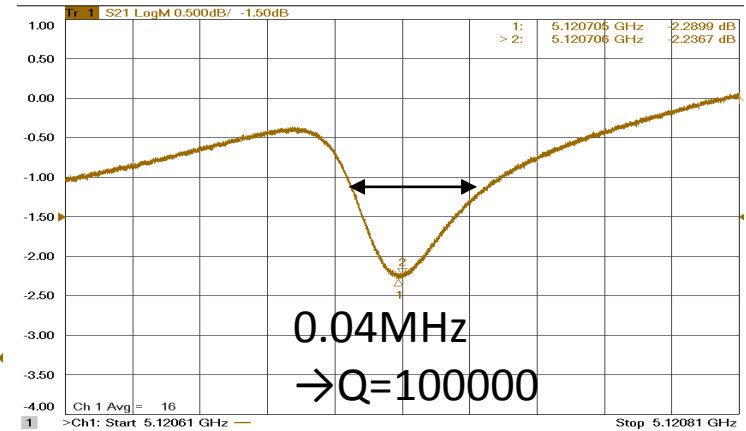


測定結果

Nb-MKIDs 32ch



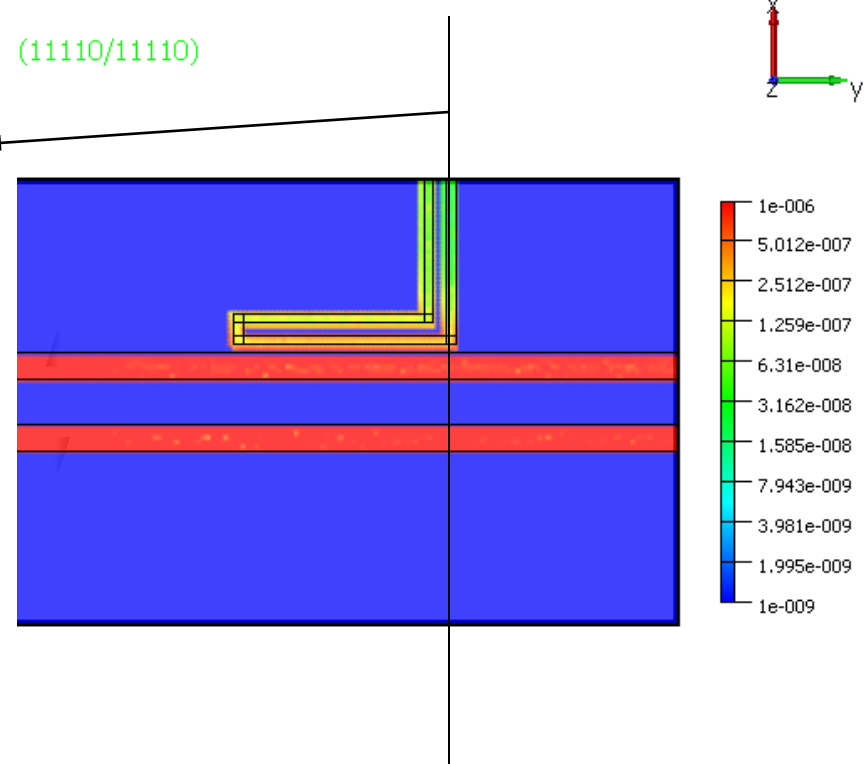
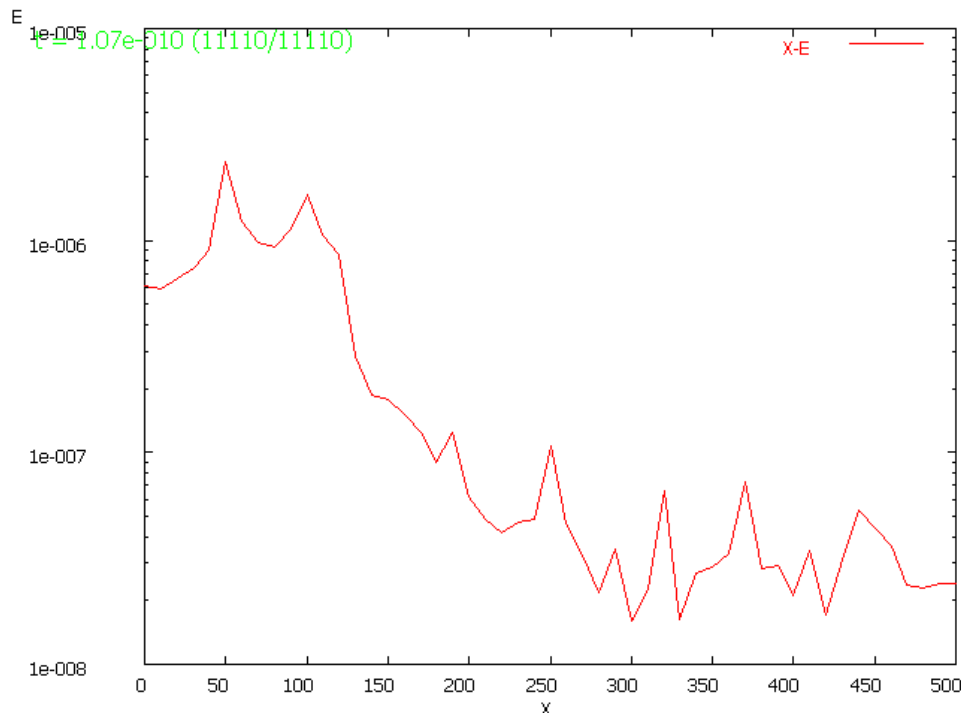
Q値=10000~100000



- 0.3KでQ~10000の作製に成功
- 数10MHzのADCを使えば一つのADCで1000個の素子を読み出すことが可能

- 問題点
共振周波数が一様に分布していない
Q値がそれぞれの場所ではらつきがある

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

KINETIC INDUCTANCE の式の導出

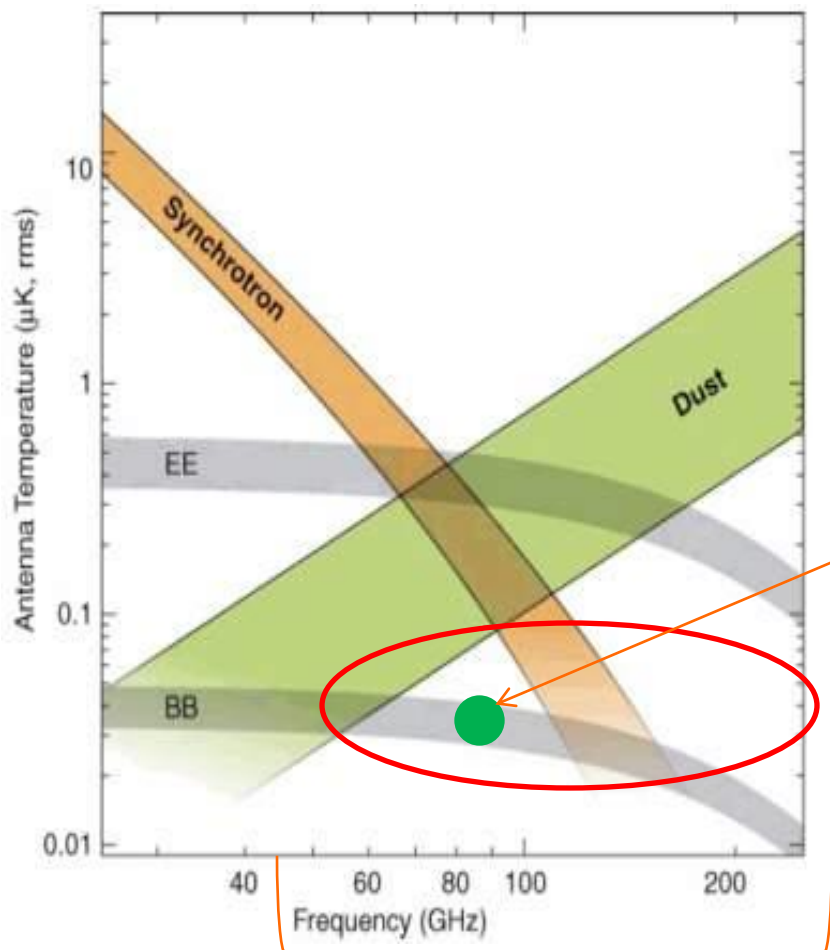
- ①超伝導電子の運動方程式、②電荷に対するクーロンの法則、③超伝導電子が早さ v で移動するときの電流密度
- ① $F = m^* \frac{du}{dv}$ ② $F = -q^* E$ ③ $J = nq^* v$



○MKIDの利点

- 多素子の読み出し、たとえば1000素子を入力と出力それぞれ1本ずつの計2本のとHEMT1つだけで読み出せる
- バイアスも不要

測定方法



- 現在我々はCMBの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

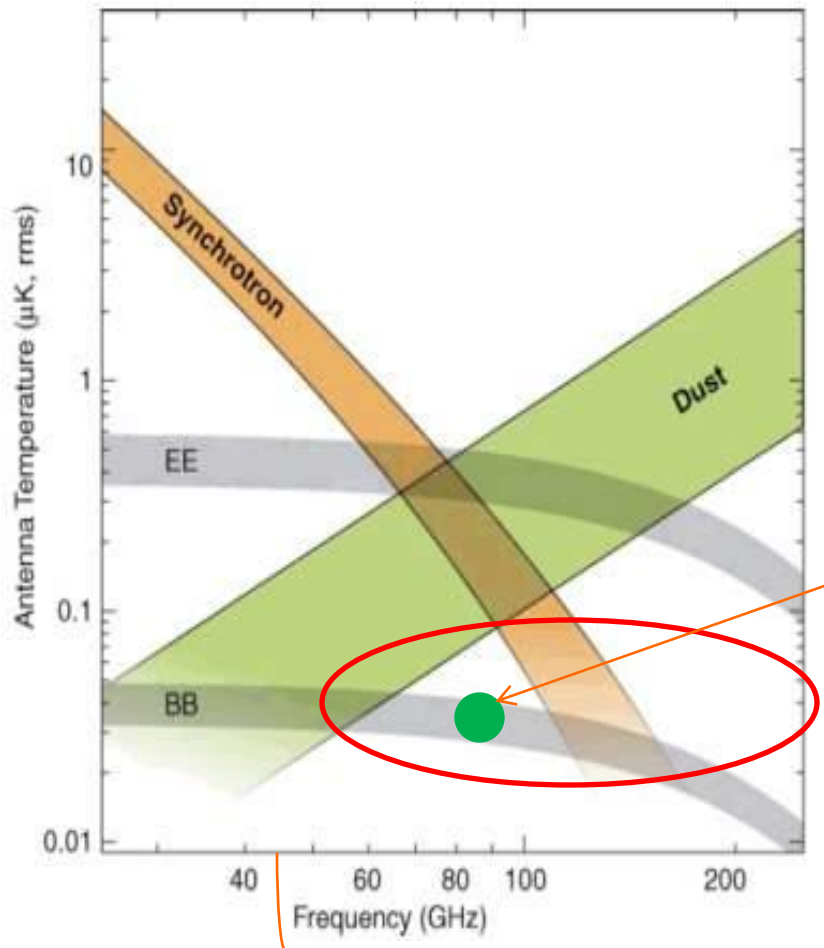


- Al, Nbを用いMIKDsを試作
→超伝導転移温度の高い素材で試作し動作を検証

↑
波長10mm

↑
波長1mm

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
- Al, Nbを用いMIKDsを試作
→超伝導転移温度の高い素材で試作し動作を検証

↑
波長10mm

↑
波長 1mm

作成したMKIDS

Al-MKIDS(50nm)

