

液晶を用いたメタ材料の設計技術の確立とミリ波帯レンズへの応用

研究代表者 田 中 将 樹 秋田工業高等専門学校 准教授
共同研究者 伊 藤 桂 一 秋田工業高等専門学校 教授

1 はじめに

“安全・安心な社会”の実現に向けて、異常を迅速に検知するための電磁波センシング技術は、トンネルや橋梁のモニタリング等の社会インフラの安全確保や自動車の自動運転、空港や鉄道のセキュリティ、洪水や土砂災害等の防災など多くの分野で活用が見込まれている。その中で、ミリ波やテラヘルツ波を使ったセンシングは非接触方式であり、対象物の表面状態や内部構造の調査・診断に適しており、この周波数領域を利用したミリ波・テラヘルツ波センシングが実用化され始めている。これら社会安全のためのセンシング技術は一部実用化されているが、高感度・高解像度化および低消費電力、低コスト化に対する要求が高く、構成する素子の構造や材料の開発が急務となっている。上述のミリ波センシング装置に欠かせないミリ波の制御機構のほとんどは機械的駆動が採用されているが、本研究は機械的な駆動機構を伴わずに液晶を利用して電氣的にミリ波を制御する装置の開発を目的とする。

金属や誘電体による微細な周期構造で構成された人工媒質や人工結晶はメタマテリアルやフォトニック結晶と呼ばれ、その新奇な光物性が注目されている。メタマテリアルは自然界には発生しない人工構造物であり、その物質は左手系の電磁界ベクトルを持ち、波動の群速度と位相速度が180度逆方向であるという特徴を有し、それによって負の屈折、ドップラー効果の逆、チェレンコフ放射の逆、平面レンズ効果の逆などの特性が予想されている。なかでも負の屈折と呼ばれる現象は、波長の分解能力の大きいスーパープリズムや回折限界を打ち破るスーパーレンズを実現可能とする現象として注目されている[1]。光波領域においてメタマテリアルの製作には非常に高度な超微細加工技術が必要とされているが、本研究で対象としている周波数領域である、波長がミリメートルのオーダーであるミリ波領域では、低価格で入手可能な3Dプリンタや3Dモデリングマシンを用いることにより比較的容易に微細な周期構造を実現することが可能である。メタマテリアルを実現する構造の一つとして、金属円環にギャップを設けることでコイルとコンデンサの直列回路を構成する分割リング共振器(SRR: Split Ring Resonator)を配列するものがある。このメタマテリアルを構成する基本要素の大きさは数百 μm ~mm程度となり、3Dモデリングマシンによる機械的加工での製作が可能である。

また、液晶(Liquid Crystal: LC)材料はデバイスの小型化、低コスト化、低消費電力等の特徴を有する薄型ディスプレイの分野で利用されているが、ミリ波領域においても大きな電気光学効果を有している。液晶の分子配向効果に基づく複屈折効果によりミリ波の伝搬を制御可能な帯域フィルタや液晶プリズム[2]、液晶レンズ[3]等が報告されている。

そこで本研究では、3Dモデリングマシンを使ってメタマテリアルを製作することを目標に、ミリ波領域における1分割1重リングSRRの各構造パラメータの設計を行い、樹脂基板上に導電性塗料を塗布することでSRRの試作を行った。さらに、液晶をメタマテリアルへ適用するために、その基礎的検討としてFDTD法(時間領域差分法)によるシミュレーションを用いて、LC/金属メッシュ構造の単位構造(クロススロット型)のテラヘルツ電磁特性について検討した。

2 SRR 構造の設計

2-1 分割リング共振器

負の屈折率を実現するには誘電率と透磁率を同時に負にする必要がある。金属は負の誘電率を持つことが知られる一方、透磁率が負である物質は自然界には存在しない。そこで実効的な透磁率が負となる人工磁性体を作製する必要がある。

最初に負の透磁率を実現した人工磁性体は図1のようにギャップを設けた金属円環で、これをスプリットリング共振器(SRR: Split Ring Resonator)と呼ぶ。このSRRの円環部分がコイル、ギャップ部分がコンデンサの役割を果たし、結果的にLC直列共振回路と等価であると考えられることができる。ギャップのない金

属円環だとただのコイルと等価となり、その中心に印加された磁場を打ち消す方向に磁場を発生させるが、その大きさは印加されたものより大きくすることはできない。しかし、コンデンサと接続して共振現象を用いると、共振周波数の前後では激しい磁氣的応答を示す[4]。共振周波数より少し低い帯域では印加された磁場と同じ方向に大きな磁場を生成し、少し高い帯域では印加方向と逆方向に大きな磁場を生成する。磁場を印加するとそれと逆方向の磁場が返ってくることは、実質的に負の透磁率をもつ物質だということができるため、SRR はその共振周波数より少し高い周波数帯において負の透磁率をもつことになる。

1 分割 1 重 SRR の共振周波数や透磁率の周波数応答は SRR の寸法とその配列間隔によって決定される。ここではこれらの各パラメータを図 2 で示すように定義する。また、文献[5]を参考に、以下に示す式により計算を行った。

$$\text{共振周波数 } f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (1)$$

$$\text{キャパシタンス } C = \varepsilon_0 \varepsilon_r \frac{wt}{g} \quad (2)$$

$$\text{インダクタンス } L = \frac{\mu_0 \pi r^2}{l} \quad (3)$$

$$\text{充填率 } F = \frac{\pi^2}{a^2} \quad (4)$$

$$\text{導電率 } \sigma(\omega) = \frac{\omega_p^2 \varepsilon_0}{\gamma - i\omega} \quad (5)$$

$$\text{表皮深さ } \delta(\omega) = \frac{2}{\omega \mu_0 \sigma(\omega)} \quad (6)$$

$$\text{内部インピーダンス } Z(\omega) = \frac{2\pi Z_S(\omega)}{w} \quad (7)$$

$$Z_S = \frac{1}{\sigma(\omega)\delta(\omega)} = R_S(\omega) + iX_S(\omega) \quad (8)$$

$$\text{実効透磁率 } \mu_{eff} = 1 - \frac{F\omega^2}{\omega^2 - \frac{1}{CL} + i\frac{Z(\omega)\omega}{L}} = \mu_{Re} + i\mu_{Im} \quad (9)$$

ここで、 ε_0 は真空の誘電率、 ε_r はギャップ間の比誘電率、 ω_p はプラズマ周波数、 γ は減衰定数である。

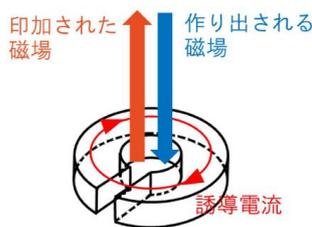


図 1 SRR と磁気応答

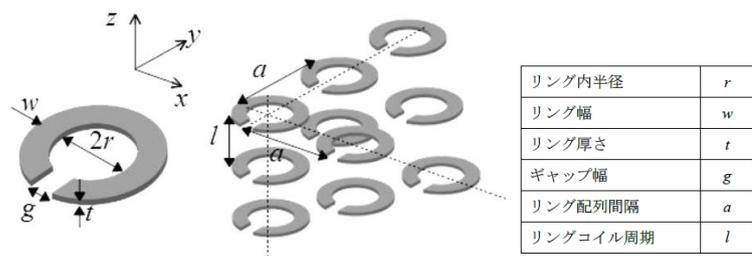


図 2 1 重 SRR 構造

2-2 SRR の設計

SRR の寸法を設計するために、始めに、SRR の各パラメータを変化させた時の共振周波数や実効透磁率への影響を理論計算により確認した。

図 2 に示す 1 分割 1 重リング SRR において、寸法をリング内半径 $r = 1.2 \text{ mm}$ 、リング幅 $w = 0.8 \text{ mm}$ 、リング厚み $t = 20 \text{ }\mu\text{m}$ 、リング列周期 $l = 0.5 \text{ mm}$ とした時、ギャップの間隔 g をパラメータとしてギャップ間の比誘電率 ε_r の共振周波数への影響を計算した結果を図 3 に示す。ギャップ間の比誘電率が大きくなるに従って、また間隔が小さくなるにつれて C 値が大きくなり、その結果、共振周波数が低下していることが分かる。図

4にギャップ間隔を $g = 0.5 \text{ mm}$ とした時の実効透磁率の変化を示す。ホスト材料として樹脂あるいは液晶を考慮したとき、その比誘電率として $\epsilon_r = 2.0 \sim 3.0$ の値で $50 \sim 65 \text{ GHz}$ の周波数範囲で共振のピークが現れている。これらの共振のピークにおいて、 μ_{Re} が負の値を示している帯域幅は約 0.6 GHz であった。

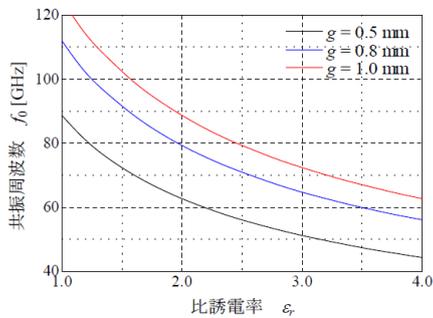


図3 ギャップ幅および比誘電率の影響

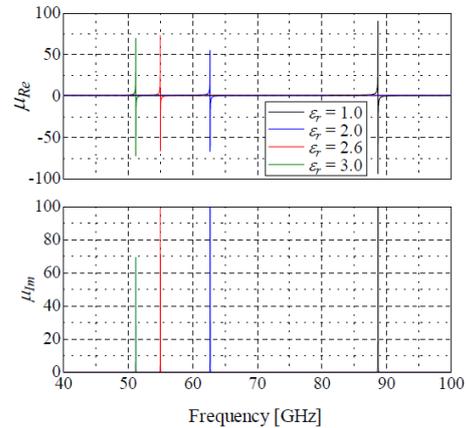


図4 比誘電率による実効透磁率の変化

次に、リング列周期 l をパラメータとした場合の実効透磁率の変化を図5に示す。SRRの寸法は、リング内半径 $r = 1.2 \text{ mm}$ 、リング幅 $w = 0.8 \text{ mm}$ 、リング厚み $t = 20 \mu\text{m}$ 、ギャップの間隔 $g = 0.5 \text{ mm}$ 、リング周期 $a = 6.0 \text{ mm}$ とした。図6に μ_{Re} が負の値となる帯域幅および μ_{Im} のピーク周波数（共振周波数 f_0 ）の変化を示す。リング列周期 l の増加に従って共振周波数 f_0 は大きくなっており、 μ_{Re} が負の値となる帯域幅も最大 6 GHz 程度と大きくなることからわかる。

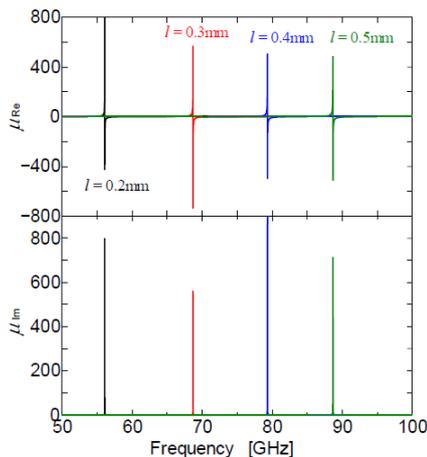


図5 リング列周期による実効透磁率の変化

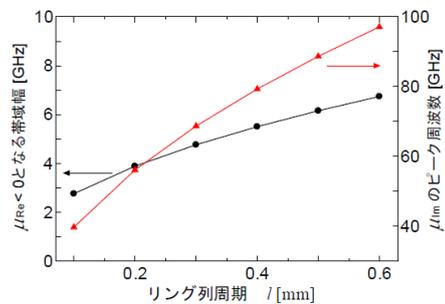


図6 リング列周期の影響

リング周期 a をパラメータとした場合の実効透磁率の変化を図7に示す。SRRの寸法は、リング内半径 $r = 1.2 \text{ mm}$ 、リング幅 $w = 0.8 \text{ mm}$ 、リング厚み $t = 20 \mu\text{m}$ 、ギャップの間隔 $g = 0.5 \text{ mm}$ 、リング列周期 $l = 0.5 \text{ mm}$ とした。共振周波数はリング周期 a に依らずに一定値を示しており、 a が減少するに従って実効透磁率の実部および虚部の値が増加していることが分かる。また、リングの充填率を $F = \pi r^2 / a^2$ (Filling factor) として、実効透磁率の実部 μ_{Re} が負の値を示す帯域幅との関係を図8に示す。帯域幅が F 値にほぼ比例して増加していることがわかる。

以上の計算結果から、ギャップ幅 g およびリングコイル周期 l が大きいほど共振周波数は高くなることが分かった。また、リング配列間隔 a が小さいほど実効透磁率が負の値を示す帯域幅は広くなった。設計にあたって、SRR全体の大きさをミリ波帯の波長以下とするため、リング内半径 r およびリング幅 w は可能な限り小さくすることを考慮した。また、広い周波数帯域において負の透磁率をもつ物質として扱えるよう、リング配列間隔 a は小さい値であることが望ましい。さらに、本研究で想定しているミリ波の周波数 $70 \sim 80 \text{ GHz}$ 帯の範囲内にSRRの共振周波数を設定し、実際に作製可能な寸法であることが必要である。以上を踏ま

えて設計した SRR の寸法を表 1 に示す。

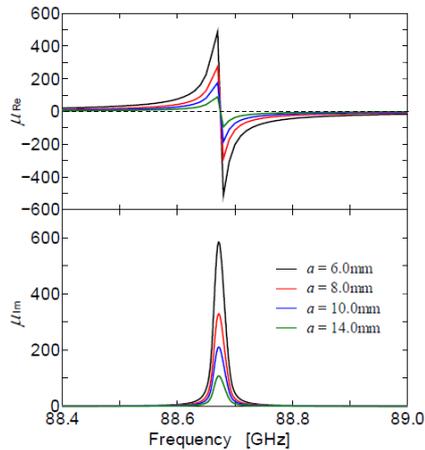


図 7 リング周期による実効透磁率の変化

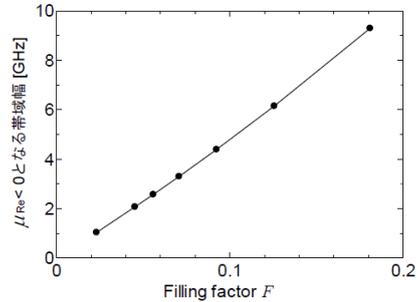


図 8 リング充填率の影響

表 1 SRR の設計寸法

| | |
|--------------|--------------------|
| リング内半径 r | 1.20 mm |
| リング幅 w | 0.80 mm |
| リング厚さ t | 35.0 μm |
| ギャップ幅 g | 0.50 mm |
| リング配列間隔 a | 6.00 mm |
| リングコイル周期 l | 0.70 mm |
| 共振周波数 f_0 | 79.3 GHz |

2-3 金属細線の設計

一方、負の誘電率は金属細線の周期的配列によって実現できることが報告されている[1]。図 9 に示す金属細線の正方格子配列において、実効誘電率 ϵ_{eff} は以下の式により計算される。ここで、 r は金属細線の半径、 a は金属細線の格子周期、 n_{eff} および m_{eff} は金属の電子密度および有効質量、 e は電荷量、 C_0 は光速、 ϵ_0 は真空中の誘電率である。金属細線の半径 $r = 0.15$ mm とて、格子周期 a をパラメータとした場合の実効誘電率を図 10 に示す。格子周期 a が大きくなるにしたがってプラズマ周波数 f_p (実効誘電率 ϵ_{eff} の符号が変わる周波数) が低下していることがわかる。また、SRR における実効透磁率の実部 μ_{Re} が負の値を示す帯域幅と比べると、実効誘電率が負の値をとる周波数範囲は広いことがわかる。

$$\text{プラズマ周波数 } \omega_p^2 = \frac{n_{eff} e^2}{\epsilon_0 m_{eff}} = \frac{2\pi C_0^2}{a^2 \ln\left(\frac{a}{r}\right)} \quad (10)$$

$$\text{実効誘電率 } \epsilon_{eff} = 1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2} \quad (11)$$

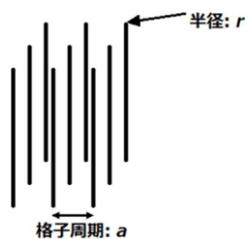


図 9 金属細線の正方格子配列

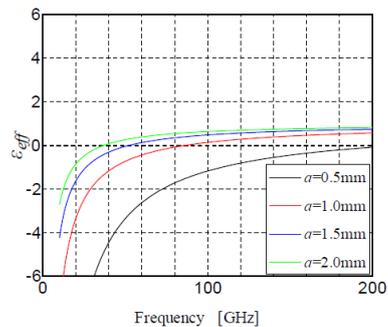


図 10 実効誘電率の周波数特性

3 SRR 構造の試作

3-1 基板樹脂の検討

本研究では、樹脂基板にリング形状の導電性膜を形成することで SRR 構造の作製を行う。作製にあたって、導電性膜の形成に使用する導電性塗料と、基板とする樹脂材料との相性を確認した。

図 11 に基板材料に銀銅導電塗料スプレー（プラスコート社，Polycalm PCS-107AgCu）を塗布し、自然乾燥させた様子を示す。樹脂材料は、(a)ポリカーボネート（PC），(b)アクリル，(c)ABS，(d)PET，(e)ポリ乳酸（PLA），(f)ナイロン，(g)ポリアセタール（POM）の 7 種類である。乾燥時に PET では導電性膜に亀裂が生じ、ナイロンでは完全に剥離した。また、PC，アクリル，POM はリング形状に切削加工を試みた際に導電性膜が剥離した（図 12）。PLA は 3D プリンタで造形出力したものであり、導電性膜の塗布により基板の歪みや湾曲が生じたため、ABS が基板材料として適当であると判断した。

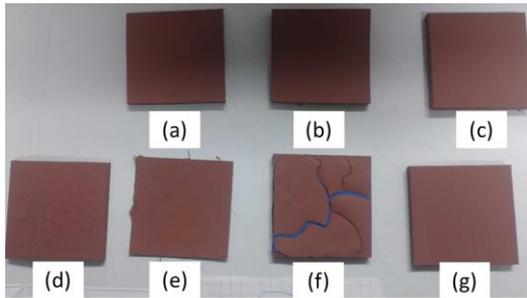


図 11 導電塗料を塗布した基板材料
(塗布後 11 日経過)

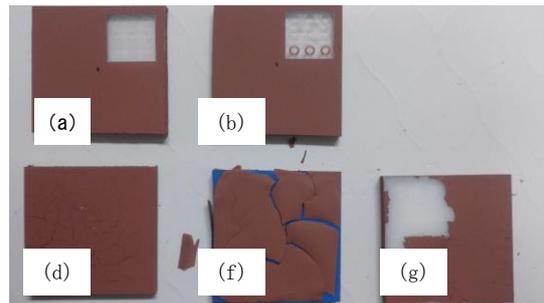


図 12 導電性膜が剥離した基板材料

3-2 SRR 構造の試作

前節で示したように、導電性膜の形成に使用する導電性塗料と基板材料との相性より、基板材料として ABS 樹脂を採用して SRR 構造の製作を試みた。始めに、ABS 基板に銀銅導電塗料スプレーを均一に塗布し、十分に自然乾燥させた。次に、3D モデリングマシン（Roland 社 MODELA MDX-50）を用いて、基板上に形成された導電性膜を SRR 形状に切削した。ここで、エンドミルは $\phi 3 \times 26$ （ユニオンツール社 CPR 2030-26）および $\phi 0.4 \times 1.2 \times 5$ （日進工具社 RSE 230）を使用し、切削する深さは 0.1 mm とした。

試作した SRR を図 13 に示す。また、基板上の SRR 要素すべてについてそれぞれの寸法を測定し、その平均値を作製寸法として設計値との誤差を求めた結果を表 2 に示す。ここで、リング厚さ t の値は SRR の作製に用いた基板と同時に導電塗料を塗布した別の基板に形成された導電性膜の膜厚をマイクロメータで測定し、その他の寸法はデジタル顕微鏡により測定した。作製寸法の誤差は最大でもギャップ幅 g の +8% であるが、共振周波数は約 4.0 GHz 高周波側にずれていることがわかる。

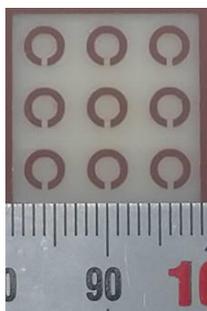


図 13 試作した SRR

表 2 試作した SRR の寸法測定結果

| | 設計寸法 | 作製寸法 | 誤差 |
|------------------|--------------------|--------------------|---------------------|
| リング内半径 r | 1.20 mm | 1.18 mm | -0.02 mm |
| リング幅 w | 0.80 mm | 0.80 mm | 0.00 mm |
| リング厚さ t | 35.0 μm | 35.4 μm | +0.04 μm |
| ギャップ幅 g | 0.50 mm | 0.54 mm | +0.04 mm |
| リング配列間隔 a | 6.00 mm | 5.96 mm | -0.04 mm |
| 共振周波数（計算値） f_0 | 79.3 GHz | 83.3 GHz | +4.0 GHz |

4 メタマテリアルへの液晶の適用の検討

4-1 液晶の適用

液晶(Liquid Crystal : LC)は自己組織的な分子配向により光学異方性を示すことから、ミリ波やテラヘルツ領域におけるデバイス材料として有用である。特にテラヘルツ領域において、サブ波長の単位構造を無限に集結させて、負屈折率等の多くの特性を示すメタマテリアルとLCを組み合わせたメタマテリアルの有用性が報告されている[6]。本研究では、LCを組み込んだメタマテリアルの基礎的検討としてFDTD法(時間領域差分法)によるシミュレーションを用いて、LC/金属メッシュ構造の単位構造(クロススロット型)のテラヘルツ電磁特性について検討した。

4-2 解析方法および結果

FDTD法による解析空間を図14に示す。 x 軸上の中心に図15に示すLC/金属メッシュ構造のクロススロットを配置した。解析中心周波数は0.6 THzで、解析の分割セルは $5\mu\text{m}$ とし、解析領域は $864\times 54\times 54$ セルとした。解析領域全体を囲うように吸収境界条件のPMLを挿入した。入射波として点波源で正弦波変調ガウシアンパルスを与え、 45° の角度で斜め入射した。クロススロットの寸法パラメータを変えながら透過特性を求めた。LCの屈折率は1 THzにおけるシアノビフェニル系ネマチック液晶5CB(4-ペンチル4'-シアノビフェニル)での値から常光屈折率 $n_o = 1.54$ 、異常光屈折率 $n_e = 1.69$ とした[7]。スロットの長さ $l = 170\mu\text{m}$ 、厚さ $d = 15\mu\text{m}$ と固定し、幅 w を $15\sim 90\mu\text{m}$ と変化させたときの透過係数 S_{21} の周波数特性を図16(a)に示す。また、スロットの長さ $l = 170\mu\text{m}$ 、幅 $w = 50\mu\text{m}$ に固定し、厚さ d を $5\sim 25\mu\text{m}$ と変化させたときの S_{21} の周波数特性を図16(b)に示す。幅 w 、厚さ d の値を大きくすることによって、最大透過周波数帯が低域側に微小ではあるが変動することがわかった。

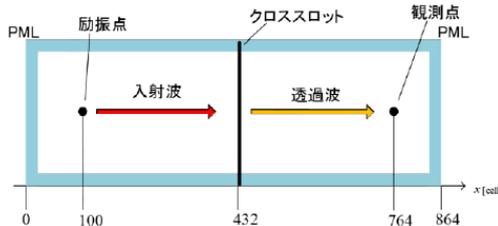


図14 解析空間

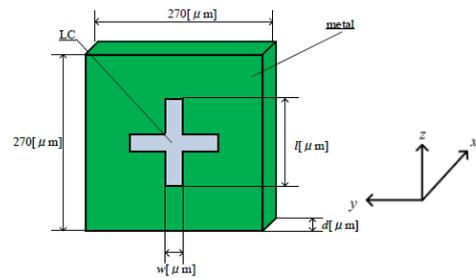
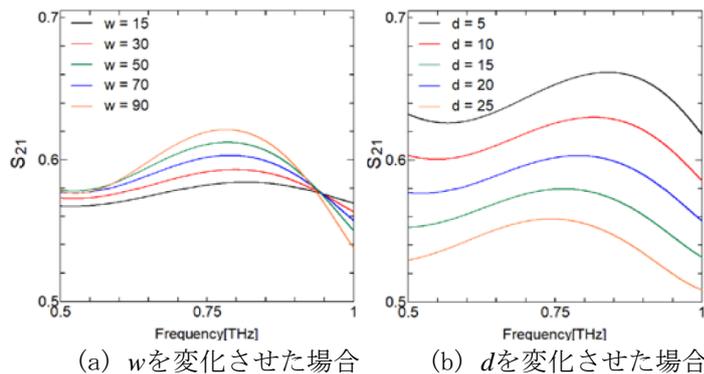


図15 クロススロットの寸法



(a) w を変化させた場合 (b) d を変化させた場合
図16 S_{21} の周波数特性

5 まとめ

本研究では液晶を用いたメタマテリアルのミリ波領域における制御素子の開発を目指して、この周波数領域におけるメタマテリアルの設計技術の確立と液晶によるミリ波制御素子の可能性を探るため基礎的な検討を行った。メタマテリアルを構成する単位素子の一つである1分割1重SRRを、ミリ波帯の波長以下の寸法での設計を試み、 $70\sim 80\text{GHz}$ 帯ミリ波に応答するメタマテリアル構造の可能性が示された。また、樹脂基板

と導電性膜を使って、3Dモデリングマシンによる切削加工でSRR構造を試作し、簡易的な製作方法でのメタマテリアル構造の実現の可能性が示された。さらに、FDTD法による数値計算により、液晶を適用したクロススロット構造のテラヘルツ応答に対する検討を行い、この周波数領域における液晶制御素子の有用性が確認された。今後は、テラヘルツからミリ波領域へとシミュレーションの周波数領域を拡大し、ミリ波帯液晶制御素子の検討を進めていく予定である。また、設計・試作においても、メタマテリアル構造への液晶の添加方法、液晶を駆動するための電極構造等について継続して取り組んでいく予定である。

【参考文献】

- [1] 木村達也訳, “フォトニック結晶—ナノ光デバイスを目指して—”, オーム社(2012).
- [2] M. Tanaka and S. Sato, “Millimeter-Wave Deflection Properties of Liquid Crystal Prism with Stack-Layered Structure”, Japanese Journal of Applied Physics, Vol.40, No.10B, L123-L1125(2001).
- [3] M. Tanaka and S. Sato, “Focusing Properties of Liquid Crystal Lens Cells with Stack-Layered Structure in the Millimeter-Wave Region”, IEEE Microwave and Wireless Components Letters, Vol.12, No.5, pp.163-165 (2002).
- [4] 堀越智, 萩行正憲, 田中拓男, 高野恵介, 上田哲也, “図解 メタマテリアル—常識を超えた次世代材料—”, 日刊工業新聞社(2013).
- [5] A. Ishikawa, T. Tanaka and S. Kawata, “Negative Magnetic Permeability in the Visible Light Region”, Phys. Rev. Lett., 95, 237401(2005).
- [6] 伊藤良太, 本間道則, 能勢敏明, “テラヘルツ帯で動作する液晶デバイスの基礎特性の評価”, 秋田県立大学ウェブジャーナル B., vol.2, pp.31-35 (2015).
- [7] N. Vieweg, *et al.*, “THz properties of nematic liquid crystals”, J. Infrared Milli. Terahz. Waves, vol. 31, no. 11, pp. 1312-1320 (2010).

〈発表資料〉

| 題名 | 掲載誌・学会名等 | 発表年月 |
|--|---|-------------|
| 分割リング共振器によるミリ波帯メタマテリアルの設計 | 2019年度電気関係学会東北支部連合大会講演予稿集, 1B07 | 2019年8月22日 |
| ミリ波導波管スロットアレーアンテナに装荷する半球付き誘電体カバーの形状設計と試作 | 2019年度電気関係学会東北支部連合大会講演予稿集, 1B14 | 2019年8月22日 |
| 周波数選択性を有するスロットアンテナの開発に関する解析的検討 | 2019年度電気関係学会東北支部連合大会講演予稿集, 1B15 | 2019年8月22日 |
| THz液晶デバイスのFDTD解析に関する基礎的検討 | 令和元年度東北地区高等専門学校専攻科産学連携シンポジウム, T19-P2-33, p.48 | 2019年11月30日 |
| 分割リング共振器によるミリ波帯メタマテリアルの設計および試作 | 第25回高专シンポジウム in Kurume 講演要旨集, PE-23 | 2020年1月25日 |
| 負の実効透磁率を有するミリ波帯SRR構造の製作方法の検討 | 令和2年東北地区若手研究者研究発表会, R2-P-17, pp.133-134 | 2020年2月29日 |
| ミリ波帯におけるSRR構造メタマテリアルの設計および試作 | 2020年電子情報通信学会総合大会エレクトロニクス講演論文集1, C-2-42, p.65 | 2020年3月18日 |
| ミリ波導波管スロットアレーアンテナ用誘電体カバーのトポロジー最適化 | 2020年電子情報通信学会総合大会, C-15-16, p.21 | 2020年3月18日 |
| THz液晶デバイスのトポロジー最適化に関する基礎的検討 | 2020年電子情報通信学会総合大会, C-15-17, p.212 | 2020年3月18日 |