

## 正方形光制御非線形スプリットリング共振器列の電磁波反射特性と距離依存性

### Electromagnetic wave reflection characteristics of optically-controlled square nonlinear split-ring resonator arrays

○中村颯汰<sup>1</sup>, 荒木拓海<sup>1</sup>, 長谷川航大<sup>1</sup>, 前田博史<sup>2</sup>, 鈴木薫<sup>3</sup>, 胡桃聡<sup>3</sup>, 松田健一<sup>3</sup>

\*Souta Nakamura<sup>1</sup>, Takumi Araki<sup>1</sup>, Koudai Hasegawa<sup>1</sup>, Hirofumi Maeda<sup>2</sup>, Kaoru Suzuki<sup>3</sup>, Satoshi Kurumi<sup>3</sup>, Ken-ichi Matsuda<sup>3</sup>

**Abstract:** 本研究では、近接した二つの正方形非線形分割リング共振器 (nSRR) からなる構造を作製し、その電磁波反射特性を共振器間の距離の関数として調べた。各々の nSRR は、その共振特性を各々独立に外部からフォトカプラを通じて電氣的に非接触な状態で制御可能とした。特性のほぼ同じ nSRR にも関わらず、相互作用の強い状態では、反射スペクトルが2つに分離することを見出し、またその分裂は距離に近いほど大きいことが分かった。片側の共振周波数を意図的に変化させた場合には、スペクトルの分離は見られるもののその大きさには変化があることが分かった。

#### 1. 研究の背景と目的

スプリットリング共振器(split-ring resonator:SRR)は電磁メタマテリアルの基本的な構成要素である[1]。SRR は金属の円環構造に一部スリットが設けられており、このスリット部分がキャパシタ成分(C)、円環部分がインダクタ成分(L)を持つことで RLC 共振回路として振る舞う。これにより、ある特定の周波数の電磁波に対して共鳴特性を示す。しかし、従来の SRR では共振周波数が、デバイス構造を決定した段階で決まってしまうため、応用の範囲が狭いという問題点があった。

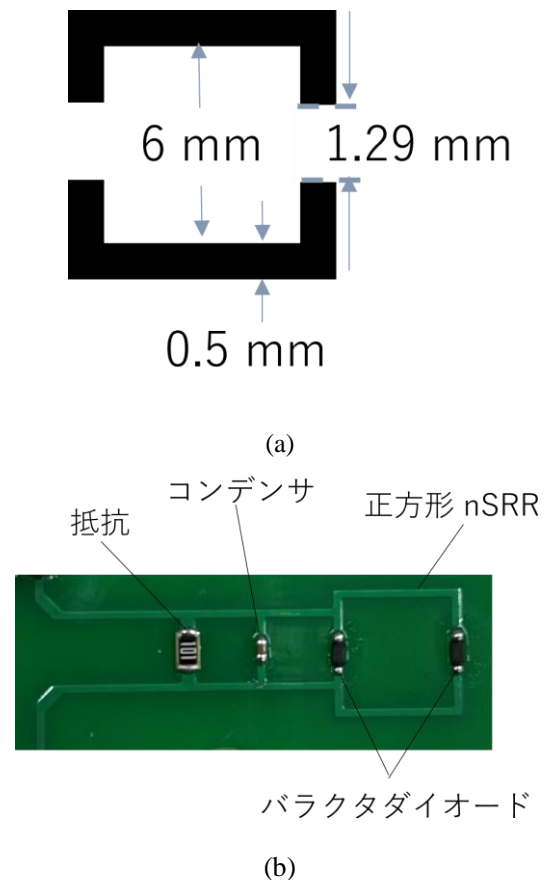
そこで近年ではスリット部分にバラクタダイオードを挿入し、半導体の空乏層容量の変化を通じて共振周波数が制御可能となる非線形スプリットリング共振器 (nonlinear SRR: nSRR)が提案された[2]。空乏層容量の制御は、バラクタダイオード部分に印可される逆バイアス電圧を通じて行われるが、デバイスの非線形特性のため、その共振特性の制御性や制御範囲についてはまだ不明な点も多い。さらに、nSRR を複数近接させた状態では、nSRR 間の相互作用が強くなり、デバイスの非線形特性も影響しているため、どのような電磁波応答特性を示すのか不明な点が多い。

そこで本研究では、nSRR を近接して二枚重ねた二層構造を作製し、層間距離と電磁波反射特性の関係を明らかにすることを目的とした。また、各層に対してフォトカプラを用いた光によるバイアス制御を行うことで、各々の nSRR の特性を独立して制御しながら電磁波反射特性を調べる事も目的とした。

#### 2. 実験方法

本研究で作製した正方形 nSRR の寸法を図 1(a)、バイアス回路を含めた全体像の光学写真を図 1(b)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)を挿入した。バラクタダイオードの空

乏層容量は、フォトカプラを用いて制御した。測定の配置は図 2 ようになっていて、ほぼ同等の特性を持つ正方形 nSRR を二枚重ね、ループアンテナと平行に配置し、層間距離  $d$  を変化させ測定を行った。この時、アンテナと 1 層目の nSRR との距離  $r$  は 0.75 mm とした。電磁波反射特性( $S_{11}$  パラメータ)の測定には、Tektronix 社製ベクトルネットワークアナライザ (TTR503A)を使用した。



**Figure1 .** (a)Dimensions of the square nSRR used in this study.

(b) Circuit of square nSRR device.

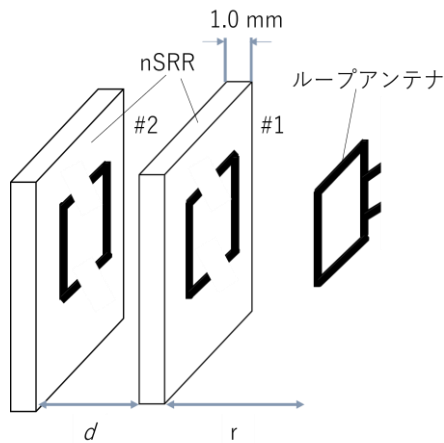


Figure 2. Measurement configuration for an array of square nSRRs.

3. 測定結果

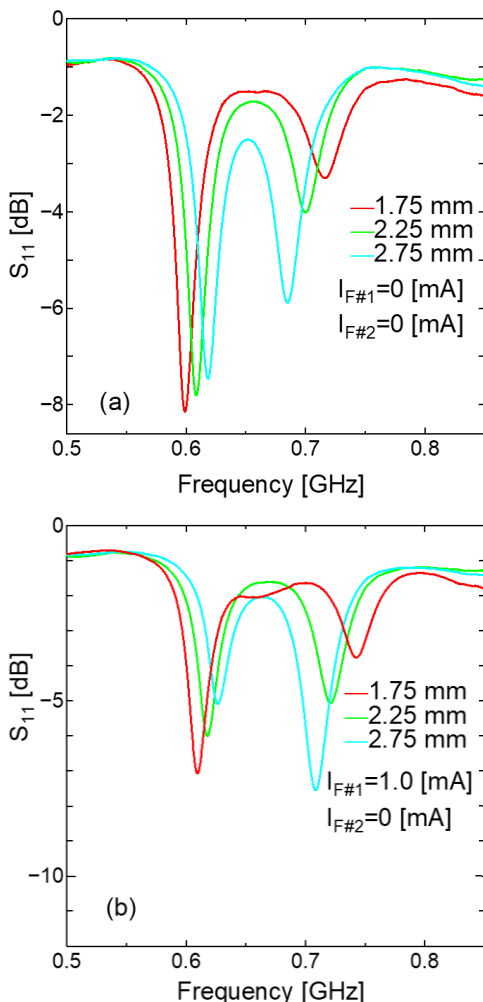


Figure 3. (a)  $S_{11}$  spectra for a double layered square nSRR. (b)  $S_{11}$  spectra under the different bias condition: nSRR(#1) is biased using photo coupler.

図 3(a)に正方形 nSRR を二枚重ねた場合の電磁波反射特性を示す。ループアンテナと nSRR(#1)との距離  $r$  を 0.75 mm に固定し、nSRR(#2)との間の距離  $d$  を 1.75,

2.25, 2.75 mm と変化させた。フォトカップラへの電流は無く、従ってどちらの nSRR もほぼ同じ共振特性を有している状態である。電磁波の強度は -6 dBm とした。

図 3(a) に示すように、電磁波反射特性には二つのディップが発現している。ほぼ同じ共振特性を持つ nSRR の合成スペクトルであれば、共鳴が見られるのは 1 箇所であると予想されるが、そうはなっていない。これは、nSRR 間の相互作用が強いために、二つの共振器列の電磁波反射特性としては二つの共鳴周波数を示すようにシフトしたものと考えられる。実際、層間距離  $d$  を 2.75 mm から 1.75 mm に近づけていくと、ピークの分裂幅は 0.063 GHz から 0.117 GHz に広がっている。

そこで次に、意図的に片側の nSRR に対してのみ光制御をかけて共振周波数が各々の nSRR で異なる状態にした。図 3(b)では#1 のほうにのみ 1 mA を印加している。この場合でも  $S_{11}$  パラメータの周波数依存性には二つのディップが見られるが、全体の形状やディップの深さには変化が生じることが分かる。これらの事から、ピーク分裂は nSRR 間の相互作用が原因であると予想されるが、その共鳴周波数のシフト量はそれぞれの nSRR の特性を反映していると考えられる。

講演では nSRR(#2)に対して光制御を加えた場合、及び両方に光制御を加えた場合の  $S_{11}$  パラメータの周波数特性についても報告する。

4. まとめ

本研究ではそれぞれの nSRR を光で制御し、更に、ループアンテナから遠い方の nSRR の距離を変化させながら測定した。その結果、光による制御を加え各正方形 nSRR の特性を変化させた場合にも相互作用は発生し、ディップに更なる変化が見られることがわかった。今後は、更に枚数を増やし光で制御した場合の電磁波応答について調べる。

5. 参考文献

[1] M. Lapine, et al., “Colloquium: Nonlinear metamaterials”, Rev. Mod. Phys., **86**, 1093 (2014).  
 [2] 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”, Phy. Rev. B **96**, 085426 (2017).