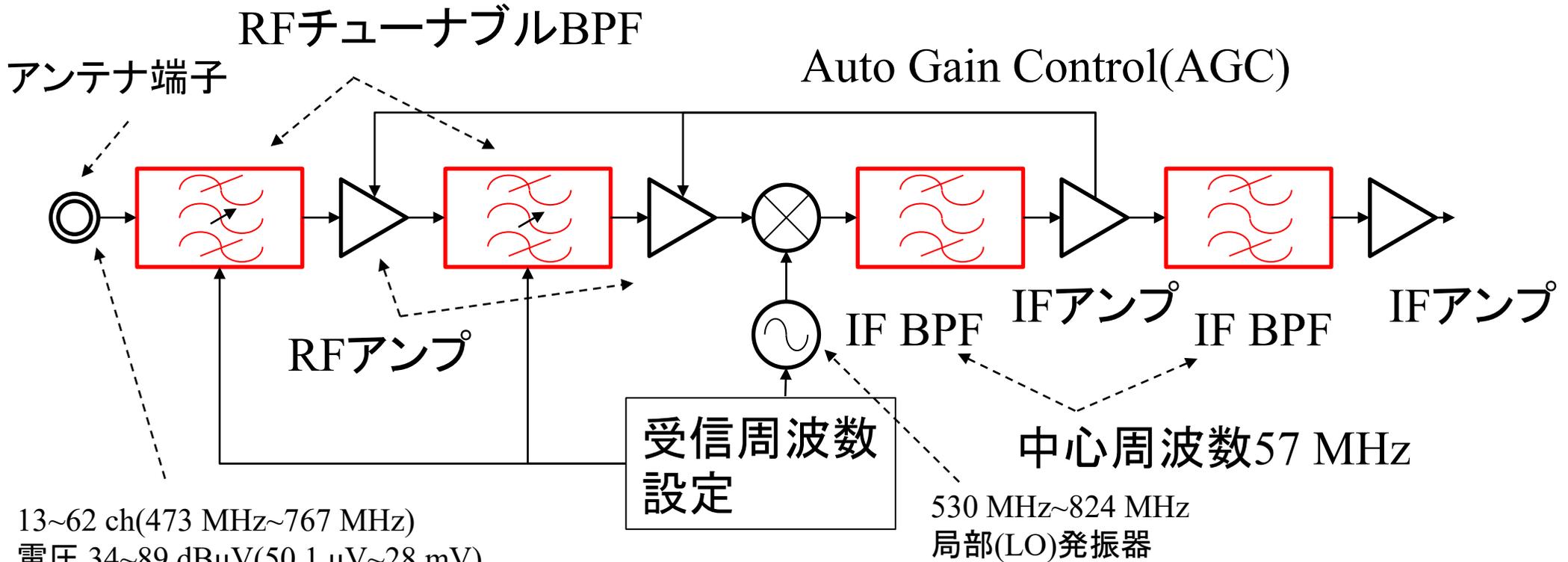


負性抵抗と抵抗器を活用した 共振器の高Q値化と低損失な バンドパスフィルタの実現

電気通信大学 大学院情報理工学研究科
情報・ネットワーク工学専攻
准教授 小野 哲(筆頭発明者 塩竹 明人)

2023年5月11日

共振器の高無負荷Q値の重要性



13~62 ch(473 MHz~767 MHz)
電圧 34~89 dB μ V(50.1 μ V~28 mV)
75 Ω 系での電力に換算すると、
-74.8 dBm~-19.8 dBm
(33.5 pW~10.6 μ W)

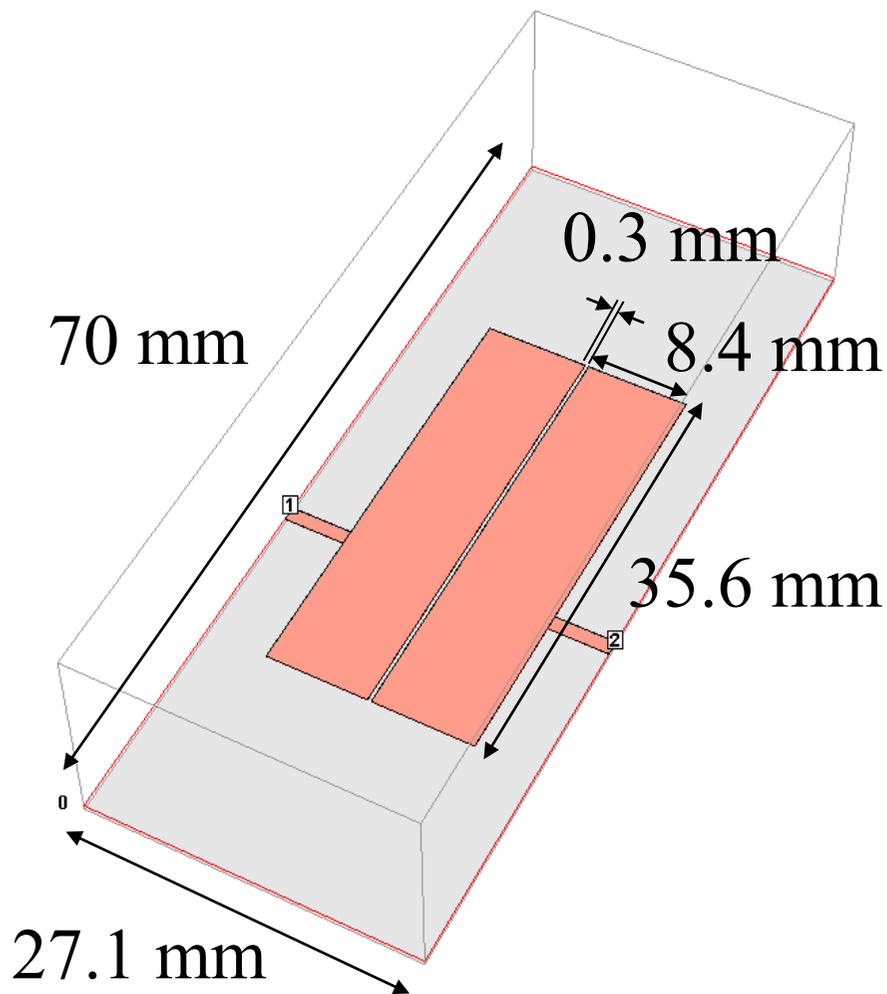
中心周波数57 MHz
530 MHz~824 MHz
局所(LO)発振器

S/N比が劣化し、
情報が復調不可

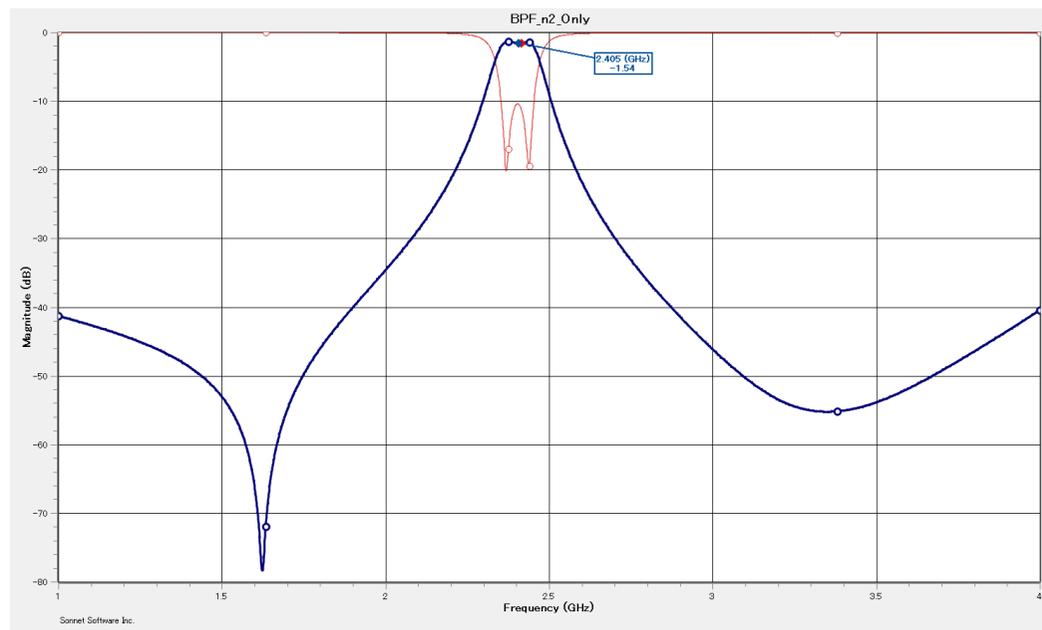
一例として、地デジ受信機(スーパーヘテロダイン方式)の一部のブロック図

参考文献:
川口 英, 辰巳 博章, “地デジ受信機のしくみ,” CQ出版株式会社, pp. 29-30, 2010年7月.
CQ出版社, トランジスタ技術 2008年11月号, pp. 99-175.

負性抵抗回路を装荷しない通常の共振器



2本の導体共振器で構成される
2段バンドパスフィルタ(BPF)



2段BPFの周波数特性

通過特性-1.5 dBとなり、
入力電力が30%程度損失

BPFの損失を最小限とする従来方法

- 共振器の無負荷Q値 Q_0 *の高Q値化
 - 共振器形状をパッチ形状やSIW**構造
- Q_0 は500~1000程度までは実現可。

* 高いほど
共振器の損
失が低い
** Substrate
Integrated
Waveguide

回路サイズが大きくなる傾向。

- 材料を変え、導体を超伝導化、誘電体材の低 $\tan\delta$ 化、共振器からの放射を抑制する形状

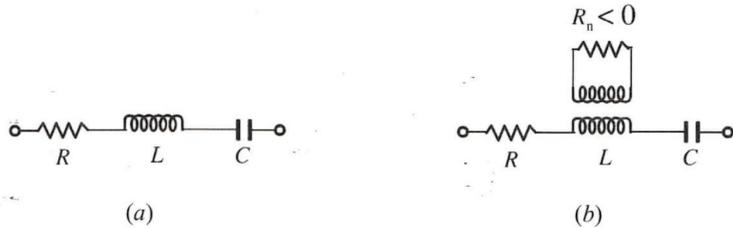
→ 損失が低い材料は材料費、運用コストが高額になる傾向。

従来技術とその問題点

従来技術では…

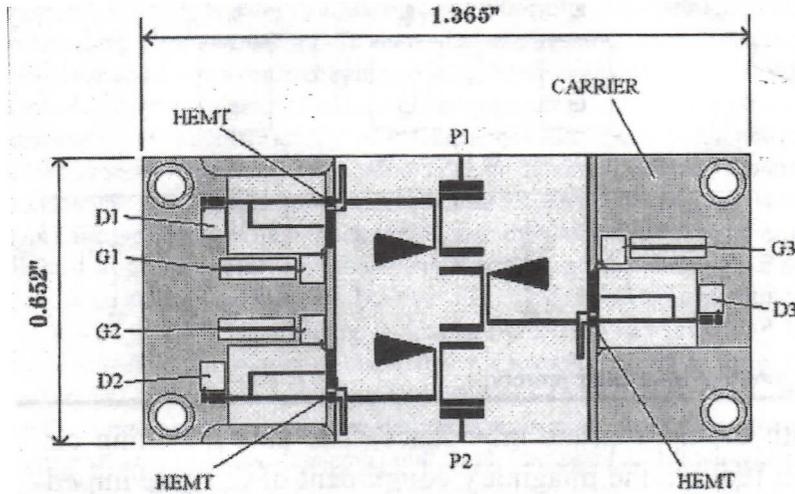
HEMTやFETにより実現可能な負性抵抗値は制限があり、負性抵抗回路を活かした共振器の高無負荷Q値が困難であった

従来技術の実施例

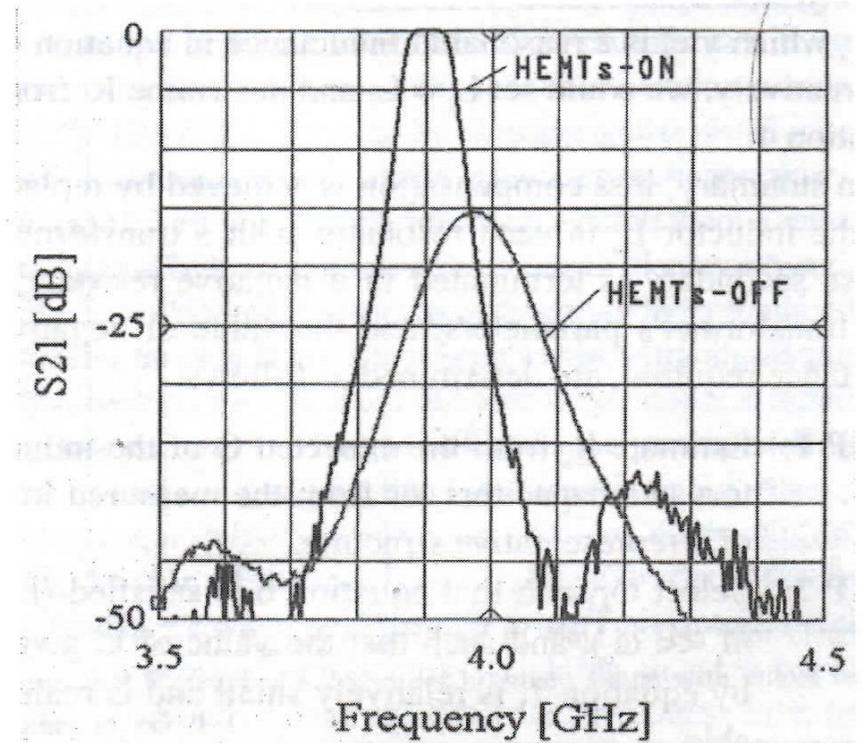


通常共振器の等価回路

負性抵抗を用いた共振器の等価回路

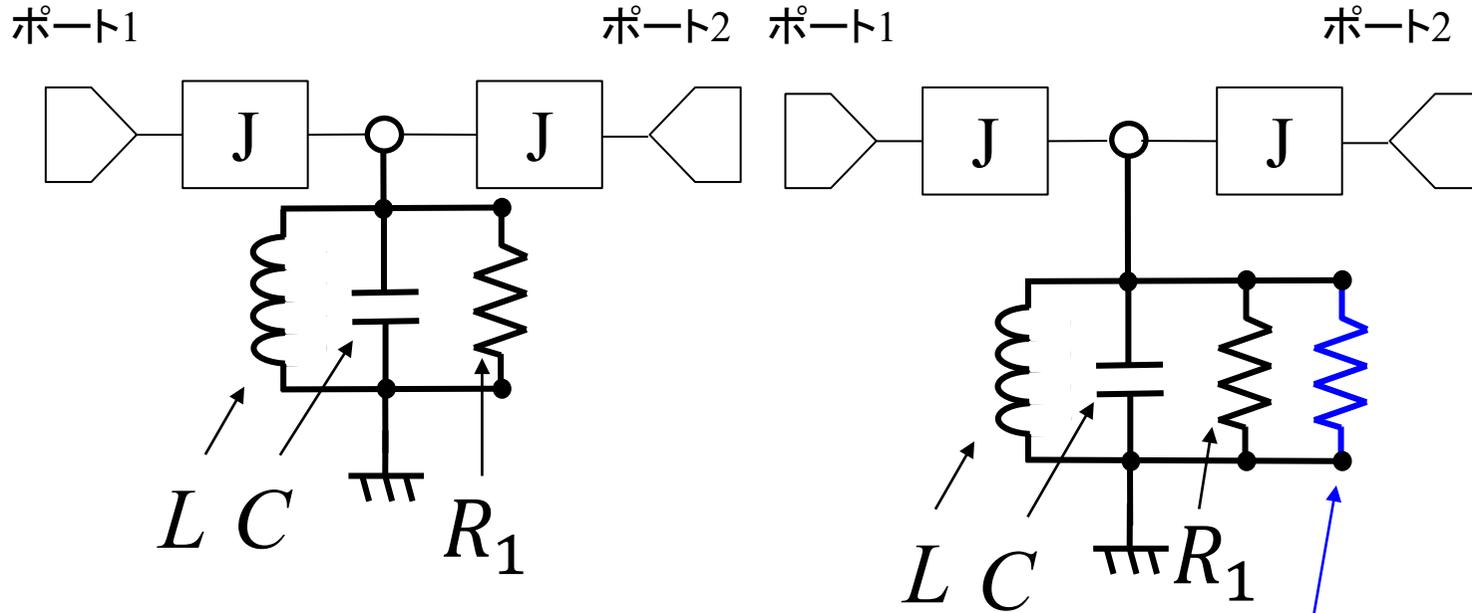


マイクロストリップ線路型
3段active filter



周波数特性

本技術の発明(等価回路)

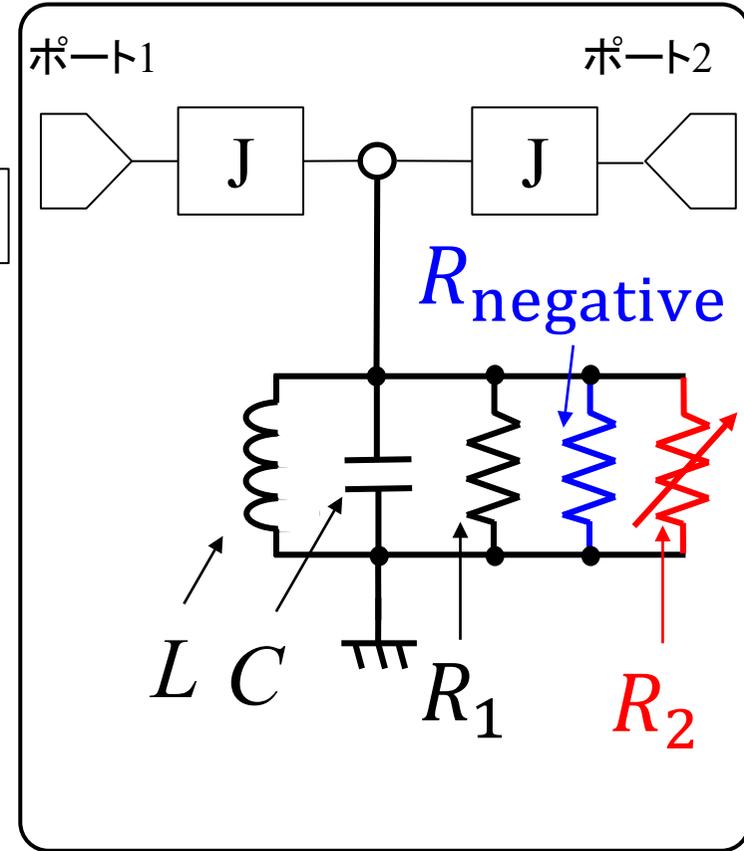


R_1 は共振器導体の抵抗,
誘電体基板の $\tan\delta$,
共振器からの放射に起因する損失

Jはポートと共振器間の電磁界結合

通常の共振器の等価回路

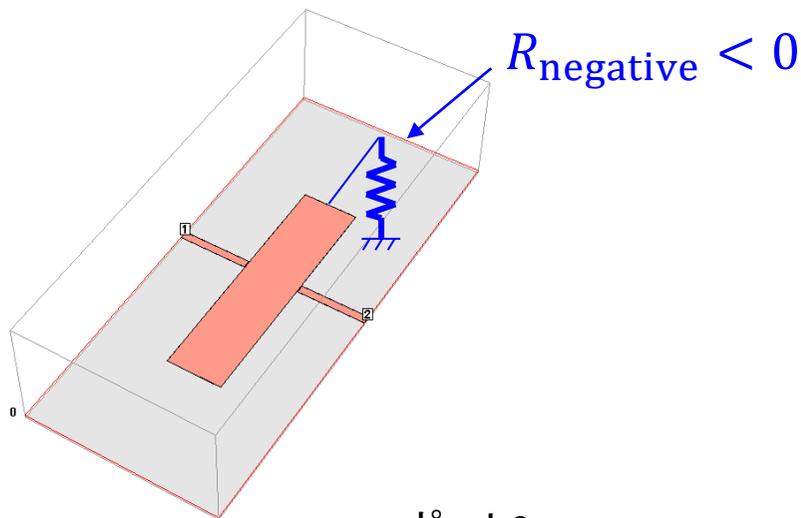
従来の負性抵抗を用いた共振器の等価回路



本発明の共振器の等価回路

負性抵抗回路に加え、あえて抵抗器(R_2)を追加して高無負荷Q値化

負性抵抗のみを活用した共振器



Q_0 の式

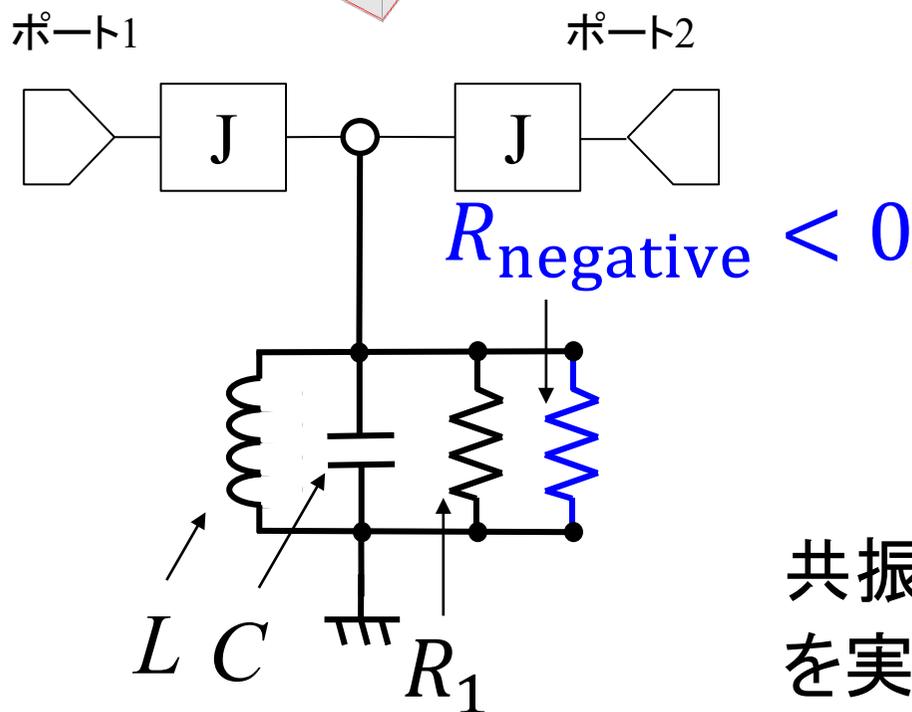
$$Q_0 = \omega_0 C \frac{1}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_{negative}}}$$

$$= \omega_0 C \frac{R_1 R_{negative}}{R_1 + R_{negative}}$$

抵抗成分がゼロとなると、 $Q_0 \rightarrow \infty$
(共振器が理想的には無損失)

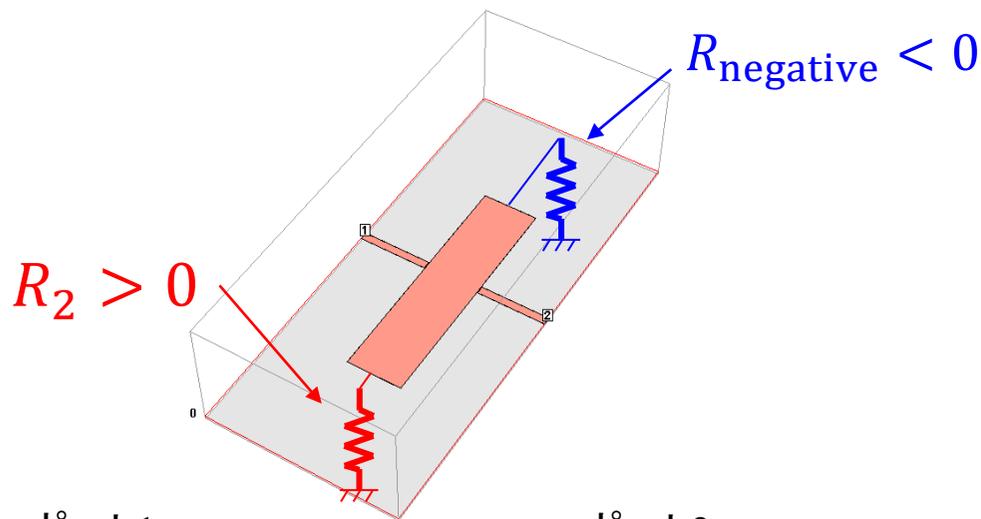
$$\therefore R_1 + R_{negative} = 0$$

$$R_{negative} = -R_1$$



共振器の寄生抵抗にぴったり合う $R_{negative}$ を実現する必要があり、非常に困難

(本発明)負性抵抗と抵抗器を活用した共振器



Q_0 の式

$$Q_0 = \omega_0 C \frac{1}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_{negative}} + \frac{1}{R_2}}$$

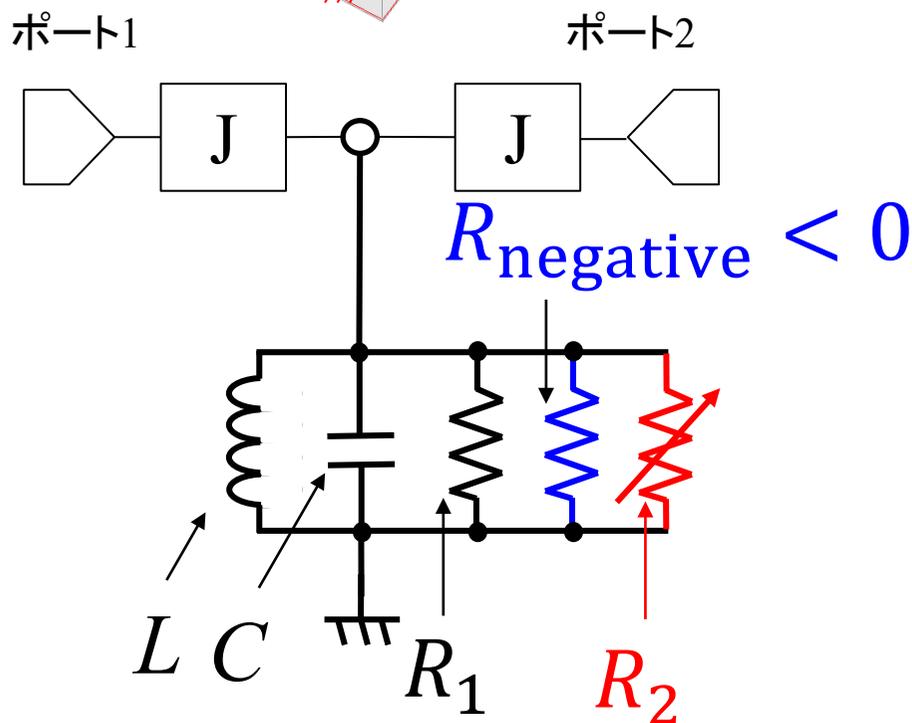
$$= \omega_0 C \frac{R_1 R_2 R_{negative}}{(R_1 + R_2) R_{negative} + R_1 R_2}$$

抵抗成分がゼロとなると、 $Q_0 \rightarrow \infty$
(共振器が理想的には無損失)

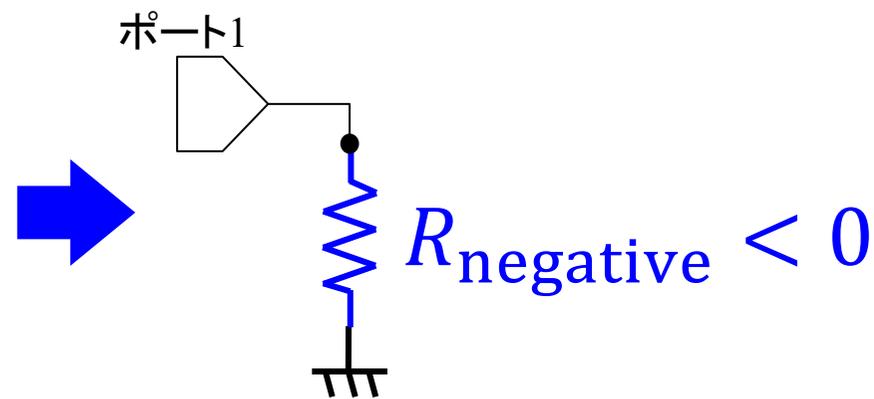
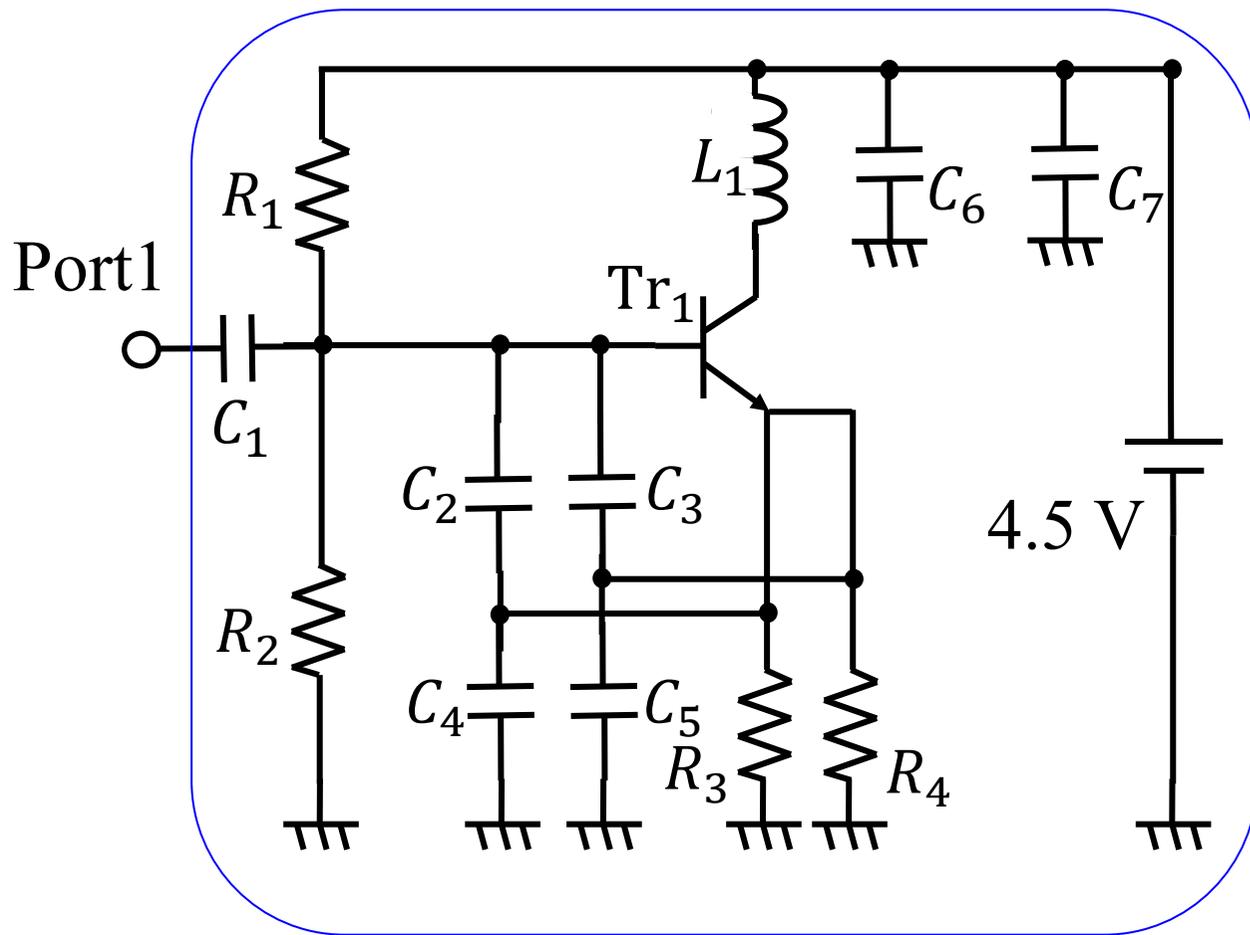
$$\therefore (R_1 + R_2) R_{negative} + R_1 R_2 = 0$$

$$R_2 = \frac{-R_1 R_{negative}}{(R_1 + R_{negative})}$$

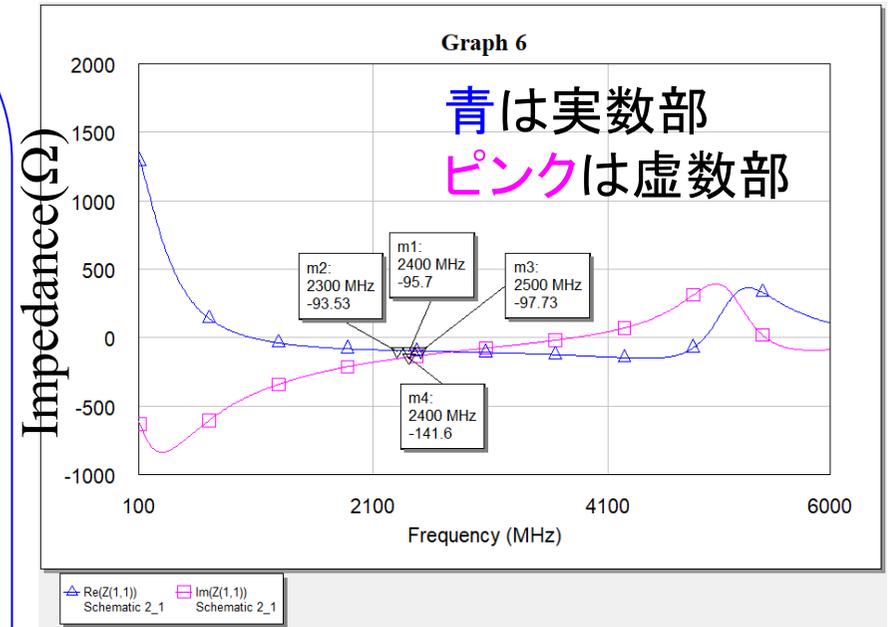
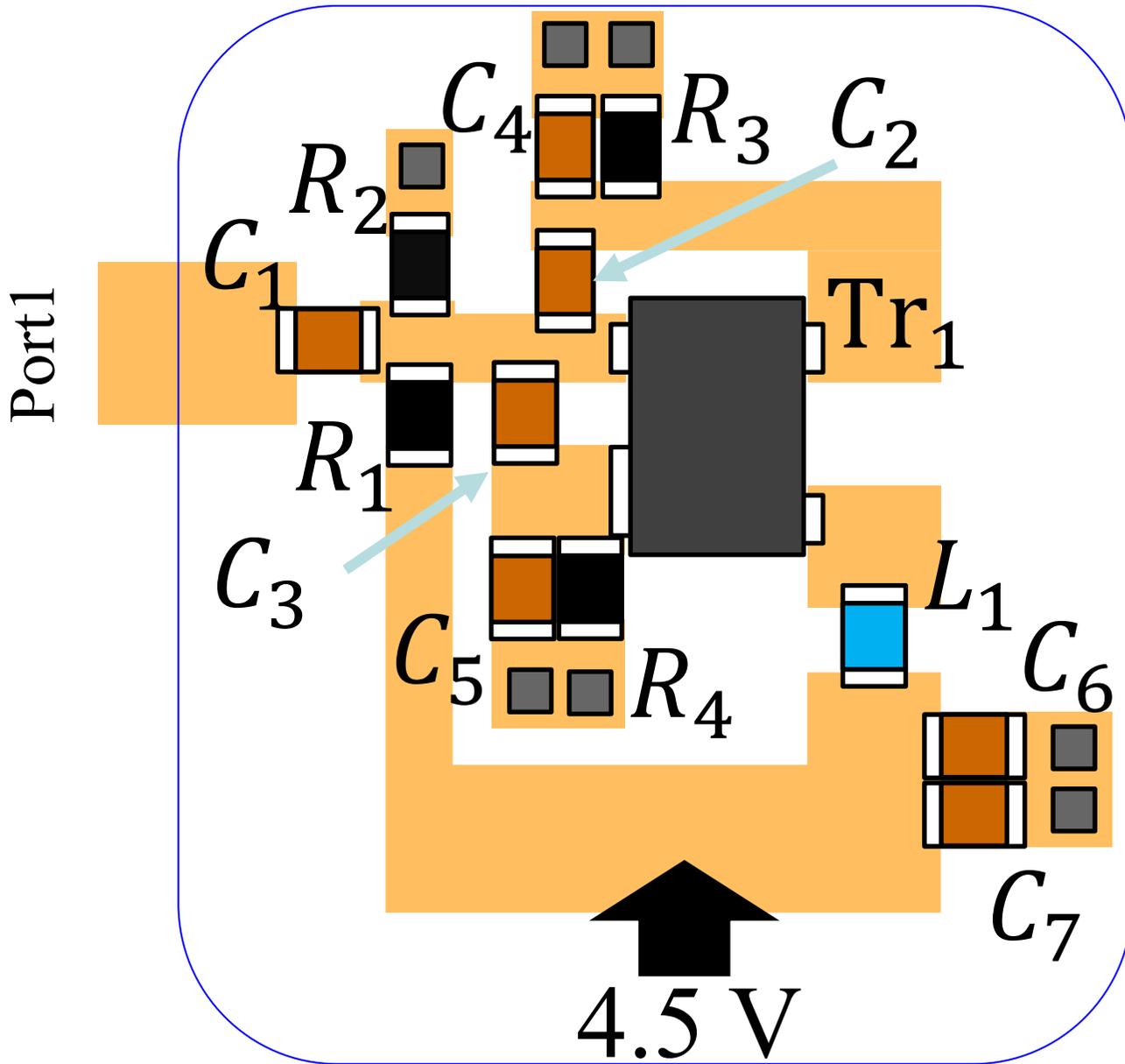
実現できる $R_{negative}$ を考慮して、 R_2 を敢えて装荷し、設計自由度が拡大



負性抵抗を実現する回路の回路図

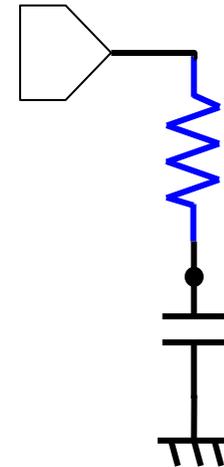


負性抵抗回路の配線図と周波数特性



2.4 GHzでの等価回路

ポート1

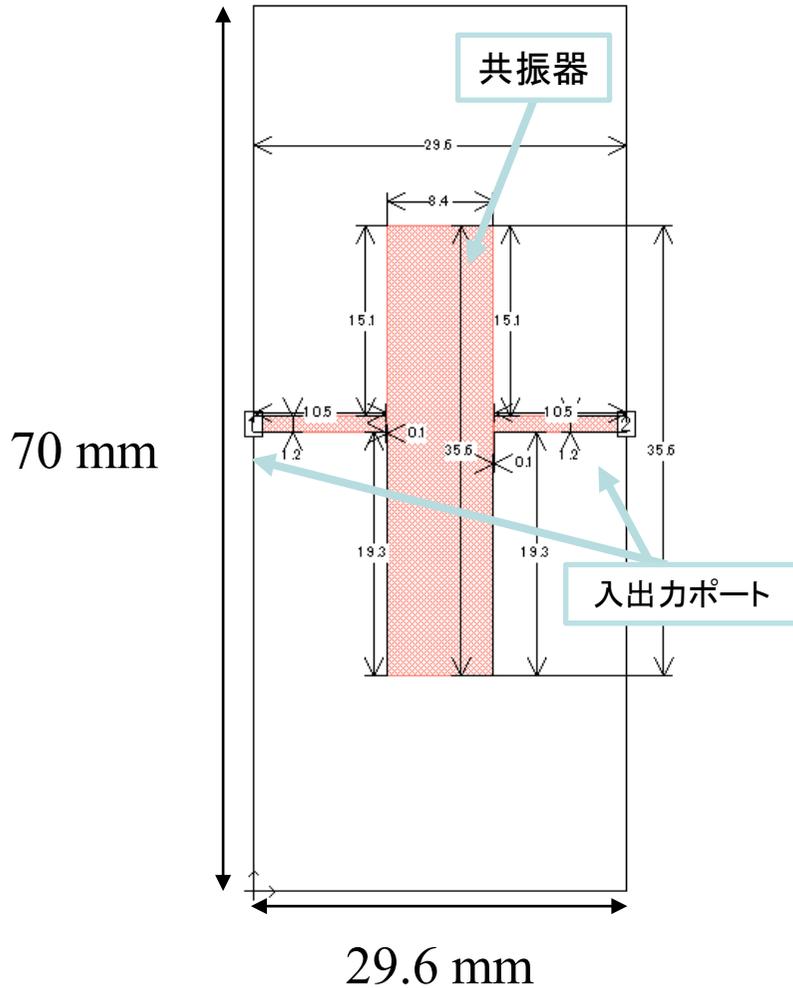


$$R_{\text{negative}} = -95.7 \Omega$$

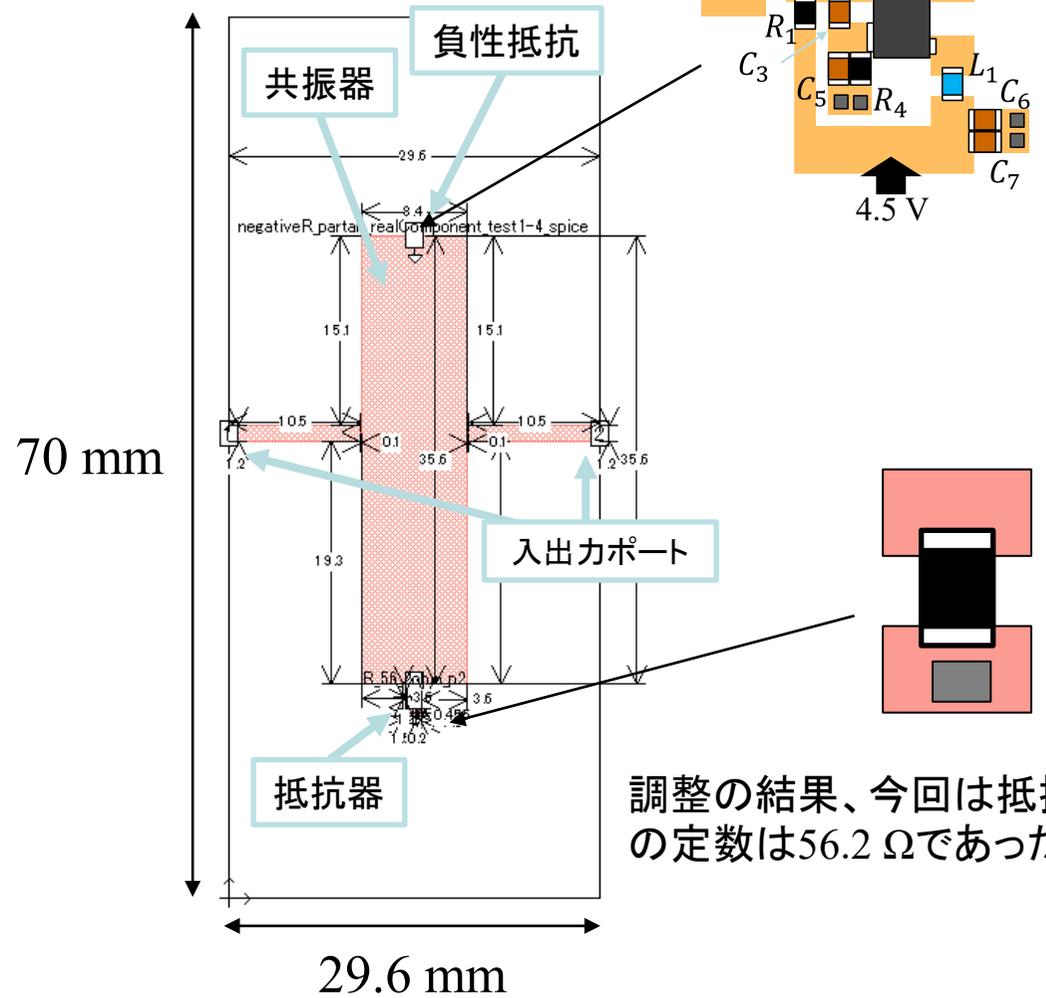
$$0.468 \text{ pF}$$

各共振器の Q_0 の比較(シミュレーションモデル)

共振器のみと負性抵抗・抵抗器のありの場合の Q_0 を比較



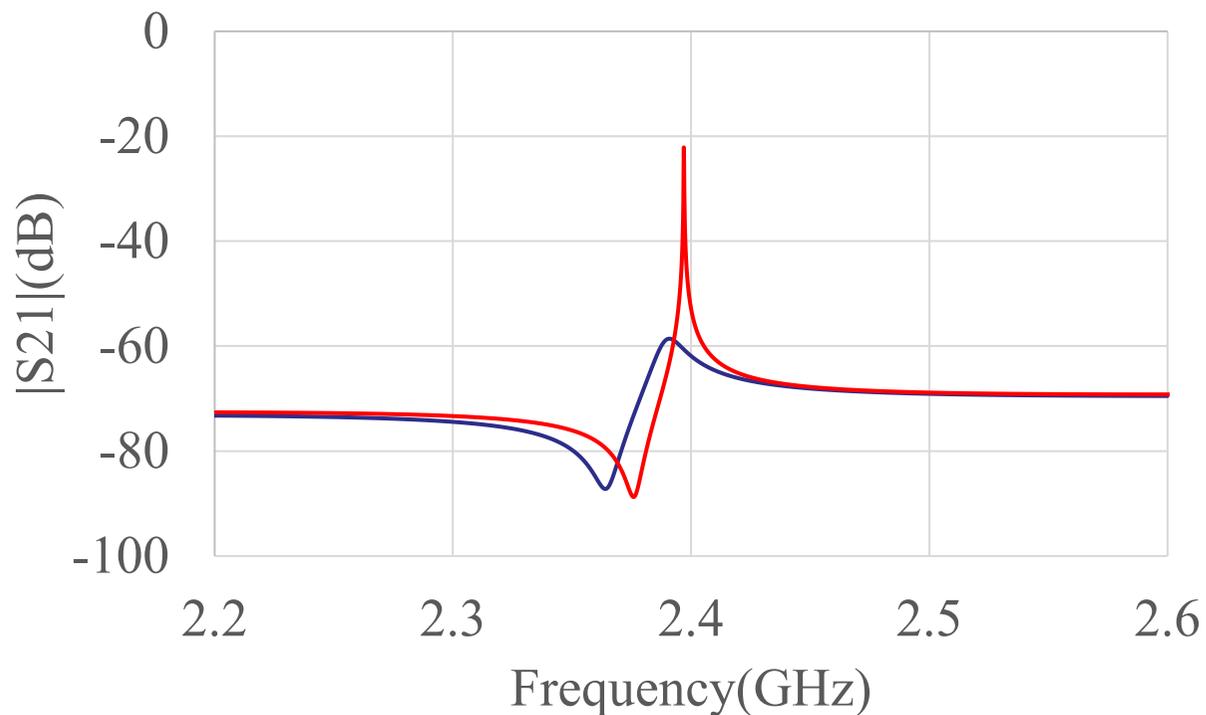
共振器のみ



(本発明)負性抵抗・抵抗器あり

調整の結果、今回は抵抗器の定数は56.2 Ω であった。

各共振器の周波数特性と Q_0



共振器単体 -
負性抵抗と抵抗 -

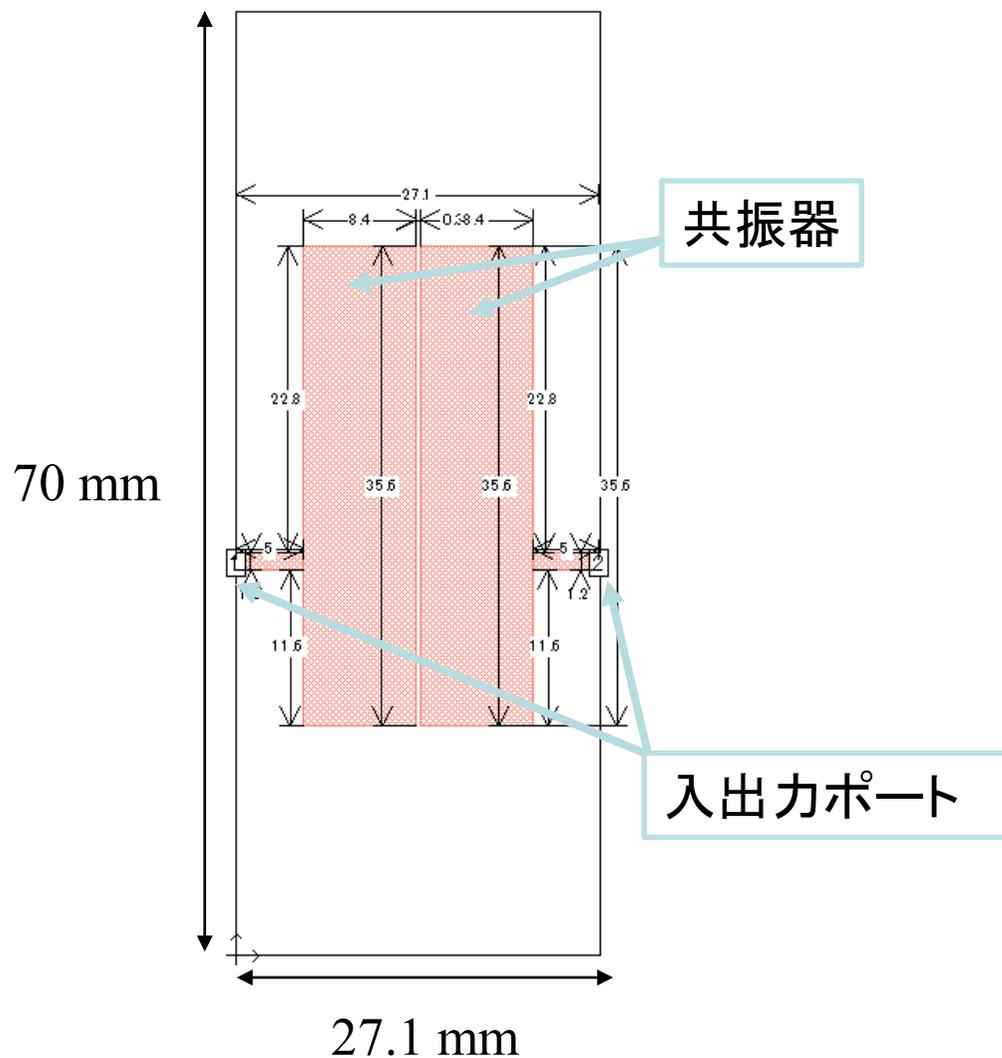
各無負荷 Q 値

共振器単体 :200
負性抵抗と抵抗 :10536

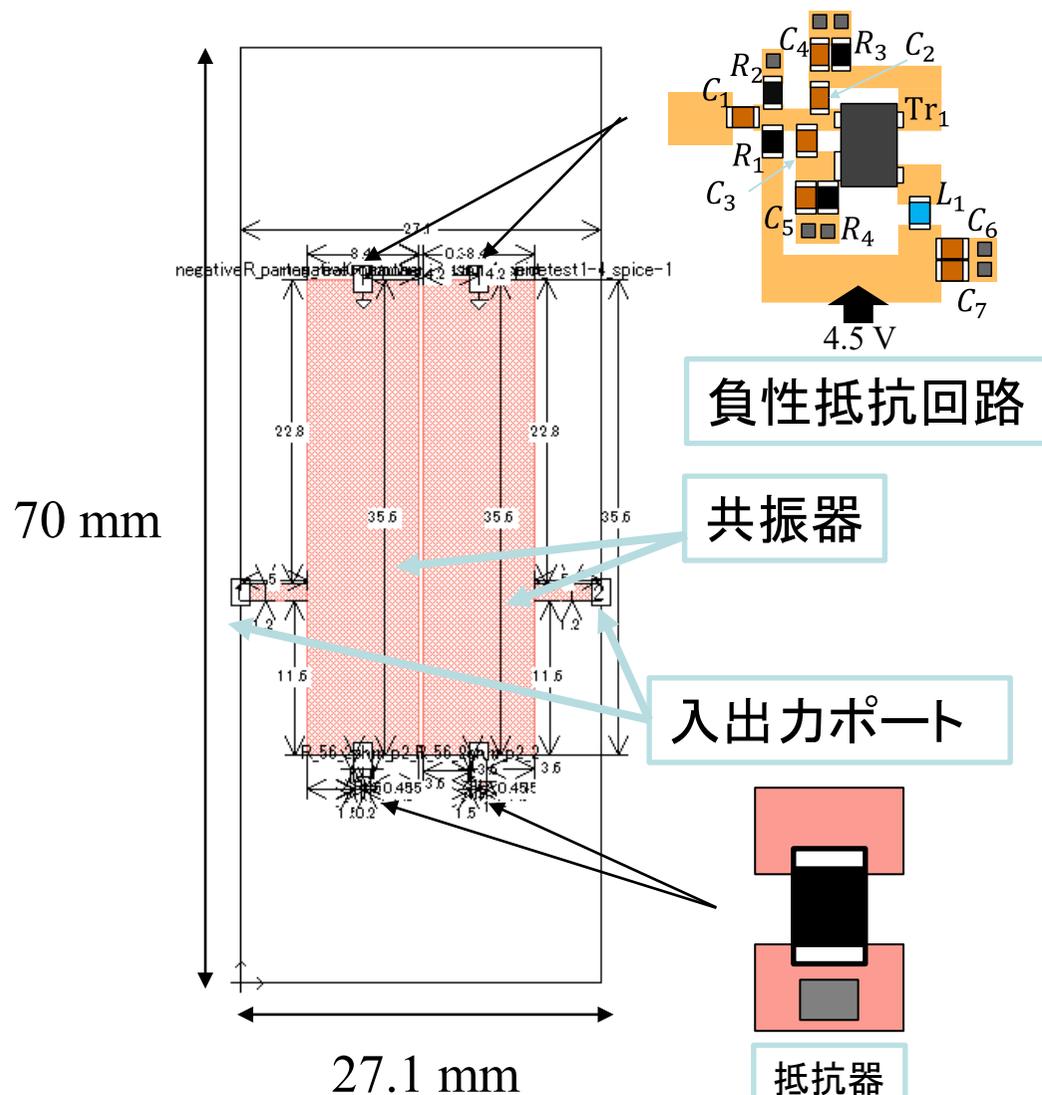
電磁界シミュレーション結果

負性抵抗と抵抗器の効果により Q_0 がおよそ50倍改善

本発明の共振器を用いた2段BPFの設計

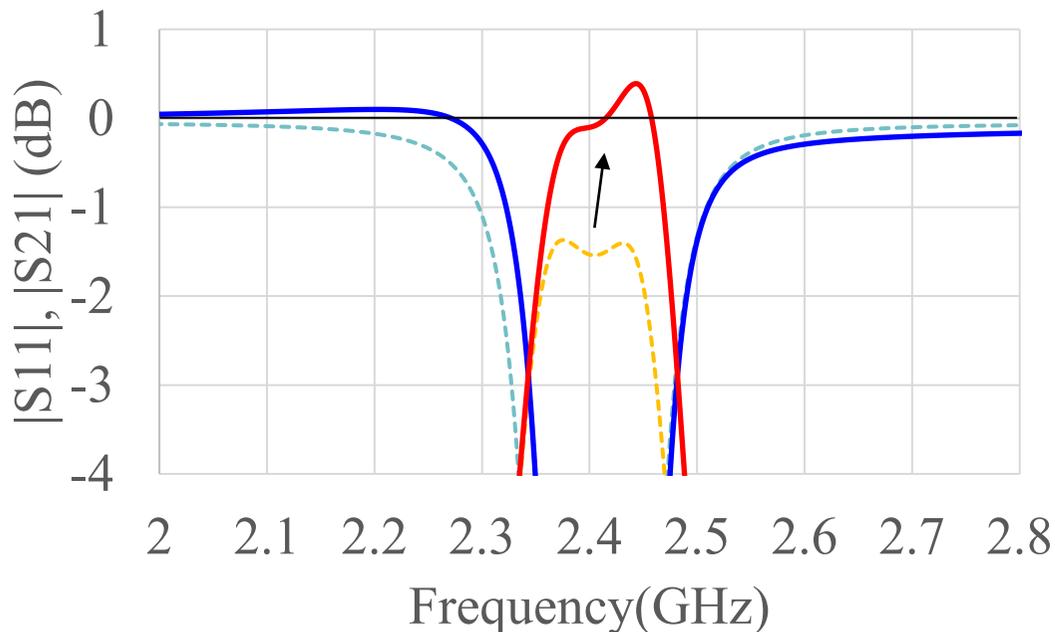


何も装荷されていない共振器
で構成した2段BPF



負性抵抗+抵抗器ありの
共振器で構成した2段BPF

負性抵抗回路の配線図と周波数特性

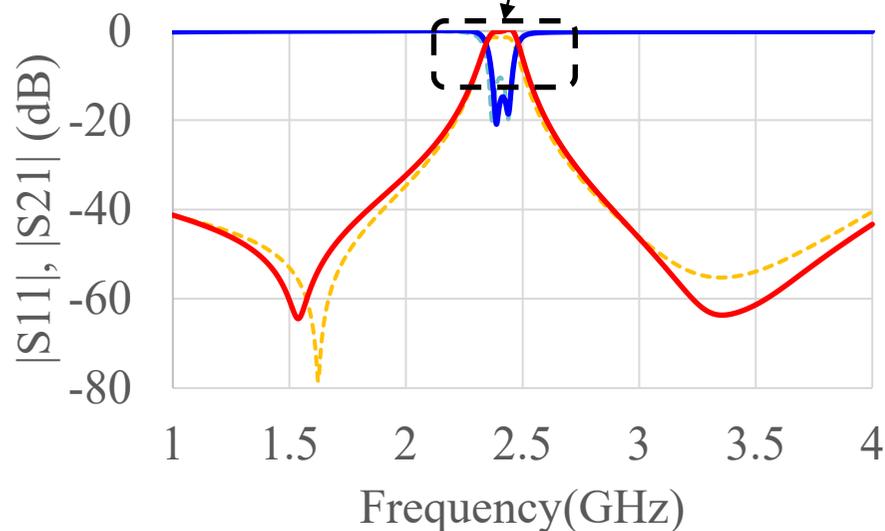


共振器単体 破線
負性抵抗と抵抗 実線

S21(dB)の最大値

共振器単体 :-1.369 dB
負性抵抗と抵抗 : **0.3904 dB**

通過帯域付近拡大図



おおよそ平坦な通過特性で
ほぼ0 dBを実現

通過帯域内において
入力電力の損失なし

新技術の特徴・従来技術との比較

- 負性抵抗を用いた共振器の高 Q_0 化は負性抵抗値実現範囲と共振器の抵抗値と合わせる事が困難であった。
- 従来技術の問題点であった、共振器の低 Q_0 を**負性抵抗とあえて抵抗器を加える構成**とすることで高い Q_0 を実現した。
- 本技術の適用により、 Q_0 が**200程度から10000までおよそ50倍改善**し、2段BPFでは低い挿入損失が実現でき、高周波システムにおいてS/N比の高い信号が提供可能

想定される用途

- 小型、低損失、高性能なSAW, BAW, FBAR フィルタは現状はおおよそ10 GHz程度までが限界であるが、本発明は薄膜加工技術も組み合わせることで10 GHz以上で低損失なBPFが提供できる可能性がある。
- 上記以外に、高い Q_0 を必要とする共振器を用いた高周波回路への横展開も期待される。

実用化に向けた課題

- $R_{negative}$ はおおよそ一意に負性抵抗値が決まるため、設計自由度の拡大を検討中である。
- $R_{negative}$ と R_2 の許容差と回路定数の変化に対する影響についてシミュレーション、実験データを取得し、もし高い Q_0 を持つ共振器として動作しない条件があれば、それを克服できる技術を開発する。
- 実用化に向けて、設計理論の精度が低いため、回路解析技術を駆使し初期値の段階で高 Q_0 が実現可能な条件を絞り込むことが必要。

企業への期待

- 5G, 6Gのように非常に高いキャリア周波数のシステムにおいてもBPFは必須であり、本技術により克服できると考えている。
- 高周波回路の共振器やフィルタ技術を持つ、または必要とする企業様との共同研究を希望。

本技術に関する知的財産権

- 発明の名称 : 共振器及びバンドパスフィルタ
- 出願番号 : 特願2023-043489
- 出願人 : 電気通信大学
- 発明者 : 塩竹 明人, 成田 剛, 小野 哲

お問い合わせ先

国立大学法人電気通信大学
産学官連携センター
産学官連携ワンストップサービス

TEL 042-443-5871

FAX 042-443-5725

E-mail onestop@sangaku.uec.ac.jp