

非線形スプリットリング共振器の作製と高周波応答特性の研究

High-frequency characteristics of nonlinear split-ring resonators

○趙 昀¹, 胡桃 聡², 鈴木 薫², 松田 健一²Yun Zhao¹, Satoshi Kurumi², Kaoru Suzuki², and Ken-ichi Matsuda²

Abstract: 本研究では、容量可変ダイオードを用いた非線形スプリットリング共振器 (nSRR) を作製し、その高周波応答特性を測定した。その結果、nSRR に照射する電磁波のパワーの増加に伴って、共振周波数も高周波側にシフトすることが分かった。周波数のシフト量は、パワーの自乗に比例する傾向があることも観測された。

1. 研究の背景と目的

電磁メタマテリアルは、人工的な構造体や複合材料を設計・製作することによって、自然界では実現し難い電磁波に対する応答特性を実現するものである[1]。近年、幅広い周波数領域においてメタマテリアルに関する研究が精力的に行われており、基礎と応用の両面から注目されている。

金属を用いたスプリットリング共振器 (Split-ring resonators: SRR) は、メタマテリアルを構成する基本構造としてしばしば用いられる。SRR は、リング状の金属環の一部にスリットが入った構造をしているため、環状構造の円周方向電流に対するインダクタ成分と、スリット構造部分のキャパシタ成分による LC 共振器として振舞うことが期待される。実際これまでに、細線状の金属構造と SRR の組み合わせによって、いわゆる左手系メタマテリアルを実現できることが実験的に確認されている[2,3]。

このような従来型の SRR は、その形状を適切に設計することによって共振周波数等の基本的な特性が決定される。一方、構造によってそれらの基本特性が固定されてしまうため、SRR を作製後に特性を調整したり、外部から各 SRR の周波数特性を制御することができないという欠点がある。

そこで本研究では、SRR のスリット部分に容量可変ダイオード(バラクタダイオード:Skyworks 社製 SMV1231-079)を挿入した非線形 SRR 構造を作製し[4,5,6]、外部から照射する電磁波のパワーによって共振周波数等の特性を変調可能な SRR を実現すること、また、その電磁波照射特性を明らかにすることを目的とした。

2. 実験方法

図 1 (a)に、今回作製した SRR の設計寸法を示す。銅製 SRR の外径は 7 mm、内径 6 mm、スリット幅を 0.7 mm とした。スリットは、円環上の 2 か所に設け、その部分には、バラクタダイオード (Skyworks 社製 SMV1231-079) を、

各々のアノードとカソードが共通になるようにはんだ付けした。実際に作製した SRR は図 1 (c) のようなものである。この SRR の理想的な等価回路は図 1 (b) に示すようになる。このような構造にすることで、リング上に誘起された電流は一方のバラクタダイオードを順方向に流れるが、他方のバラクタダイオードは逆バイアスの状況となるた

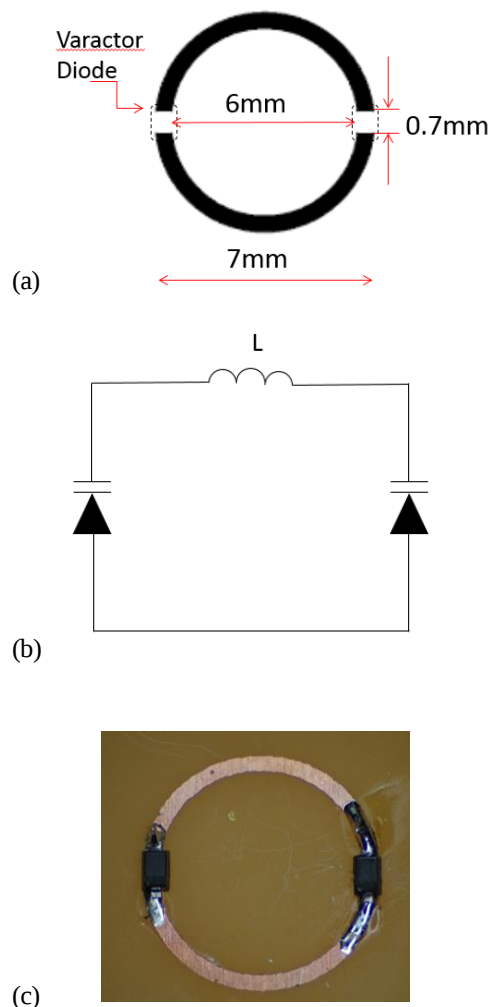


Figure 1. Schematics of the nSRR. (a) Dimensions of the nSRR, (b) Equivalent circuit model, (c) An image of the nSRR.

め空乏層形成による容量成分が発生する。空乏層容量は、

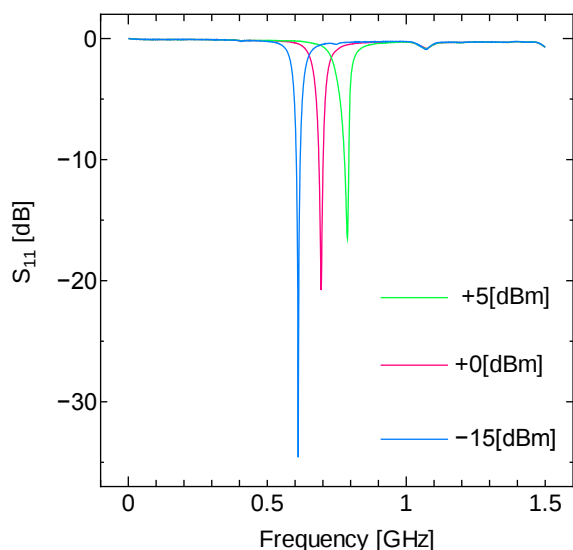


Figure 2. Power dependence of reflectance spectrum for the nSRR.

バイアス条件によって非線形に変化することから、SRR 自体の LC 共振特性も変化すると考えられる。

この非線形 SRR (nSRR) ひとつに対し、ループアンテナを用いて電磁波の反射特性 (S_{11} パラメータ) 測定を行った。

3. 実験結果

図 2 に、 S_{11} の周波数領域での測定結果を示す。照射パワーを -15 dBm から +5 dBm の範囲で変化させたものをプロットしている。0.7 GHz 付近に鋭いスペクトルが見られ、その共振周波数はパワーの増加に伴って高周波側にシフトすることがわかる。また、1.1 GHz 付近にはパワーに依存しない小さなスペクトルが見られる。

図 3 は、nSRR の共振周波数のパワー依存性を示している。パワーの増加に伴って共振周波数は次第に増加する傾向が見られる。具体的にはパワーの自乗に比例するような増加傾向となることが分かった。

これらの特性は、メタマテリアルの特性パラメータを外部から制御しようとする試み[5,6,7]において観測されている特性と良く一致していると考えられるが、共振周波数の値それ自体は比較的に低い値を示している。これは基板として用いた材料や金属薄膜の厚み等によって影響を受けて変化している可能性がある。

4. まとめ

本研究では、バラクタダイオードを組み合わせた非線形 SRR を作製し、その反射特性とそのパワー依存性を測

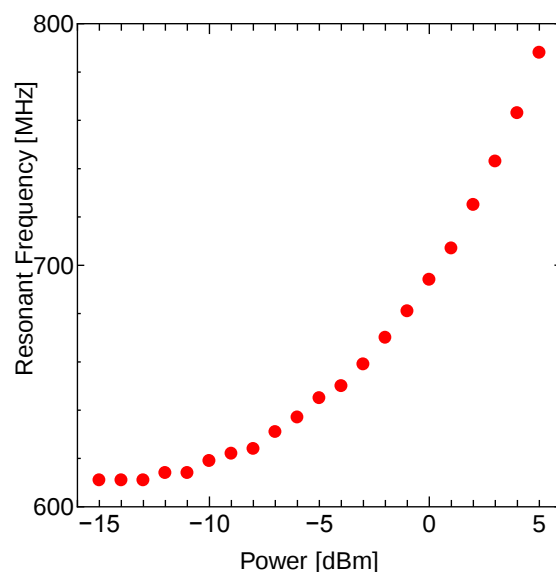


Figure 3. Power dependence of the resonant frequencies of the nSRR.

定した。今後はこの nSRR を利用したメタマテリアルの設計と、それによる左手系媒質の作製を行い、外部からの制御性に優れたメタマテリアルデバイスの様々な特性を明らかにしたい。

5. 参考文献

- [1] V. G. Veselago, Sov. Phys. Usp., **10**, 509 (1968).
- [2] J. B. Pendry, A. J. Holden, D. J. Robbins, and W. J. Stewart, J. Phys. Condens. Matter, **10**, 4785 (1998).
- [3] J. B. Pendry, A. J. Holden, D. J. Robbins, and W. J. Stewart, IEEE Trans. Micr. Theory. Tech., **47**, 2081 (1999).
- [4] Bingnan Wang, Jiangfeng Zhou, Thomas Koschny, and Costas M. Soukoulis, Optics Express, **16**, 16058 (2008).
- [5] I. V. Shadrivov, P. V. Kapitanova, S. I. Maslovski, and Y. S. Kivshar, Phys. Rev. Lett. **109**, 083902 (2012).
- [6] M. Lapine, I. V. Shadrivov, and Y. S. Kivshar, Rev. Mod. Phys. **86**, 1093 (2014).