

L-24

二重非線形スプリットリング共振器の共振周波数と層間距離依存性

Resonance frequency and interlayer distance dependence of a double non-linear split ring resonator

○渡邊啓太¹, 数野将輝¹, 前田博史², 鈴木薫³, 胡桃聡³, 松田健一³* Keita Watanabe¹, Masaki Kazuno¹, Hirofumi Maeda², Kaoru Suzuki³, Satoshi Kurumi³, Ken-ichi Matsuda³

Abstract: 非線形スプリットリング共振器 (nonlinear Split-ring resonators: nSRR) は, 共振特性可変型の共振器デバイスであり, 電磁波フィルタや各種センサーへの応用が期待されている. 本研究では, これを2層化した複合構造を作製し, その電磁波反射特性を測定した. その結果, nSRR 単体では見られない共振周波数の分裂現象を見出した. またその分裂幅が層間距離に強く依存することがわかったので報告する.

1. 背景と目的

電磁メタマテリアルは, 自然界に存在する物質では実現し難い応答特性を, 人工的に実現可能にした構造物のことである. 現在, 幅広い分野でメタマテリアルに関する研究・開発が行われ, 発展が期待されている[1,2].

スプリットリング共振器 (SRR) は, 電磁メタマテリアルの基本的な構成要素の一つとして挙げられる. SRR には, 金属円環構造の一部にスリットが設けられており, 円環部分がインダクタ成分 (L), スリット部分がキャパシタ成分 (C) として考えられ, LC 共振回路と見ることができる[3].

SRR はその構造が単純であるために, 設計の段階で基本的になす応答特性が決定され, SRR 作製後に外部から特性を変更や調整することが困難であるという欠点を有していた. その欠点を解決するために考案されたのが, SRR のスリット部分にバラクタダイオードを取り付けた構造の非線形スプリットリング共振器である[4].

本研究では, nSRR を近接した二重構造を作製し, nSRR 間の相互作用が強い状況における, 電磁波反射特性を調べることを目的とした. 特に, 層間距離に対する共振周波数の依存性を調べたので報告する.

2. 実験方法

図 1(a)に, 本研究で使用した円形 nSRR の基本構造を示す. nSRR の円環の内径 D_1 は 6 mm, 外径 D_2 は 7 mm, 厚さ t は 35 μm , スリット部分にはバラクタダイオード (Skyworks 社製 SMV1234-07) を極性をそろえて取り付けられている. (図 1 (b) 参照).

図 2 に, 本研究の測定配置を示す. アンテナ部と nSRR#1 との間は 0.5 mm で固定する. nSRR#1 と#2 の間隔 (d) は 1.50~8.75 mm の範囲で変化させて測定を

行った. 電磁波反射特性 (S_{11} パラメータ) は, Tektrix 社製ベクトルネットワークアナライザ (TTR503A) を用いて測定した. 電磁波の照射パワーは -6 dBm で固定した.

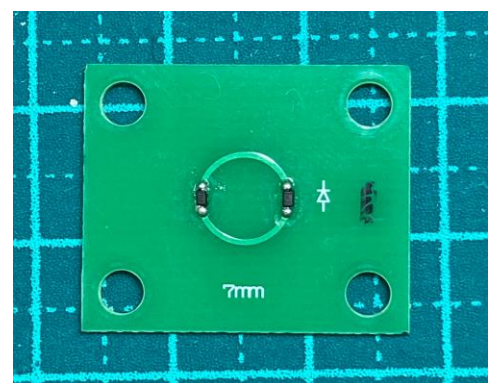
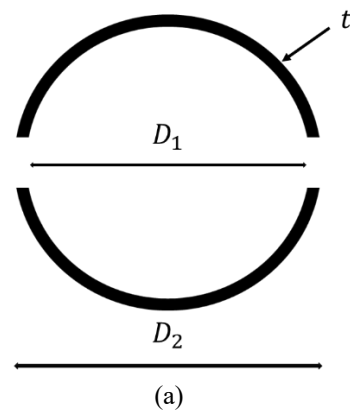


図 1 : (a) 非線形スプリットリング共振器 nSRR の基本構造. 内径 : $D_1 = 6$ mm, 外径 : $D_2 = 7$ mm, 厚さ : $t = 35$ μm , (b) 実際に使用した nSRR.

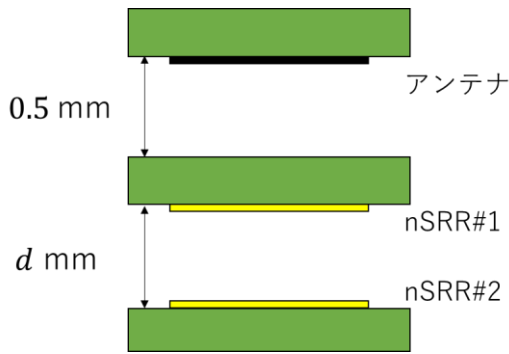


図2：本実験で使用した実験の配置図.

3. 実験結果

図3に本実験で得られた測定結果から、層間距離に対する共振周波数の依存性を示す。元々、nSRRは固有の共振周波数を持っており、ほぼ同等の特性を持つものを二重構造にしているため、電磁波反射特性には一つの共振周波数が見られると予想される。しかし実際には、図3の内挿図に示すように、二重化した時点で分裂して二つの共振周波数 (f_1 および f_2) が観測される。nSRR間の層間距離を離していくと、 f_1 は低周波側にシフトしていき、ピークは徐々に深くなっているのに対して f_2 では、高周波側にシフトしていき、ピークは徐々に浅くなってきていることがわかる。 $d=5.50$ mm 付近から f_1 のディップは約 0.62 GHz に収束し、 f_2 のディップは約 0.59 GHz に収束している。この二つのディップは一つとならず、約 0.03 GHz の間隔で続いている。

このような現象は、自然界にはしばしばみられる現象であり、例えば水素原子が水素分子を形成する過程で軌道のエネルギー準位が分裂して結合軌道と反結合軌道に分離することは良く知られている。そこでは、電子間の相互作用が重要な役割を果たしている。今回、この実験では、nSRRが、あたかも一つの原子のようにふるまい、2層化することで分子を形成するような現象がみられている。

講演では、この周波数分裂の距離依存性について簡単なモデルを与えて議論したい。

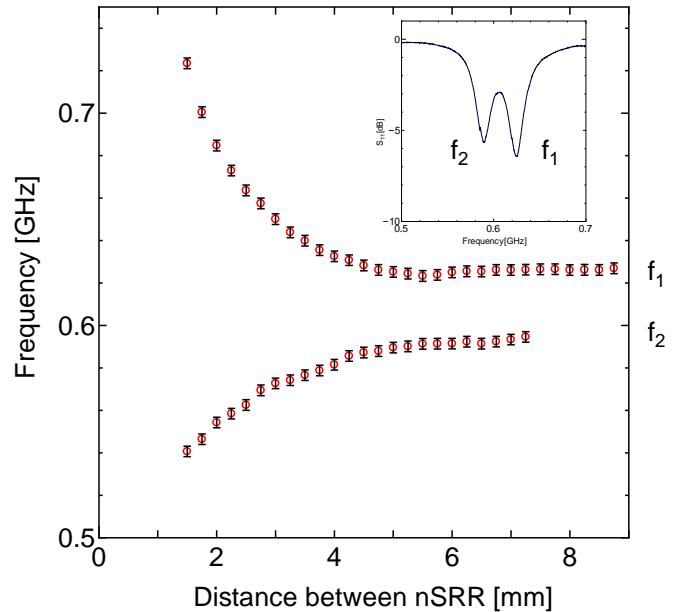


図3：周波数特性—nSRR間の距離.

4. まとめ

本研究では、外部から変調可能なnSRRを用いて二重構造を作製し、nSRR間の距離を調整して測定を行った。その結果、二つのディップが現れ、それぞれある周波数に収束し、その間隔はほぼ一定となった。

今後は、nSRRの枚数を増やし重ねた場合の周波数特性の距離依存性について調べる。

5. 参考文献

[1] J. B. Pendry, A. J. Holden, D.J. Robbins, and W. J. Stewarts, J. Phys. Cond. Mat., 10, 4785 (1998).
 [2] J. B. Pendry, A. J. Holden, D.J. Robbins, and W. J. Stewarts, IEEE Trans. Microw.Theory. Tech., 47, 2081(1999).
 [3] M. Lapine, et al., Rev. Mod. Phys., 86, 1093(2014)
 [4] B. Wang, et al., Opt. Express, 16, 16058(2008)