

光制御非線形スプリットリング共振器の電磁波反射特性

Electromagnetic wave reflection characteristics of light-controlled nonlinear split-ring resonators

○五十嵐健太¹, 時田和輝¹, 胡桃聡², 鈴木薫², 松田健一²*Kenta Igarashi¹, Kazuki Tokita¹, Satoshi Kurumi², Kaoru Suzuki², Ken-ichi Matsuda²

Abstract: スプリットリング共振器 (Split-Ring Resonator: SRR) は、電磁波に対する簡素な共振器となることから、電磁波メタマテリアルなどの構成要素として用いられる。しかしその共振特性は SRR の構造によってほぼ決まってしまうため、制御性に欠けている。本研究では、SRR の容量成分としてバラクタダイオードの空乏層容量を利用することで、共振特性の調整可能な SRR を作製した。空乏層容量の調整には、フォトランジスタ回路を用いたバイアス印加方式を採用し、制御光の照射によって SRR の共振特性を変化させた。

1. 背景と目的

電磁波に対して自然界の物質にはない応答特性を示す人工構造体として、電磁波メタマテリアルが注目されている[1, 2]。それによって、電磁波に対する所望の透過・反射・屈折特性等を得ることを目的としている。これらのデバイスの構成要素の一つとしてスプリットリング共振器 (以下、SRR) が用いられてきた。SRR は、通常、金属からなる環状構造をしており、その一部にスリットが挿入されている構造である。環状部分のインダクタ成分と、スリット部分のキャパシタ成分によって共振器として動作するため、特定の波長の電磁波に対して反射率等が大きく変化する。一方で、このような単純な SRR の周波数特性は、その構造によってほぼ決まってしまう、デバイス作製後に変更や調整ができないという問題点を有していた。

近年、スリット部分の容量成分としてバラクタダイオードの空乏層容量を利用する構造が提案され[3]、照射する電磁波のパワーによって SRR の周波数特性が制御可能であることが実験によって明らかにされた。しかし、電磁波のパワー自体によって周波数特性が変化してしまうため、同じ波長の電磁波であっても、そのパワーによる SRR の応答が異なることとなり、制御性の観点からは更なる検討の余地がある。

本研究では、SRR のスリット部分に挿入されたバラクタダイオードの空乏層容量を制御するために、SRR とは別にフォトランジスタ回路によるバイアス印加回路[4]を付加することで、照射電磁波とは別の外部光源による周波数応答特性の制御を検討した。その結果、SRR の反射特性スペクトルを、光制御できることが観測された。

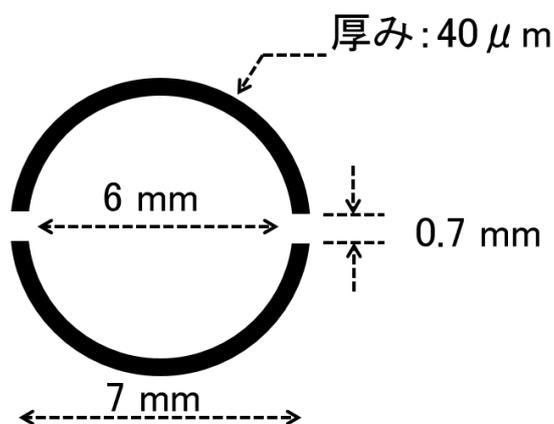


図1:本研究で作製した SRR の基本構造. 金属環部分 (黒) は銅で出来ており、内径: 6 mm, 外径: 7 mm, 厚み: 40 μm . 環状部分の二か所にスリット (幅: 0.7 mm) が入っている。



図2:実際に作製した SRR (バイアス回路なし)。

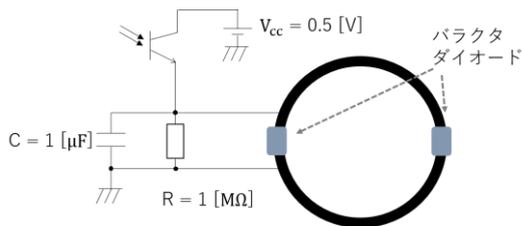


図 3 : 本研究で作製した SRR とバイアス回路図.

2. 実験方法

図 1 に、本研究で作製した SRR の基本構造を示す。金属環部分は、厚み 40 μm 、外径 7mm、内径：6mm の銅である。基板はガラスエポキシ系材料を用いている。円環上の二か所にスリットが設けられており、スリット幅は 0.7 mm として設計した。

スリット部分に挿入するバラクタダイオードには、SKYWOKS 社 SMV1234-079LF を採用した。取付方向は、二つのスリット部分で極性が同じになるようにした。これは、円環上に誘導される電流が時計回り・反時計回りのどちらでも、必ずどちらかのダイオードが逆バイアス状態になるためである。図 2 には実際の SRR の様子を示す。

図 3 には、バラクタダイオードの空乏層容量を制御するための回路図を示す。フォトトランジスタに照射した制御光によってバイアス電圧が発生し、その大きさによって空乏層の広がり制御できる。今回の実験に使用したフォトトランジスタは NJL7502L である。

この単一の光制御可能な SRR の S_{11} パラメータを、Tektronix 社製のベクトルネットワークアナライザ (VNA) を用いて測定した。

3. 実験結果

図 4 に、白色光を制御光として用いた場合の SRR の周波数特性を示す。SRR の面に垂直に照射される電磁波のパワーは 0 dBm とした。制御光が無い場合、約 0.6 GHz 付近に大きなディップが見られた。それに対して、制御光を照射した場合には、そのディップの周波数が低周波側にシフトし、またその大きさも変化した。

この結果は、SRR のスリット部分に挿入された二つのバラクタダイオードの空乏層容量が変化していることを示唆している。しかしながら、本来期待される変化は、空乏層の広がり大きい（したがって容量は小さい）ときに、共振周波数が高周波側にシフトすることである。一方、今回の実験結果では、白色光照射した際のディップの位置は低周波側にシフトしているた

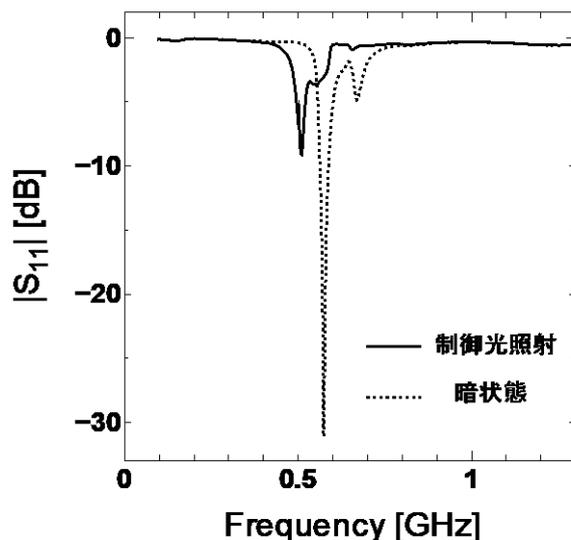


図 4 : 光制御 SRR の S_{11} パラメータの周波数特性. SRR の共振特性によって約 0.6 GHz 付近にディップが見られる。制御光を照射したほうが、特性周波数が低周波側にシフトしている。

め、単純なバイアスの効果以外の効果が発生していることを示している。

4. まとめ

本研究では、外部制御光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、その応答特性を実験的に調べた。その結果、確かに S_{11} パラメータには変化が見られたが、一方、その変化の仕方については不明な点も含まれていることが分かった。

5. 参考文献

- [1] J. B. Pendry, A. J. Holden, D. J. Robbins, and W. J. Stewart, *J. Phys. Cond. Mat.*, **10**, 4785 (1998).
- [2] J. B. Pendry, A. J. Holden, D. J. Robbins, and W. J. Stewart, *IEEE Trans. Microw. Theory. Tech.*, **47**, 2081 (1999).
- [3] Bingnan Wang, Jiangfeng Zhou, Thomas Koschny, and Costas M. Soukoulis, *Optics Express*, **16**, 16058 (2008).
- [4] I. V. Shadrivov, P. V. Kapitanova, S. I. Maslovski, and Y. S. Kivshar, *Phys. Rev. Lett.* **109**, 083902 (2012).