

## 正方形非線形スプリットリング共振器の作製と電磁波反射特性

## Fabrication and reflection characteristics of square-shaped nonlinear split-ring resonators

○小山田祥太<sup>1</sup>, 前田博史<sup>1</sup>, 二見隆晴<sup>1</sup>, 五十嵐健太<sup>2</sup>, 鈴木薫<sup>3</sup>, 胡桃聡<sup>3</sup>, 松田健一<sup>3</sup>  
 \*S. Oyamada<sup>1</sup>, H. Maeda<sup>1</sup>, T. Futami<sup>1</sup>, K. Igarashi<sup>2</sup>, K. Suzuki<sup>3</sup>, S. Kurumi<sup>3</sup>, K. -i. Matsuda<sup>3</sup>

**Abstract:** スプリットリング共振器 (Split-Ring Resonator: SRR) は, 電磁波フィルターや MEMS におけるセンサーとして注目されている. そこで本研究では, SRR のスリット部分にバラクタダイオードを挿入し, 外部から共振特性を変調可能にした非線形 SRR (nonlinear SRR: nSRR) を作製した. その nSRR の環状構造部分は, 電磁波応答特性に異方性を導入するために正方形とした. また電磁波応答特性を測定した.

## 1. 背景と目的

現在, 電磁波を用いた様々な非接触デバイスが開発され, 小型化・高機能化が進んでいる. 特に  $10^9\sim 10^{12}$  Hz 程度の周波数帯における電磁波フィルターやセンサーなどのデバイスが注目されている[1,2].

スプリットリング共振器 (SRR) は, 単純な金属の環構造の一部にスリットが設けられている構造であり, 環構造がインダクター, スリット構造がキャパシターとして働く. これが一種の LC 共振器となるために, 様々な構造体と組み合わせることで電磁メタマテリアル等への応用もなされている[3].

SRR は, その構造が単純であるが故に, 電磁波に対する応答も単純であり周波数特性を外部から変調することが困難であるという問題があった. この問題に対し, 半導体デバイスの空乏層容量をスリット部分に挿入することで, 周波数特性を外部から変調可能なものが作製されるようになった[4]. これは非線形スプリットリング共振器 (nSRR) として知られている.

本研究では, スリット部分にバラクタダイオードを挿入した nSRR を作製し, またその電磁波反射特性を測定することを目的とした. 今回作製する nSRR の環状構造部分は, 正方形とした. これは等方的な対称性をもつ円形 nSRR に対して, 正方形の幾何学的な対称性が電磁波応答特性に異方性を導入することを期待しているためである. 電磁波反射特性の測定に際して, 照射する電磁波パワーを変化させ, それによる共振周波数の変化を観測することを行った.

## 2. 実験方法

図 1 (a) に, 実際に作製した正方形 nSRR の光学写真, また図 1 (b) には正方形 nSRR の設計寸法を示す. 正方形 nSRR は外径 7 mm, 内径 6 mm, スリット幅 0.7 mm, 厚み 40  $\mu\text{m}$  の構造となっている.

スリット部分に挿入するバラクタダイオードは SKYWORKS 社 SMV1234-079LF を採用した. 取り付け方法は, 環構造上を流れる電流が時計回り, 反時計回りのどちらの場合でも, どちらかのダイオードが逆バイアスになるよう, スリット部分の極性が同じになるよう行った.

測定はベクトルネットワークアナライザを用い, ループアンテナにより電磁波を正方形 nSRR に照射して電磁波の共振特性を確認した. また, 照射パワーを変え, 共振特性を調べた.

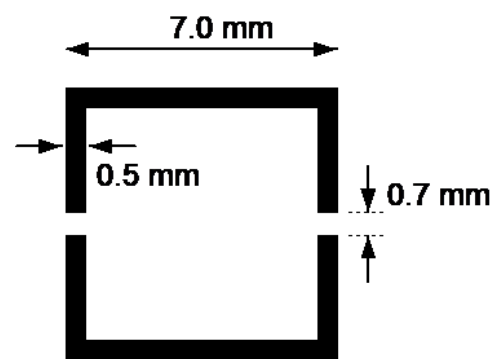
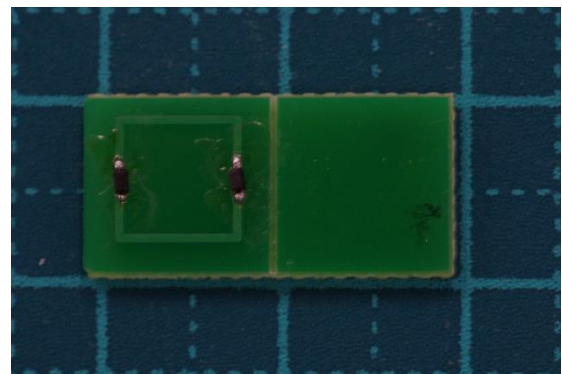


図 1 : (a) 作製した正方形 nSRR の光学写真, (b) 正方形 nSRR の設計寸法

1 : 日大理工・学部・電気 2 : 日大理工・院 (前)・電気 3 : 日大理工・教員・電気

### 3. 実験結果

図2に正方形 nSRR の電磁波反射特性と、その電磁波照射パワー依存性を示す。照射パワーはそれぞれ 5, 0, -5, -10 dBm とした。

照射パワーが -10 ~ 5 dBm へ増加するにしたがって、 $S_{11}$  の周波数依存性のなかの共鳴状態を示すディップが高周波側に移動していくことが分かる。またディップは浅く半値幅も広がっていく様子が観測された。すなわち、Q 値という意味では、照射パワーが小さいときのほうが良い値を示す。

以前作製した円形 nSRR と比較すると、正方形 nSRR はループ面積が大きいため、共振周波数自体の大きさが低周波側に移動しているという違いがあるが、それ以外に大きな違いは見出されなかった。

図3は共振周波数の照射パワー依存性を表すグラフである。照射パワーを -10 ~ 5 dBm へ大きくしていくと、この範囲では共振周波数が非常にきれいに二次関数的に増加していることが分かる。

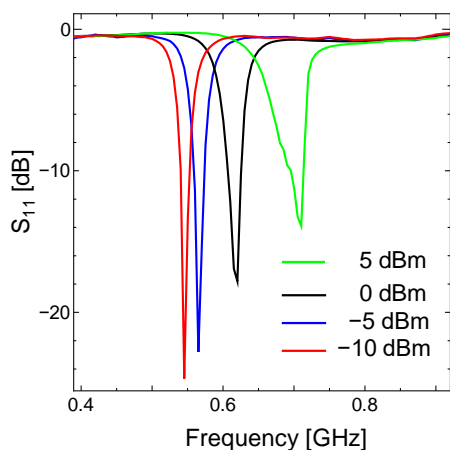


図2：正方形 nSRR の電磁波反射特性 ( $S_{11}$ ) とそのパワー依存性

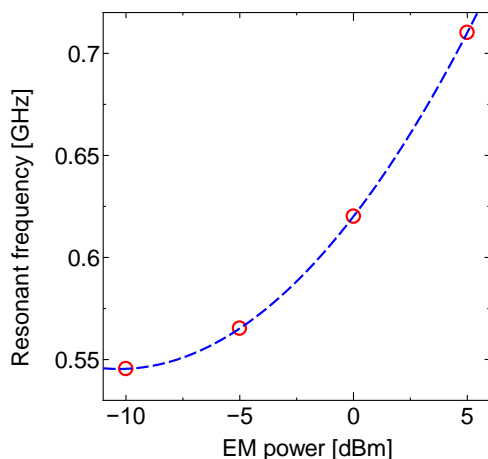


図3：共振周波数の照射パワー依存性

### 4. まとめ

本研究では、メタマテリアルの一種であるスプリットリング共振器（正方形）を作製し、周波数特性の測定を行った。その結果、電磁波の照射パワーを大きくしていくと、ディップは幅が大きくなり、また高周波側に移動する周波数特性が分かった。

また、共振周波数は二次関数的に大きくなることが分かった。

今後は正方形 nSRR を複数枚重ねた場合の周波数特性を測定し、距離依存性について調べる。

### 5. 参考文献

- [1] 宮丸文章, “物性研究” Vol. 6, No. 4, pp. 2-6 (2017)
- [2] 堀越智, “メタマテリアル” 日刊工業新聞社, pp. 78 - 87 (2013)
- [3] M. Lapine, et al., Rev. Mod. Phys., Vol. 86, No. 3, pp. 1-2 (2014)
- [4] B. Wang, et al., Opt. Express, Vol. 16, No. 20, pp. 2-3 (2008)