

相互作用を有する分割リング共振器列の電磁波反射特性と光制御

Strong interaction and electromagnetic-wave reflection properties of optically controlled split-ring resonator arrays

○前田博史¹, 五十嵐健太¹, 胡桃聡², 鈴木薫², 松田健一²*Hirofumi Maeda¹, Kenta Igarashi¹, Satoshi Kurumi², Kaoru Suzuki², Ken-ichi Matsuda²

Abstract: Split-ring resonator (SRR) is a well-known elementary device for electromagnetic metamaterials. In this study we fabricated nonlinear SRRs by utilizing varactor diodes as variable capacitors, and investigated their reflection properties for electromagnetic waves in the range up to 3 GHz. It was found that the sharp resonant frequency f_0 can be observed at about 0.61 GHz for each nSRR. We also tried to change reverse bias for varactor diodes using optically controlled external bias circuit. For double layered nSRR devices we found that the resonant frequency f_0 split into two different frequencies, which is attributed to strong interactions between nSRRs.

1. 研究背景と目的

分割リング共振器 (split-ring resonator: SRR) は、電磁メタマテリアルの構成要素として用いられてきた[1]. SRR は特定の周波数の電磁波のみを透過させる特徴を持ち、その周波数は SRR の構造に起因している。

従来の SRR は、金属の環状部分の一部を欠落させてスリットを設けた構造をしている。環状構造によるインダクタ (L) 成分とスリット構造による (C) 成分から SRR は LC 共振器としてみなすことができる。また、透過させる電磁波の周波数は SRR を LC 共振器としてみなした場合の共振周波数 f_0 とほぼ一致することで知られている。

近年、この SRR のスリット部分を円環上の中心に関して 2ヶ所に設けて可変容量ダイオードを並列に接続し、外部から共振特性の制御を可能にした非線形スプリットリング共振器 (nonlinear SRR: nSRR) が提案された[2]. nSRR を用いることで作製後のデバイスの特性を可変にすることが期待できる。

SRR を電磁メタマテリアルに用いる場合の配列構造は想定している電磁波の波長程度の間隔で周期的に配置するのが一般的である。一方、我々の研究では既に、複数の nSRR を並列に十分近づけることで単体の nSRR には見られないような周波数シフトやピーク分離などの特殊な電磁波の応答を示すことを確認している。このことから、近距離に存在する複数の nSRR 間には相互作用が存在することが分かり、これを利用・制御することで多様な機能を有する次世代の電磁波デバイスの可能性を生み出すことを期待できる。

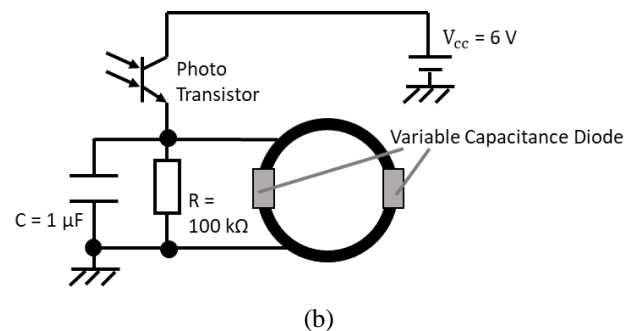
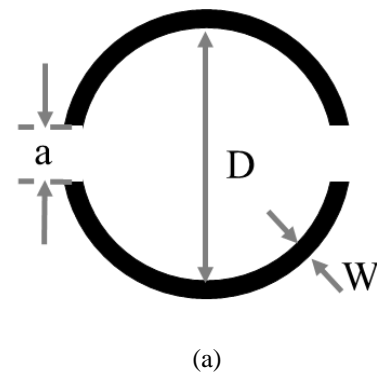


Figure 1. (a) Dimensions of the split-ring resonator used in this study; Diameter $D = 6$ mm, Width $W = 0.5$ mm, Slit gap $a = 1.29$ mm, Thickness $t = 35$ μm .

(b) Bias circuit used for optical control

そこで本研究の目的は、バラクタダイオードを利用した nSRR を複数重ねた構造を作製し、相互作用が十分に強い条件下での電磁波反射特性を明らかにすること、同条件下でいずれかの nSRR のみに電磁波の応答特性を外部からの光制御によって変化させた場合の特性変化を明らかにすることとした。

2. 実験方法

本研究で作製した nSRR の金属円環部分の構造を図 1(a) に示す. スリット部分にはバラクタダイオード (Skyworks 社製 SMV1234-079LF) を並列に挿入した.

図 1(b) にバラクタダイオードの空乏層容量を外部光源によって可変にしたバイアス回路を示す[3].

電磁波反射特性 (S_{11} パラメータ) の測定には, Tektrix 社製ベクトルネットワークアナライザ (TTR503A) を使用した.

3. 測定結果

図 2 には, 本研究で使用した単体の nSRR の S_{11} -周波数特性を示す. 測定時に照射した電磁波のパワーは -3 dBm とし, 外部光源は OFF とした. 図から分かるように約 0.61 GHz 付近に共振特性を示すディップが観測された. これを本研究の nSRR の基本共振特性と定義する.

本研究で複数の nSRR を用いる場合は上記の基本共振特性が同じと見なせる個体のみを選出して実験を行った. 図 3 には, 二層 nSRR の nSRR の S_{11} -周波数特性を示す. nSRR 間の距離は 0.9 mm で固定し, 電磁波の照射パワーも -3 dBm で一定にし, ベクトルネットワークアナライザのループアンテナに近い方の nSRR のみに外部光源による光制御を行い, 外部光源の照度を OFF の状態から 73.1 lx, 171.3 lx へと明るくしていくことで実験を行った. 従来の SRR は 1 つの共振特性を示すことで知られているが, 図 3 より, 各照度に対して 2 つの共振特性が現れていることが分かる. 図 2 と図 3 の照度 0.00 lx のグラフを比較すると外部光源は OFF 状態という共通の条件下で異なる位置に共振特性が現れていることが分かる. また, 図 3 のグラフにおいて各照度に対して低周波側のディップ群は照度が大きくなるにつれてディップが浅くなり, シフト量が減少する傾向が見られるが, 高周波側のディップ群では照度が大きくなるにつれてディップが深くなり, シフト量も増加傾向にあることが分かる.

nSRR 間の相互作用が無いと仮定した場合, nSRR それぞれの電磁波反射特性の重ね合わせが全体の測定結果になることが予想されるが, 本研究の測定結果はその仮定と異なる. よって十分に距離に近い複数の nSRR には隣接する nSRR 同士で相互作用が働き, 単体の nSRR とは異なるメカニズムによる共振特性が現れることが分かった. 現時点では複層 nSRR の相互作用の詳細は明らかではないが, nSRR 間の相互作用の割合によって単体の nSRR とは異なる共振特性を示す可能

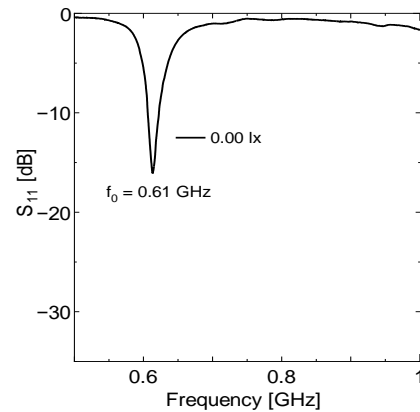


Figure 2. S_{11} - frequency characteristics for a single nSRR.

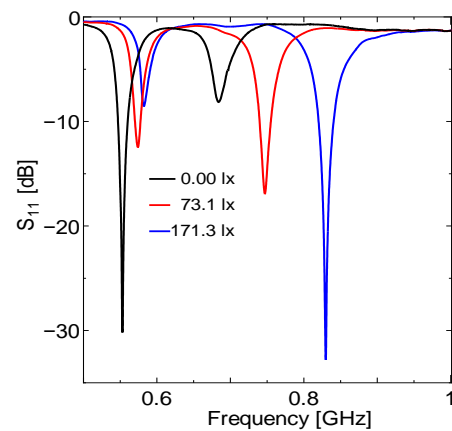


Figure 3. S_{11} - frequency characteristics for a 2 layers nSRR that is applied optical control only placed near loop antenna one

性が実験的に観測できたとと言える.

4. まとめ

共振特性を制御可能な nSRR の相互作用が無視できない二層構造を作製し, 電磁波の反射特性を制御光源の照度を変化させながら測定した. nSRR の相互作用の割合によって単体の nSRR とは異なる電磁波応答を観測した.

5. 参考文献

- [1] M. Lapine, et al., : “Colloquium : Nonlinear meta-materials”, Rev. Mod. Phys, Vol. 86, No. 3, pp. 1093-1117, 2014.
- [2] B. Wang, et al., : “Nonlinear properties of split-ring resonators”, Opt. Express, Vol. 16, No. 20, pp. 16058-16063, 2008.
- [3] I. V. Shadrivov, et al., : “Metamaterials Controlled with Light”, Phys. Rev. Lett, Vol. 109, No. 8, pp. 083902, 2012.