

正方形非線形スプリットリング共振器の共振特性に対する光制御

Electromagnetic wave reflection characteristics of a square nonlinear split ring resonator by optical control

○長谷川航大¹, 荒木拓海¹, 中村颯汰¹, 前田博史², 鈴木薫³, 胡桃聡³, 松田健一³
*K. Hasegawa¹, T. Araki¹, S. Nakamura¹, H. Maeda², K. Suzuki³, S. Kurumi³, K.-i. Matsuda³

Abstract: スプリットリング共振器 (SRR) は電磁波に対して共振特性を持ち、電磁波フィルタ等への応用が期待されている。本研究では、半導体を利用した非線形スプリットリング共振器に対して、フォトカプラーを介したバイアス制御回路を同一基板上に作製し、その電磁波反射特性を測定した。フォトカプラーへの入力電流によって共振器の共振周波数は線形に制御可能であることがわかった。

1. 研究背景

近年、電磁波、及び光デバイスの研究・開発が精力的に行われている。分割リング共振器 (split-ring resonator: SRR) はその例であり、電磁波フィルタや各種センサへの応用が期待されている。

SRR は金属円環の一部にスリットが設けられた構造を持ち、円環部分がインダクター (L)、スリット部分がキャパシタ (C) の成分を持つため、等価回路はRLC直列回路と見なすことができる。従って、共振周波数と一致する電磁波に対して、大きな共鳴現象を示す。

この特性を利用して、これまで SRR は、電磁メタマテリアルの構成要素としてしばしば用いられてきた。

一方、従来の SRR は L と C の値が構造によって決まるため、共振周波数が制御できない点が、応用上の問題点として考えられてきた。

これに対して、SRR のスリット部分に、バラクタダイオードを挿入し、その空乏層容量を制御することで共振特性の制御を可能にした非線形 SRR (nonlinear SRR: nSRR) が考案された。空乏層容量の制御は、バラクタダイオードに印加される逆バイアス電圧を通じて行うが、その方法としては様々な方法が考えられる。

そこで本研究の目的は、正方形非線形分割リング共振器を作製し、その電磁波反射特性を調べることで、また、共振特性制御にフォトカプラーを用いることで、電氣的に非接触な状態での共振特性制御を行うこととした。

2. 実験方法

本研究で作製した正方形 nSRR の金属円環部分の構造を図 1 (a) に、また周辺回路も含んだ実際のデバイスの写真を図 1 (b) に示す。図 1 (a) において、内径 D は 5.0 mm、線幅 W は 0.5 mm、厚さ t を 35 μm とした。円

環上の左右のスリット部分にはバラクタダイオード (Skywork 社製 SMV1234-079LF) を並列に挿入した。

図 2 には、デバイス全体の回路図を示す。フォトカプラーに電流を印加することによって内部の発光素子が発光し、それを受光側が受け取ることによってバイアス電圧が発生する。従ってフォトカプラー側の入力電流 I_F を制御することにより、空乏層容量の大きさを変化させる。

このような単層 nSRR の電磁波反射特性 (S_{11} パラメータ) を Tektronix 社製ベクトルネットワークアナライザ (TTR503A) を使用し、測定した。

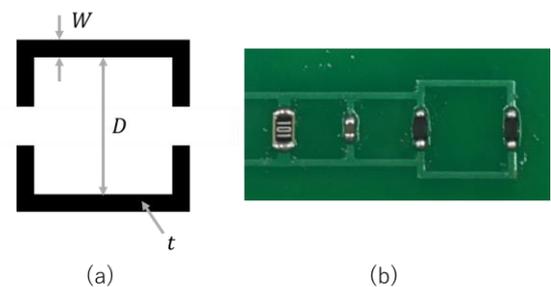


Figure 1. (a) Dimensions of split-ring resonator; $D = 5.0$ mm, $W = 0.5$ mm, $t = 35$ μm .
(b) Photograph of the nSRR used in the study.

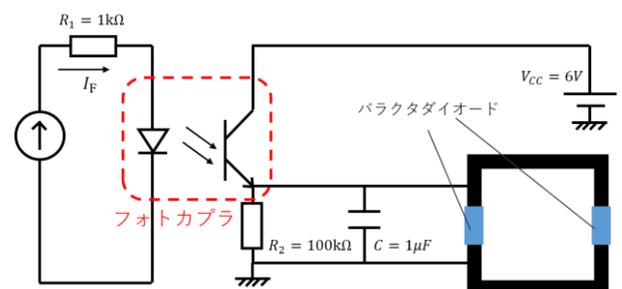


Figure 2. Circuit for the optical control

3. 実験結果

正方形 nSRR の S_{11} - 周波数特性を図3に示す. 測定時に照射した電磁波のパワーは -6 dBm とした. 図に示している電流 I_F はフォトカプラの入力電流であり, 0.0 ~ 5.0 mA の範囲で変化させた.

電流 $I_F = 0$ mA の基本状態で, およそ 0.7 GHz 付近に共振特性を示すディップが見られる. また I_F を増加させると, ディップの位置が高周波側に移動していることがわかる. またディップは高周波側に移動すると深くなる傾向も見られた.

図4は共振周波数 - フォトカプラ入力電流の関係である. フォトカプラに流れる電流を大きくしていくと,

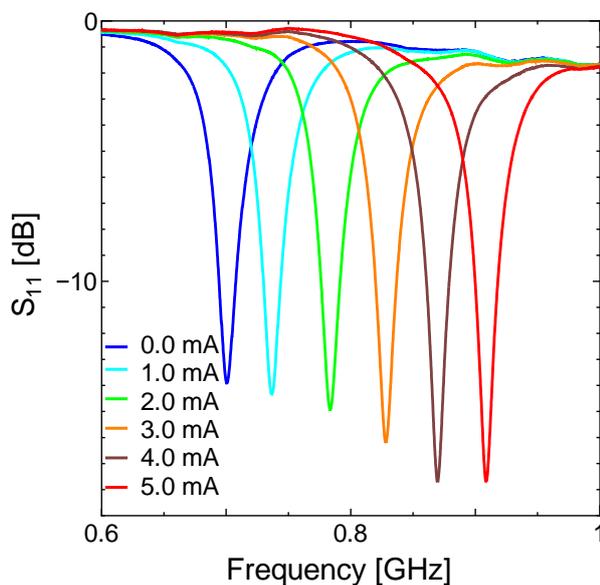


Figure3. S_{11} -frequency characteristics for a single nSRR.

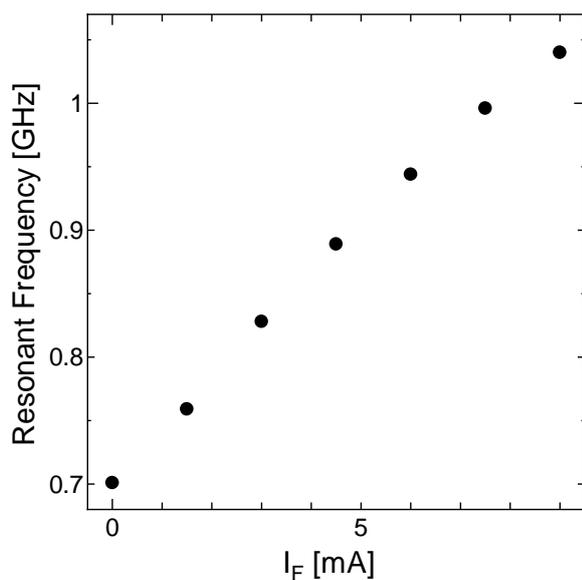


Figure4. Resonance frequency-dependency of current flowing through the photocoupler.

共振周波数が線形に増加していくことがわかる. 入力電流に対する共振周波数の変化量は, およそ 0.043 GHz/mA であり, この範囲でほぼ完全に比例関係にあることがわかった. フォトカプラーへの入力電流は, その内部での光量の制御になっていることから, 今回の方法で光を介した nSRR の周波数特性の制御が可能であることが示された.

従来は, nSRR に対して照射する電磁波のパワーや, 半導体部分への電氣的バイアス制御を直接回路によって共振特性を制御してきた. 一方今回は, バイアス回路自体は基板上に組み込まれているものの, その制御は光を使っている点で, 外部とは電氣的に切り離された形での制御を示す結果となった.

4. まとめ

本研究では, フォトカプラによって電磁波に対する応答が制御可能なスプリットリング共振器を作製し, 単層において実験的に調べた. その結果, フォトカプラに流れる電流に対して共振周波数は線形性が良く, 光制御は非常に制御性がよいことが観測された. 今後は nSRR を重ねて複層での相互作用による電磁波反射特性の変化を調査していく.

5. 参考文献

- [1] M. Lapine, et al., "Colloquium: Nonlinear metamaterials", Rev. Mod. Phys., **86**, 1093 (2014).
- [2] I. V. Shadrivov, et al., "Tunable split-ring resonators for nonlinear negative-index metamaterials", Opt. Express, **14**, 9344 (2006).
- [3] S. S. Seetharaman, et al., "Electromagnetic interactions in a pair of coupled split-ring resonators", Phys. Rev. B **96**, 085426 (2017).