

エアブリッジ構造を有する超伝導共振器の開発

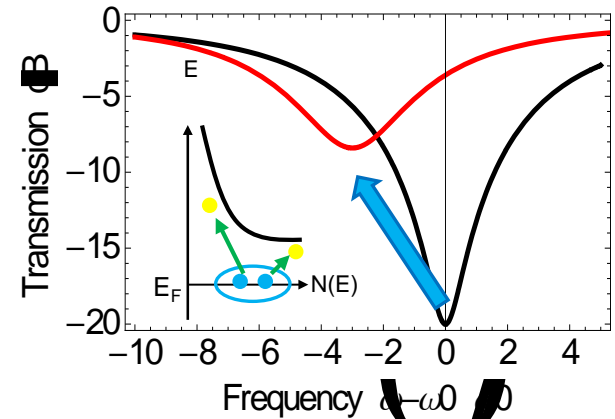
埼玉大学大学院理工学研究科
成瀬雅人，和賀雄貴，二宮夏子，明連広昭

謝辞

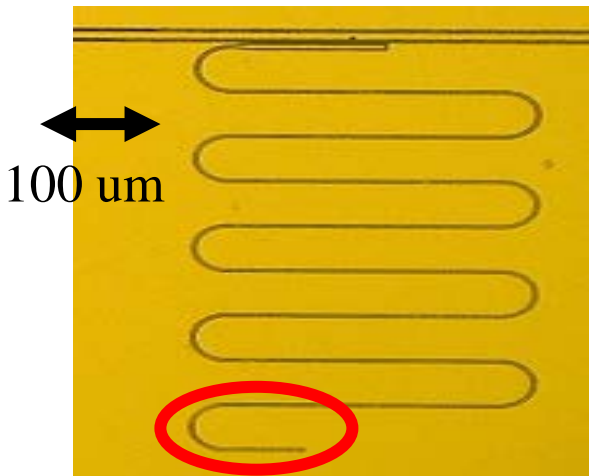
デバイス作製工程の一部に、理化学研究所テラヘルツイメージング研究チームのクリーンルーム設備を使用させて頂きました。大谷チームリーダー，美馬博士に感謝致します。本研究は科研費20H05244からの支援を受けています。

力学インダクタンス検出器(KID)

- 超伝導マイクロ波共振器 $f_0 \propto (LC)^{-1/2}$
- インダクタンスの変化を読み取る
- 高感度かつ多素子化可能
- meV以上のエネルギーに感度を持つ



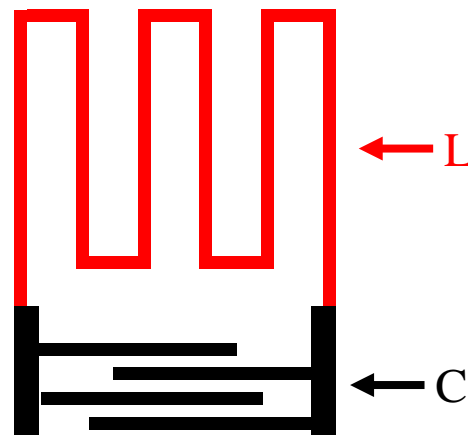
1/4波長導波路型



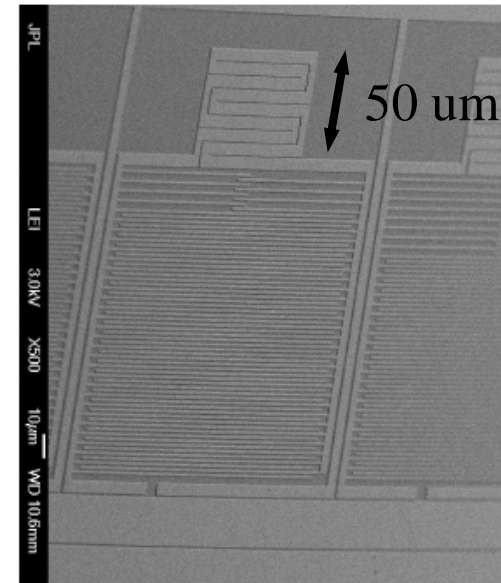
アンテナと相性が良い
高検出効率

集中定数型:LeKID

Doyle et al. JLTP 2008

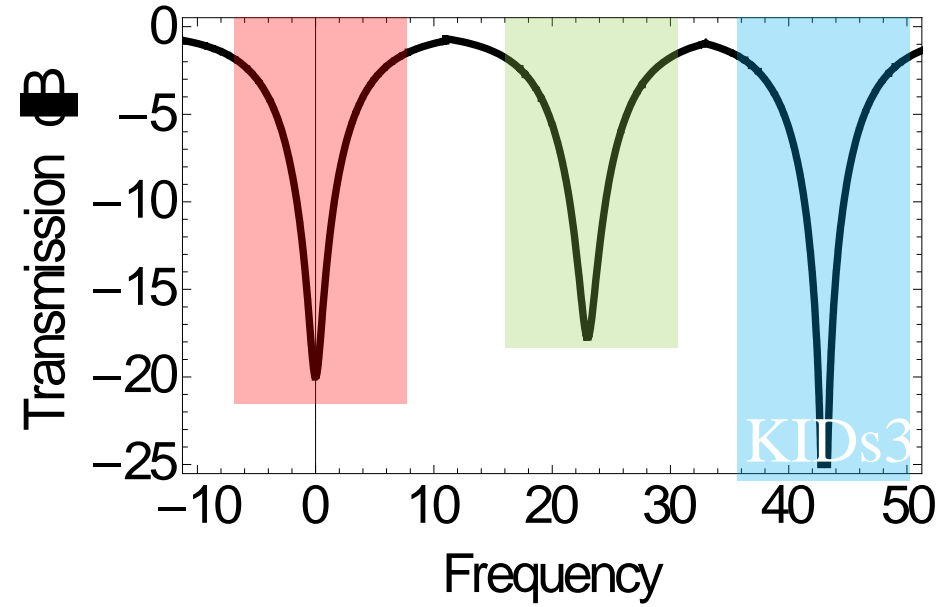
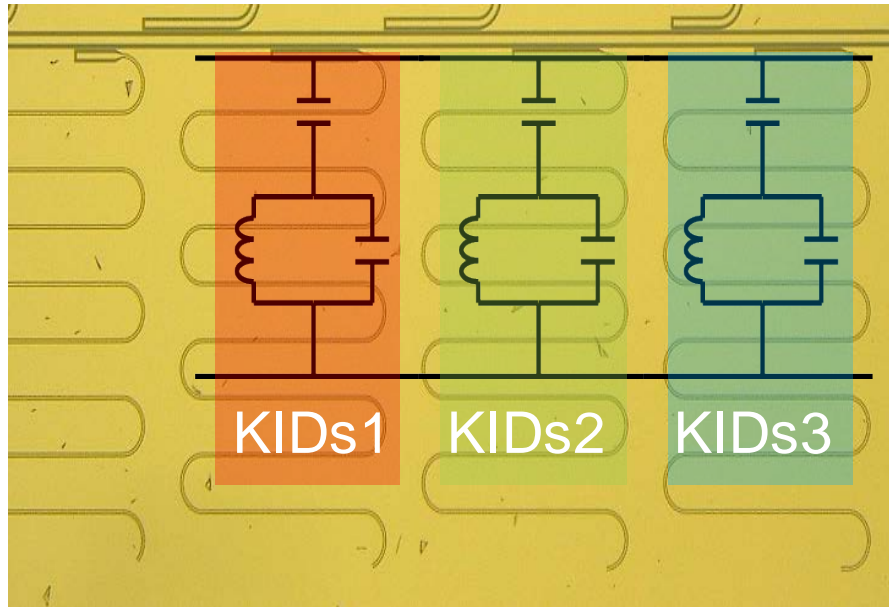


ミリ波から放射線まで
検出効率の構造依存



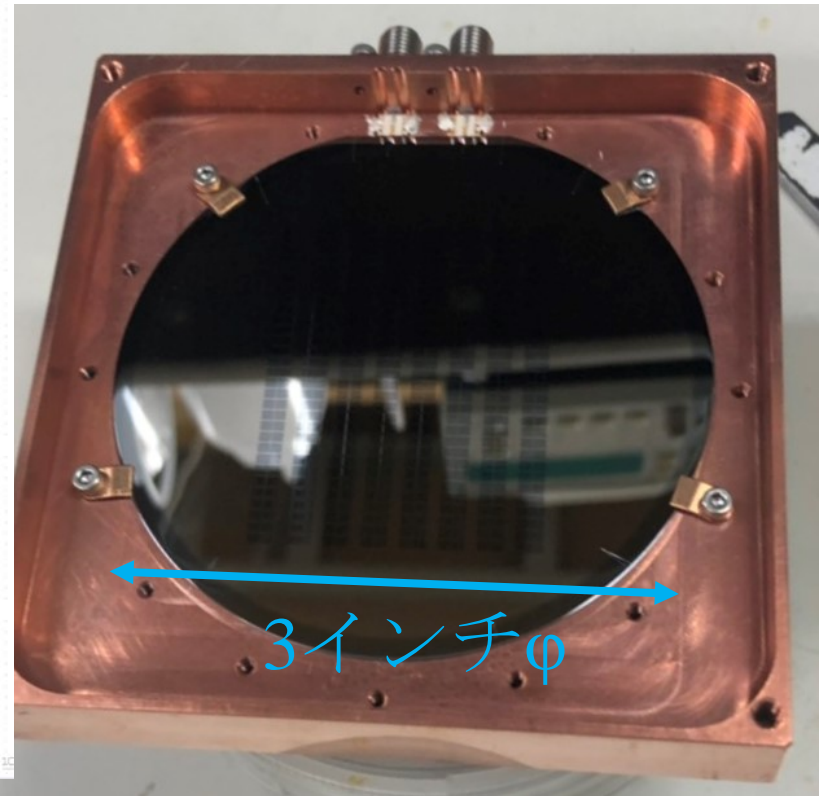
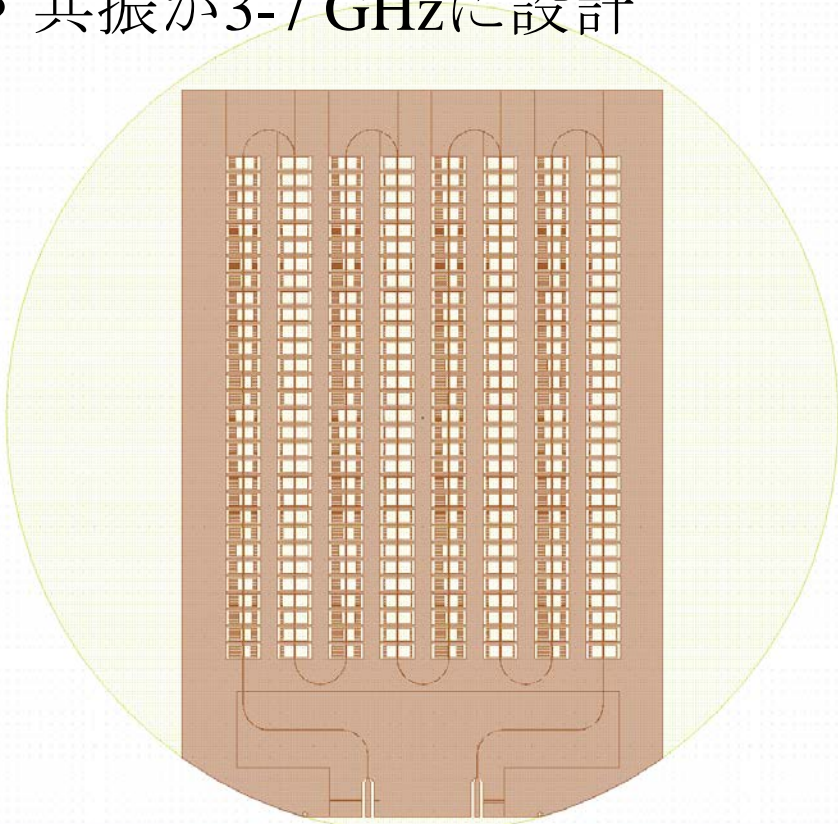
高感度な部分の面積が可変
Marsden et al. Proc. SPIE, 2012

周波数多重読出



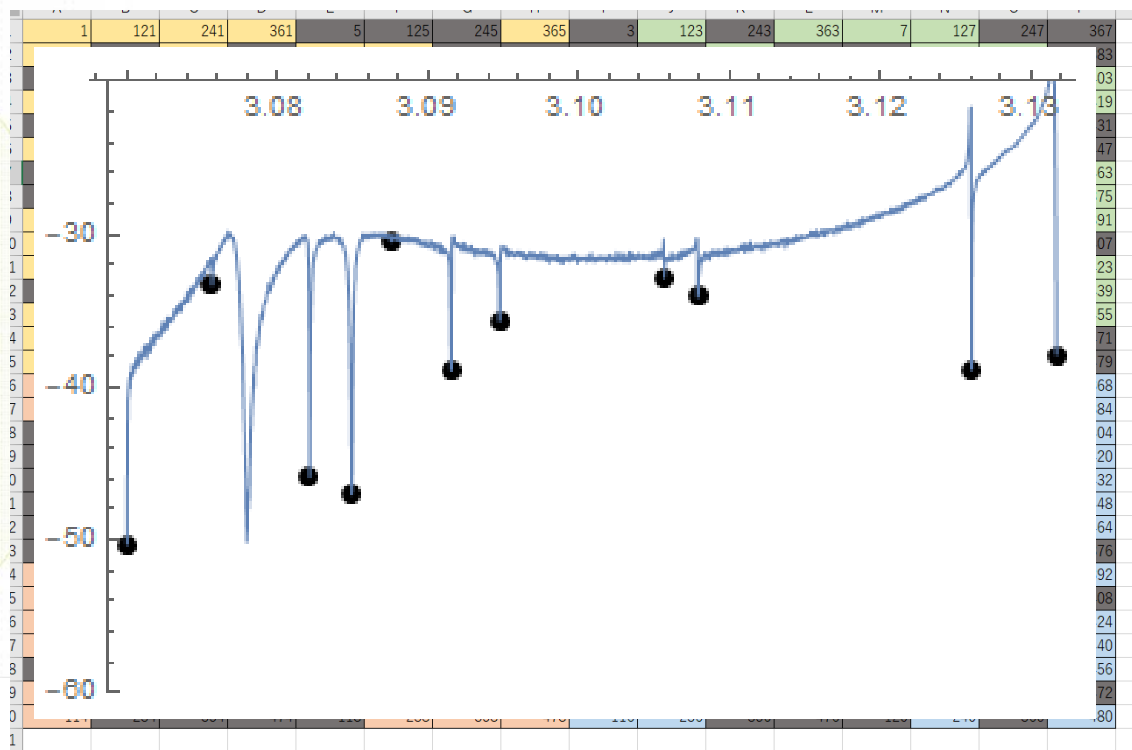
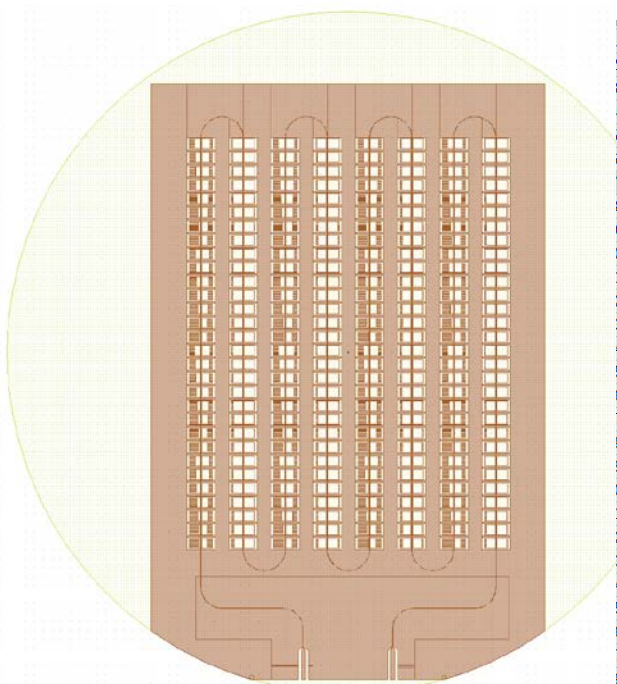
480素子アレイ

- 3インチシリコン基板上
- 100 nmのニオブ膜
- 共振が3-7 GHzに設計



480素子アレイの動作

- 1 K冷凍機で評価
- 動作確認は480素子中259個→歩留まり54%
- マイクロ波伝送線路（CPW線路のGNDが浮いているのが原因？）



エネルギー分解能

エネルギー分解能^[4]

$$\sigma_E = \frac{L}{L_k} \frac{\Delta^2 N_0 V}{\eta_E Q_l S(f, T)} \sqrt{\frac{4Q_C^2}{Q_l^2} \frac{k_B T_N}{P_{in} \tau_{qp}}} \propto \frac{1}{\eta_E \sqrt{\tau_{qp}}}$$

η_E : excitation efficiency

τ_{qp} : quasiparticle lifetime

L : total inductance

L_k : kinetic inductance

Δ : superconducting gap

V : volume

Q_l : loaded quality factor

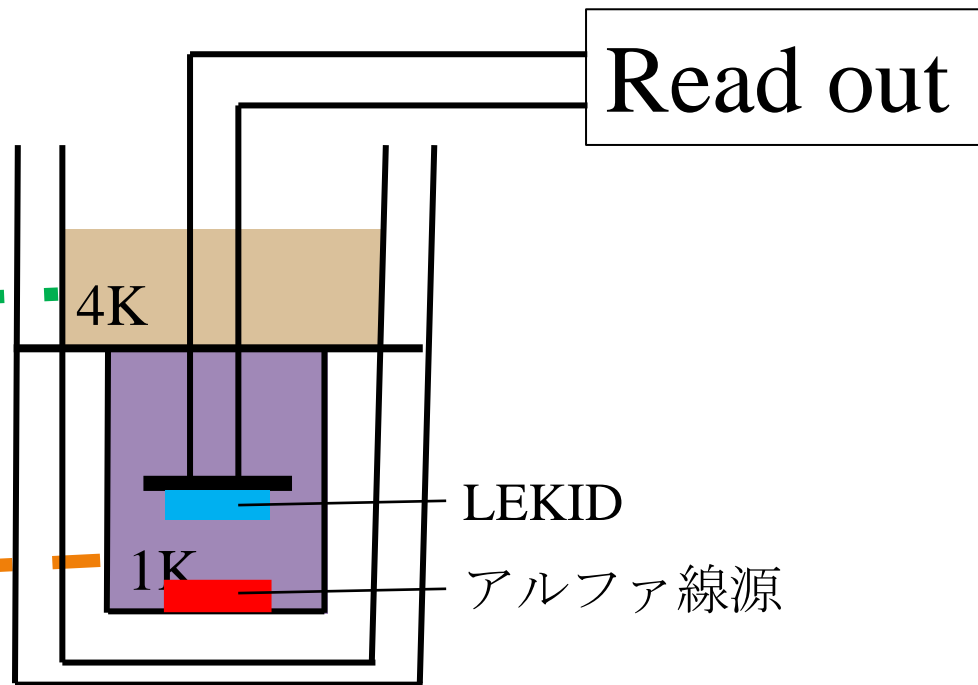
Q_C : coupling quality factor

P_{in} : readout signal's power

[4] L. Cardani, I. Colantoni, A. Cruciani, S. Di Domizio, M. Vignati, F. Bellini, N. Casali, M. G. Castellano, A. $\sqrt{\tau_{qp}}$

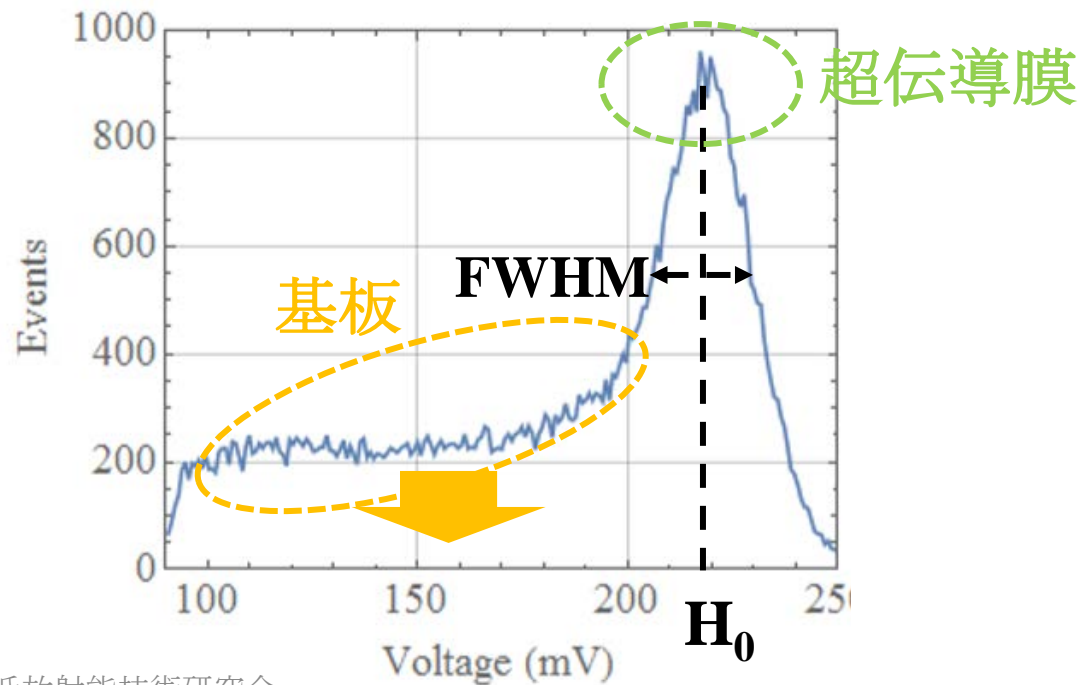
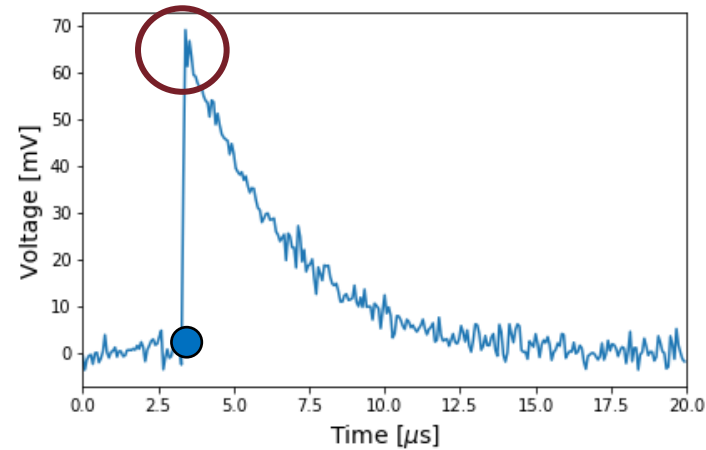
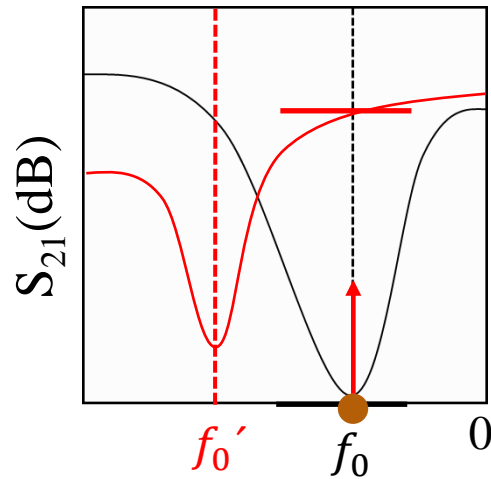
測定系

- VNA or シンセ + デジタイザを用いて共振特性を測定
- Nb層の超伝導転移温度 $T_c = 8.2\text{K}$
- 測定温度 $T = 0.8\text{K}$
- 放射線源： ${}^{241}_{95}\text{Am}$ (5.48 MeV, 86.0 %)
(5.44 MeV, 12.5 %)



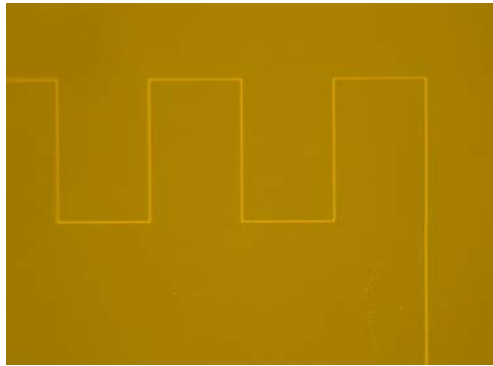
測定系の概念図

KIDによるアルファ線の検出

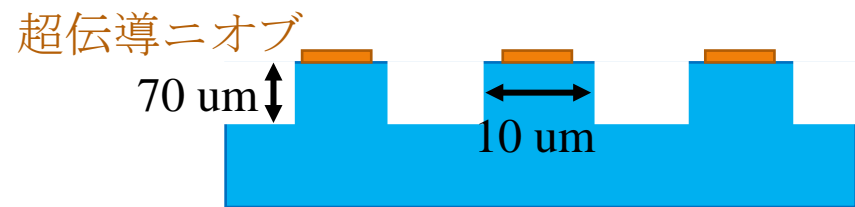
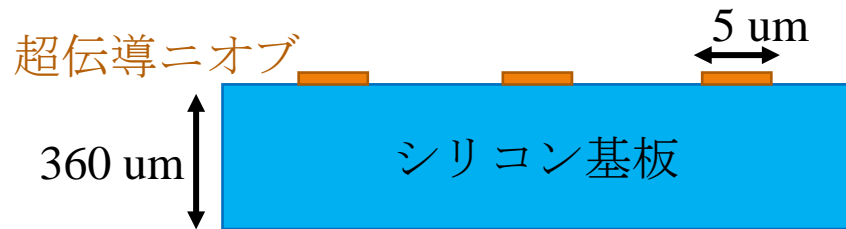
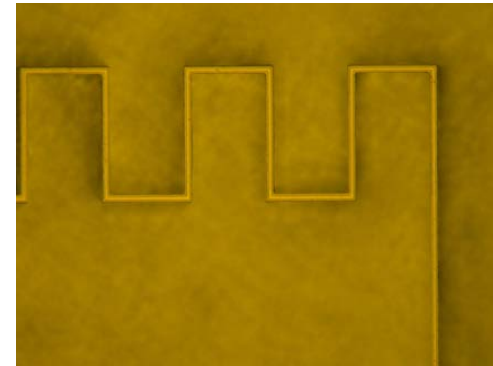


Si基板の表掘

基板表掘前



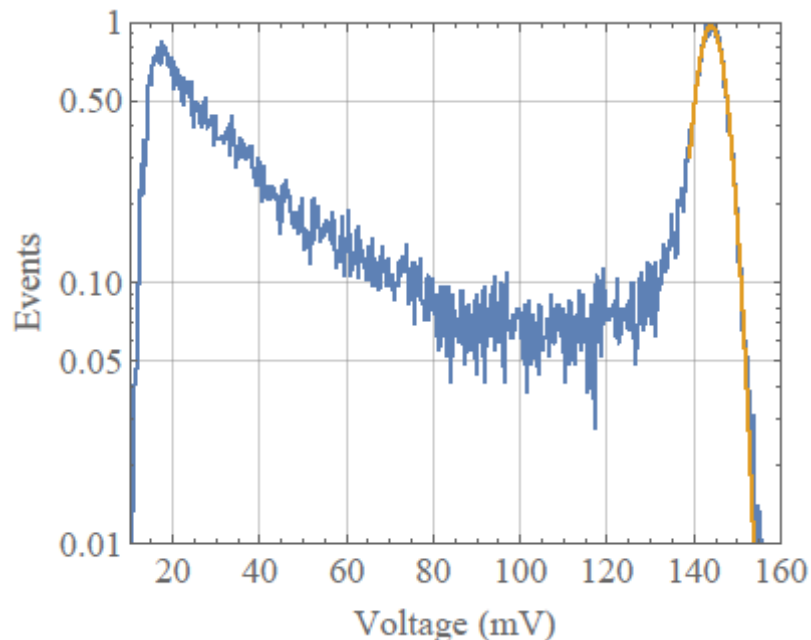
基板表掘後



Si基板の表堀

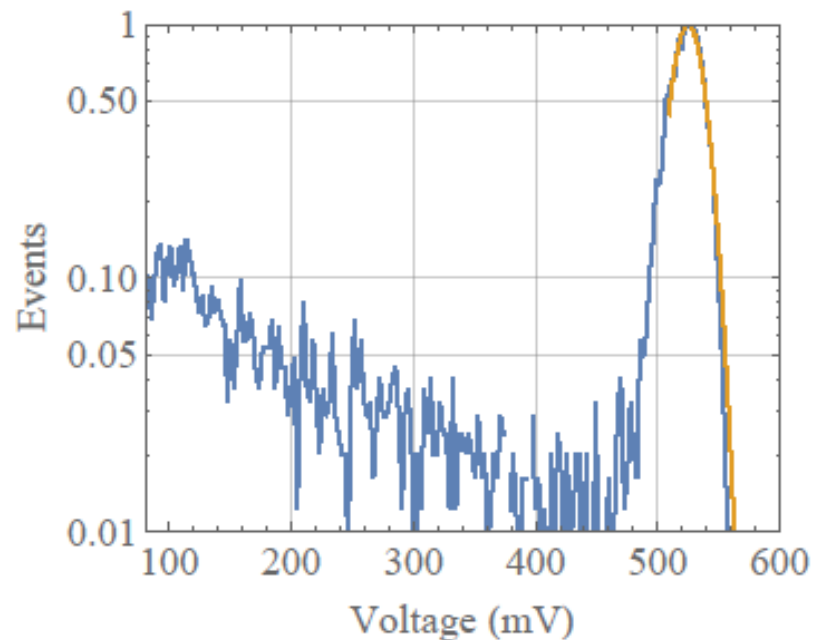
- 基板イベントは抑制されたが、エネルギー分解能向上には繋がらず

Si基板深堀前



エネルギー分解能値：21

Si基板深堀後

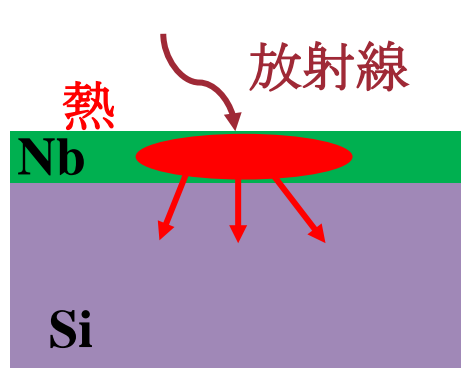


エネルギー分解能値：22

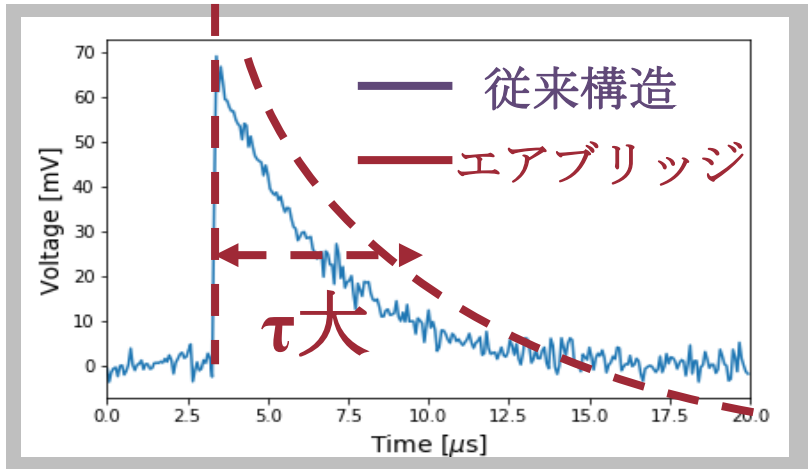
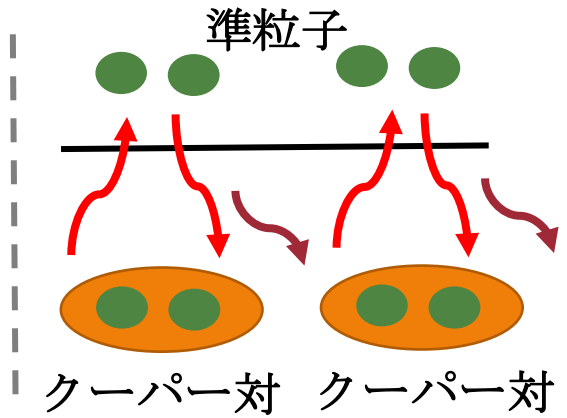
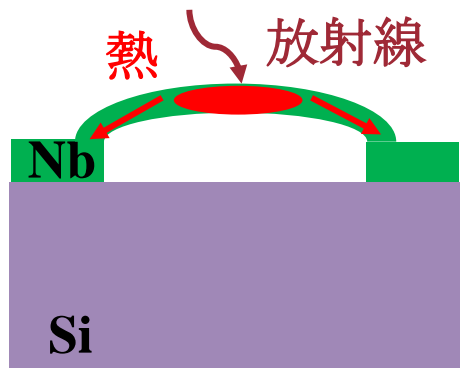
エアブリッジ構造の導入

$$\sigma_E \propto \frac{1}{\eta_E \sqrt{\tau_{qp}}}$$

従来構造



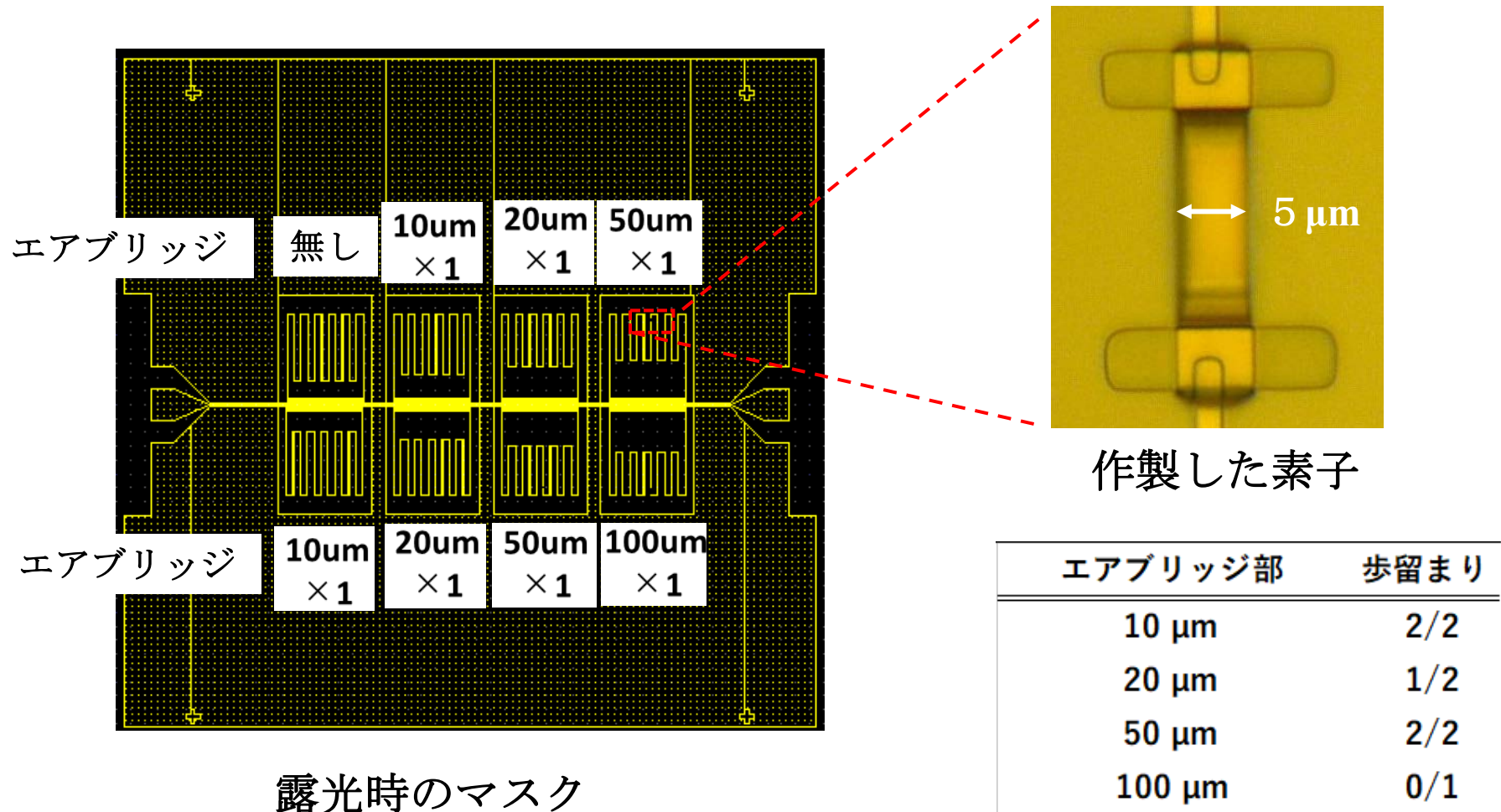
エアブリッジ



$\tau, \eta \uparrow$ 基板イベント \downarrow
 エネルギー分解能値向上

エアブリッジKIDデザイン

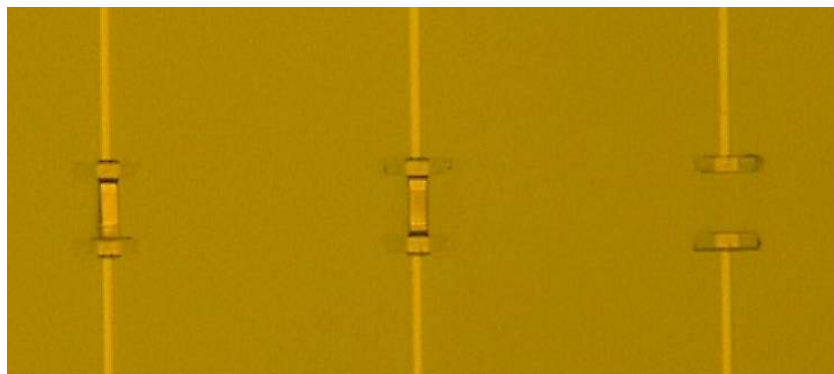
- ・フォトリソグラフィ技術を用いて素子を作製した



エアブリッジの歩留まり

- エアブリッジを複数組み込んだKIDを作製
- 現状は、 $20\mu\text{m}$ で3つ， $50\mu\text{m}$ で1つは1素子に組み込める

長さ $20\mu\text{m}$



歩留まり ($20\mu\text{m}$)

1/1

3/3

3/3

9/10

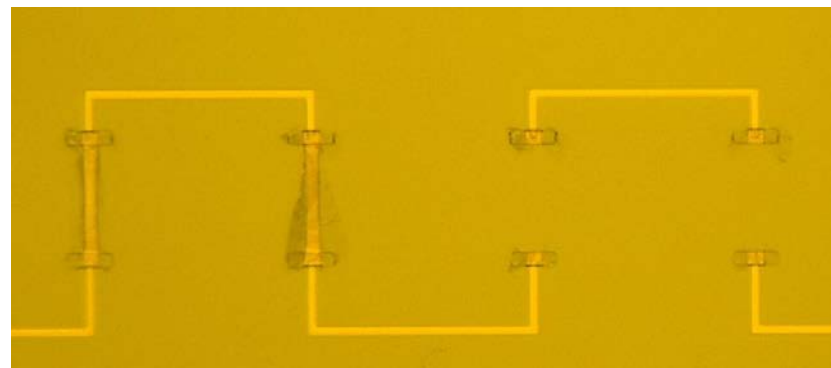
7/10

16/30

18/30

➔ 歩留まり 65%

50 μm



歩留まり ($50\mu\text{m}$)

1/1

3/5

1/5

5/10

8/10

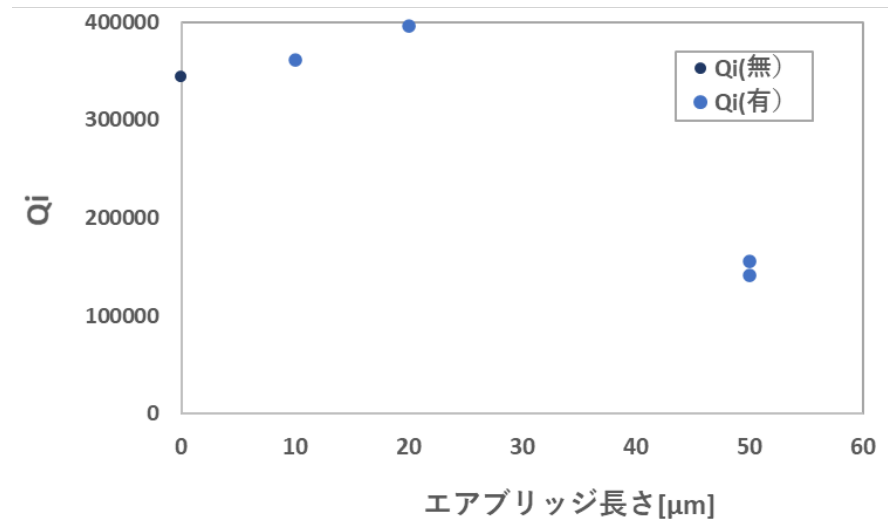
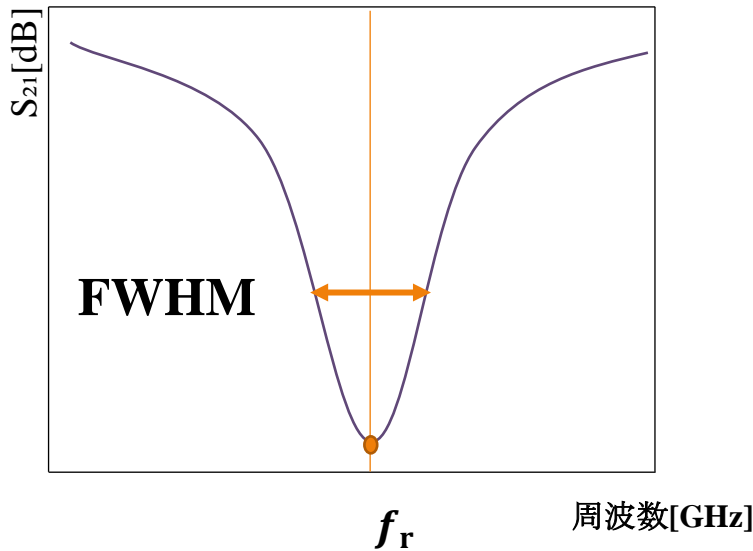
9/10

6/10

➔ 歩留まり 65%

共振特性

- 20 μm 長まではエアブリッジによる共振Qの劣化は見られない。
- 50 μm 長でも $Q_i > 10^5$



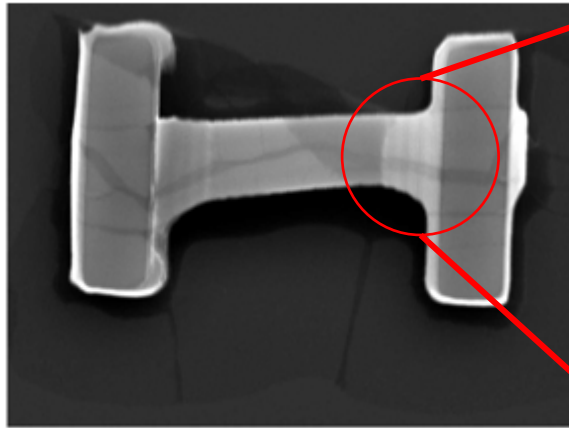
エアブリッジ長さと Q_i 値の関係

$$Q = \frac{f_r}{FWHM} = \left(\frac{1}{Q_c} + \frac{1}{Q_i} \right)^{-1}$$

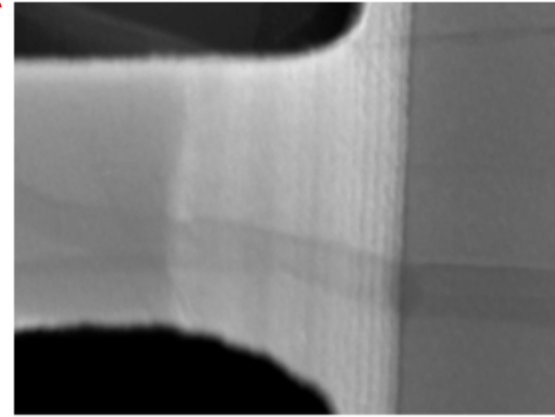
$Q_c \propto^{-1}$ CPWとKIDのカップリング

$Q_i \propto^{-1}$ KIDの損失

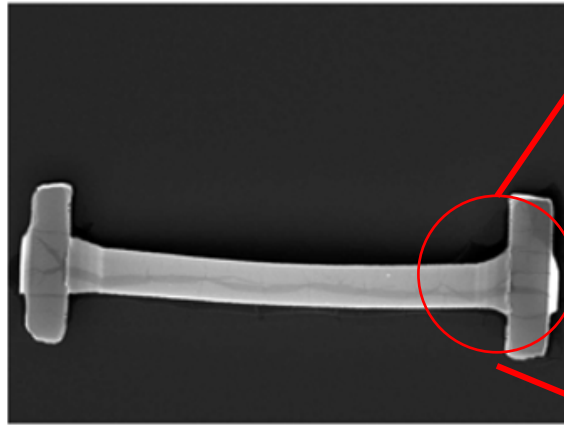
エアブリッジ付け根が劣化の原因



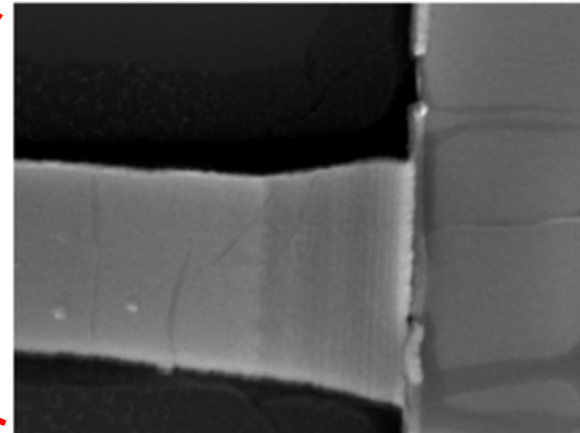
20um



20um付け根



50um

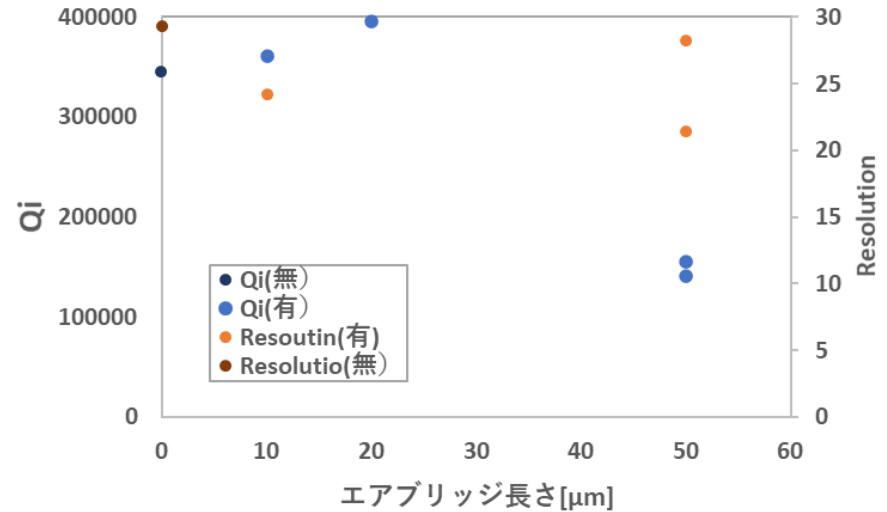
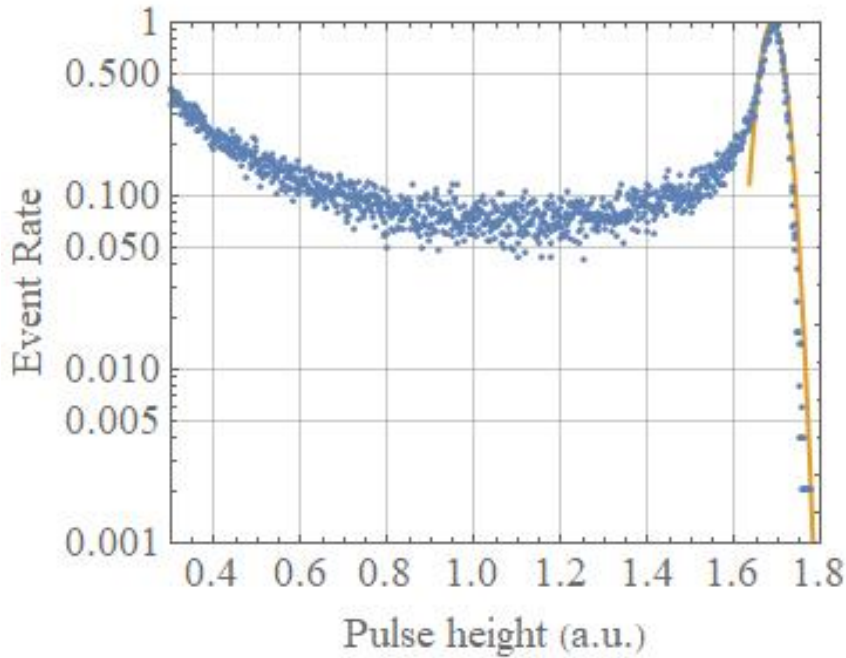


50um付け根

エアブリッジKIDのエネルギー分解能

• エアブリッジ部に当たったと思われるピークを確認できず....

➡ エアブリッジの信号はメインピーク・基板イベントに埋もれた可能性

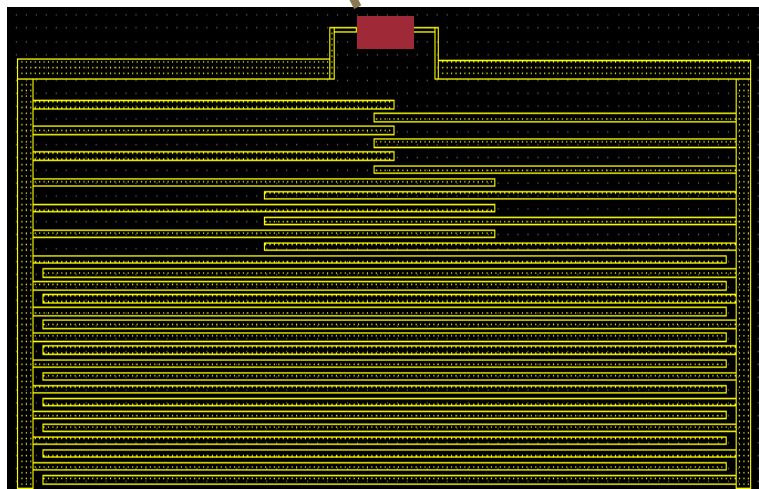


□ エアブリッジ部分/全インダクタンス = 0.5%

今後

提案するデバイス構造

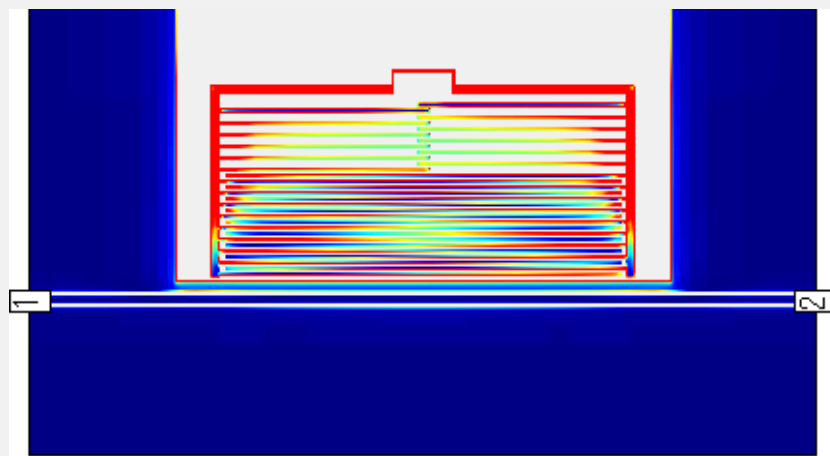
全インダクタンス長 : 150 μm
 エアブリッジ : 50 μm



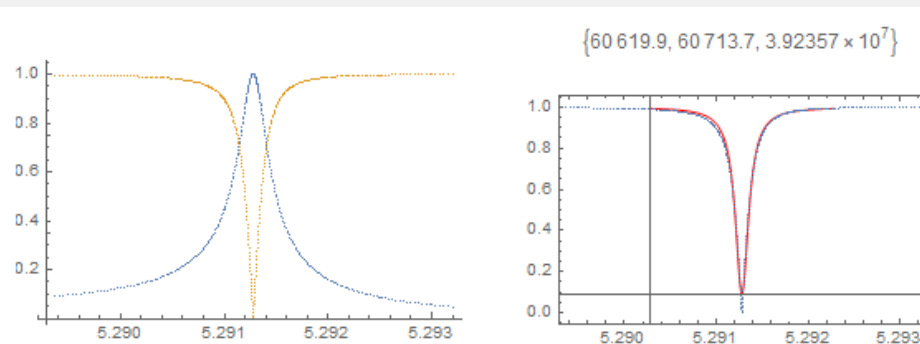
測定した素子のエアブリッジ比率 : 0.5%

作製予定のエアブリッジ比率 : 30%

シミュレーション結果



電流分布



共振特性

まとめ

- 超伝導ニオブによる480素子KIDの評価
- デバイス側の基板除去による基板イベント抑制
- 50 μm 長のエアブリッジを組み込んでも高い共振Q値($>10^5$)を確認
- エアブリッジ部分に当たった信号は、基板イベントに埋もれた可能性が示唆された。

今後

- エアブリッジ比率の高い素子の作製・測定を行い、エアブリッジの信号の確認を目指す