Development of a Simplified Fabrication Method of Electromagnetic Metamaterial Using Laser Printer

by

Shoichi SATO^{*1}, Takehisa SHIBUYA^{*2} and Moriaki WAKAKI^{*3} (Received on Mar. 31, 2014)

Abstract

Metamaterials generally consist of artificial structures which are smaller than their corresponding electromagnetic wavelength, and have the feature of exhibiting exotic optical phenomena, such as a negative refractive index. The conventional fabrication techniques of metamaterials use a focused ion beam system (FIB), electron beam lithography, a nanoimprint and so forth. However, these systems are highly developed and expensive. Another technique using printed circuit boards (PCB) is favorable in cost but requires a rather complex process of exposure and development for patterns. We have devised a cheap and easy fabrication method of metamaterials. This method is known as a PCB making technique using an iron and a laser printer. We have fabricated frequency tuned metamaterials with split-ring resonators (SRRs) for microwave bands and metamaterial inspired antennas (MMIA) for wireless LAN to promote greater utility by a simplified method for metamaterials fabrication.

Keywords: Metamaterial, Laser printer, Toner, Split-ring resonators, Fabrication method, MMIA

1. 緒言

1967年ロシアの物理学者 V. G. Veselago によって,負の誘電率と負の透磁率を持った媒質について述べた論文が投稿された¹⁾. 媒質中の電磁波の伝搬の記述において,正の誘電率と透磁率を持つ媒質を右手系,負の誘電率と透磁率を持つ媒質を左手系と称し,左手系では電磁波の伝搬ベクトルkがポインティングベクトルSと逆方向に進むことを示した.そのため,Doppler効果やCherenkov効果が通常と異なる方向に起き,負の屈折率の出現や平面レンズの可能性についても述べている.

屈折率nは簡易的に以下の式で与えられる.

$$n = \sqrt{\epsilon_r} \sqrt{\mu_r},\tag{1}$$

比誘電率 ε_rと比透磁率 μ_rが共に負であることで負の屈折 率を示すこととなるが,両者の符号が不一致である場合, 虚数解を得ることとなり,その物質内を電磁波は伝播す ることができない.

インペリアルカレッジロンドンの J. B. Pendry らは薄

- *1 工学研究科光工学専攻 修士課程
 *2 工学部光・画像工学科 教授
 *2 工学部光・画像工学科 特任教授
- *3 工学部光・画像工学科 特任教授

いワイヤ構造によりプラズマ周波数がマイクロ波領域に シフトし、マイクロ波領域でも負の誘電率が得られるこ とを報告した²⁾. 1999年切れ込んだ金属の円筒や二重リ ングを配列した構造をとることによって非線形な応答が 得られるという論文を発表した³⁾. これらワイヤ構造に よって誘電率を、金属の筒やリングによって透磁率を制 御可能な人工媒質の構想が明瞭となった. そして、2001 年にはカリフォルニア大学の D. R. Smith らによって、負 の誘電率と透磁率から負の屈折率が得られることが実証 された⁴⁾. 現在では、それらの効果は可視領域、更に紫 外領域で実現している⁵⁾.

電磁メタマテリアルは、目的とする波長よりも小さな サブ波長サイズの構造を作製することで、誘電率と透磁 率のみならず、旋光性や非相反性などの制御を行い、自 然では得られない巨大屈折率や負の屈折率、超高吸収な どの現象が得られる人工媒質である.メタマテリアルの メタ(meta-)とは beyond(越えて、向こう)を意味する接頭 語であり、メタマテリアルの言葉自体は従来の媒質を超 越した媒質を意味している.電磁的な効果を与える以外 にも音響(Acoustic)や弾性(Elastic)などにおいて特異な効 果を与える構造が考案されており、それもまたメタマテ リアルとして呼ばれている.ここでは電磁的な効果を与 えるものをメタマテリアルと呼ぶこととする.メタマテ リアルの形状は様々で、代表的な形状として分割リング 共振器(Split-Ring Resonators, SRRs)があり、金属リングに 切れ込みを入れた形状である.この形状により透磁率の 制御が可能である.他にもU字 SRRやI字、フィッシュ ネット、ナノロッドなどの形状が考案された⁶⁸⁾.

メタマテリアルの作製法は種々開発されているが、可 視、赤外領域に対応するマイクロやナノメートルオーダ の構造の作製には、電子線リソグラフィ装置 9,10)や集束 イオンビーム装置⁹⁾, ナノインプリント装置¹¹⁾等高度で 高価な装置が一般的に用いられる. マイクロ波やミリ波 領域でのメタマテリアルは、数ミリから数百マイクロス ケールの比較的大きなパターンによって構成されるため, プリント基板のようにエッチング手法を用いることがで き、従来のプリント配線板の作製法による作製法も用い られることもある¹²⁾.しかし、それには感光基板へのパ ターンの露光や現像などの工程が含まれている. それら の工程を省いたレーザプリンタを用いたインスタントな プリント配線板作製手法が考案されており(代表的な例 として http://fullnet.com/~tomg/gooteepc.htm), 各種応用が 試みられている.本報告では,この簡易的プリント配線 板作製法を用いることによってローコストで簡易的にメ タマテリアルを作製する手法の開発について述べている. 本手法で試作した幾つかのメタマテリアルの評価を行い、 本手法の有用性を検討した結果を報告する.

2. レーザプリンタを用いたトナーレジスト法 による微細パターン作製

2.1 トナーレジスト法プロセス

本プロセスは、従来のプリント配線板作製プロセスと 比較するとかなり簡素である(Fig. 1). 露光と現像過程を レーザプリンタ内部で済ましており、その工程を省略で きるのが特徴である.





設計したメタマテリアルのパターンをレーザプリンタ (LBP3800, CANON)で用紙に印刷し,銅張積層基板(ニカ プレックス,ニッカン工業)に用紙の印刷面と銅面が接触 するように貼り付け,圧力をかけながら熱し,銅張積層 基板へトナーパターンの転写を行った.その後,用紙を 剥がし塩化第二鉄溶液でエッチングを行った.水で基板 の洗浄を行った後,トナーレジストを溶剤で溶解し,銅 パターンを得た(Fig. 2).転写に用いたシステムと装置を Fig. 3 に示す.本報告で用いたレーザプリンタで得られ る最高解像度は 1200dpi である.今回転写に用いた印刷 用紙は,一般的に良く用いられるコピー紙とコート紙(グ ロス紙,マット紙)で,その中で本プロセスに最適な用紙 の決定も行った.



Fig. 2 Schematic diagram of the pattern transfer process. (<u>http://fullnet.com/~tomg/gooteepc.htm</u>参照)



Fig. 3 Schematic diagram of the heating press system (a), hydraulic press and heater (b), and heater controller (c).

2.2 作製可能最小パターンサイズ

本方法で作製可能な最小パターンサイズを調べる為に できる限り小型の U 字分割リング共振器(Fig. 4)の作 製を試みた.



Fig. 4 Designed U-shaped SRR to characterize the performance of the toner-resist process.

	Copying paper	Glossy coated paper	Mat coated paper
100% (250μm patterns)	СС СС С 500µm	500 µm	
90%		боо µт	ССС ССС 500 µm
80%	500 µm	500 μm	500 µm
70%	500 tm	500 LUM	500 tm

Fig. 5 250 μ m U-Shaped SRR patterns printed on each paper. The scale of the pattern was reduced by 10% down to 70% from the original size (100%). The bar shows the 500 μ m scale.

各用紙上でのトナー像を Fig. 5 に示す.用いた形状, 寸法として Fig. 4 に示した U 字分割リング共振器パター ンを用い,10%ずつ縮小印刷を行った.グロス紙では全 体にトナー像の形状が不鮮明であり,コピー用紙とマッ ト紙では比較的形状が明確であった.しかし,縮小率が 70%を下回るとコピー用紙,マット紙でも形状の判別が 困難で,形状の再現性に関しては70%(175µm パターン) が限度であった.また,いずれの用紙も線幅の再現がで きておらず,80µm から元の幅の倍の100µm ほどとなっ た. このことより本システムでの設計できる線幅の下限 は100μmと見積もられた.

銅張積層基板への転写プロセス後,表面上にトナー像 以外にも残留物としてコピー用紙では紙の繊維,コート 紙ではコート層が付着した.またトナー像の付着強度は コピー用紙よりもコート紙を用いた方が高かった.以上 より本手法での最適な用紙はマット紙とした.

作製条件として 50×50mm²の基板に対してハンドプレ ス機のゲージ圧力 30~50kg/cm²,加熱温度 140~150℃で 良好な転写が得られた.実際に基板に加わる圧力は以下 の式より求まる.プレス機の成形圧力 P,つまり物体に 実際にかかる圧力は,

$$P = \frac{S_R}{S} P_G \tag{1}$$

で表される. S_R はプレス機のラム面積, S はプレスされる物体の投影面積, P_G はゲージ圧力である.また,用いたプレス機で実際に基板にかかる圧力はラム面積を考慮すると,

$$P = \frac{12.57}{S} P_G \quad [kg / cm^2]$$
 (2)

となる. ここで S の単位は cm²であり, 基板の面積であ る. 今回用いたプレス機のラム面積は 12.57cm² である. 50x50mm²の基板であれば, ゲージ圧力 30kg/cm²で単位 面積(cm²)あたり 15kg ほどの圧力がかかることとなる.

設計値に関しては Fig. 4 で示した U字 SRR を用い,設計値と実際に作製出来た銅パターンとの比較を行った. 実際に作製した銅パターンを Fig. 6 に示す. 用紙上でのトナー像に対応し線幅は広がったまま転写され,それに従ってエッチングされるため,出来上がった銅パターンも線幅は広がることとなった.サイズに関しては U字の腕側では表面積が大きいため,サイドエッチの影響が大きいこともあり,設計値を下回る値となった. 個体差もあり,必ずしも設計値通りとは言えないが,250µm 前後のパターンが作製可能であることが確認できた.



Fig. 6 Fabricated 250 µm U-shaped SRR.

3. 二重分割リング共振器(Split Ring Resonators, SRRs)型メタマテリアルの試作と 周波数特性評価

上記作製法を用いて、Fig. 7 に示す 2.45GHz での共振 周波数 f_0 を得られるように設計した二重の分割リング共 振器(Split Ring Resonators, SRRs)構造を試作し、周波数 特性評価を行い、設計値との比較を評価した.



Fig. 7 Schematic diagram of designed double-SRRs.

用いた各設計値を Table 1 に示す. 2 重 SRRs の実効透磁 率 μ_{T} は以下に示す Pendry の式 ³⁾より算出した.

$$\mu_{r} = 1 - N \frac{\pi r^{2} \omega^{2}}{\omega^{2} - \frac{3l}{\pi^{2} r^{3} \mu_{0} C} + \frac{2l\rho}{r\mu_{0}} \omega i}$$
(3)
$$C = \frac{\epsilon_{0}}{2} \ln \frac{2c}{\pi^{2}}$$
(4)

$$= \frac{-1}{\pi} \ln \frac{-1}{d} \tag{4}$$

 μ_0 は真空透磁率, μ_r は実効透磁率, ω は入射波の角周 波数,rはSRR 半径,cはリング幅,dはリング間幅,l はユニット厚さ方向間隔,Cはキャパシタンス, ρ は抵 抗率,N(=a⁻²)は単位面積当たりのリング数である.この 二重SRRsに対して式(3)より算出した比透磁率はFig.8 に示すような共鳴スペクトルを示す.



Fig. 8 Calculated relative permeability of fabricated double-SRRs with resonance frequency of 2.45 GHz.

上記設計パターンに基づき共振周波数 f₀=2.45GHz が 得られるように銅張積層基板上に試作した SRRs を Fig. 9 に示す.

Table 1 共振周波数 f₀=2.45[GHz]の SRRs の設計値

共振周波数 f ₀	2.45GHz	
内リング半径 r	4000µm	
リング幅 c	1700µm	
リング間隔 d	200µm	
SRR 横方向間隔 a	16000µm	
SRR 厚み方向間隔1	500µm	
磁気プラズマ周波数 fmn	2.73GHz	



Fig. 9 Fabricated double-SRRs with resonance frequency of 2.45 GHz.

試作したパターン基板(Fig. 9)を 10 枚重ねたものを導 波管式マイクロ波測定装置内にセットしネットワークア ナライザ(N9923A, Agilent Technologies)を用いて周波数 特性の評価を行った.測定システムの外観写真を Fig. 10 に示す.測定には自作簡易導波管式マイクロ波測定装置 (Fig. 11)を用いた.シャーシ内高さ b=68.5mm, 幅 a=123.2mm であり,設計上約 2.2GHz 以下の電場,約 1.2GHz 以下の磁 場は遮断されるようになっており,内面は銅箔テープによる ノイズ対策を行っている.しかし,シャーシ自体の共振や銅 テープの皺などによって余計な損失が生じるため,あくまで 参考の値を測定するに過ぎず,相対的な議論を行なった.

波源である SMA 端子ターミナルのモノポールアンテナは 2.4GHz で共振するように調整したもので,長さは約 c=29mm である. 測定時には電力を-15dBm(\Rightarrow 0.032mW), ゲートを± 5ns に設定した.



Fig. 10 Overview of transmission characterization system at microwave frequency.



Fig. 11 Homemade microwave guide cavity with monopole antennas for microwave transmission and reflection measurements. (a) outer view with input and output SMA port connectors, and (b) inner view with dipole anntenas connected with SMA connectors.

感度を高めるために試作したパターンを10枚重ねた 試料を用いて,Fig.12に示す測定配置で透過損失を測定 した.ここでS₂₁,S₁₁は各々Port1と2間の透過係数お よびPort1での反射係数を表す.得られた透過係数(|S₂₁|) スペクトルをFig.13に示す.参考のために,試料を挿入 していないブランクでの透過係数も示す.自作したキャ ビティの特性を反映し多少のピークが見られる.試料の 透過係数は,設計通り2.45GHzに共振を得ている.この ことより本手法がこのサイズの電磁メタマテリアルの作 製手法として有効であると言える.



Fig. 12 Schematic diagram of measurement system for transmission and reflection spectra of fabricated double-SRRs with resonance frequency of 2.45 GHz.



Fig. 13 Measured S₂₁ of blank and double-SRRs with resonance frequency of 2.45 GHz.

4. メタマテリアルーインスパイアド・アンテ ナ(MMIA: MetaMaterial Inspired Antenna)の 試作

メタマテリアルのアンテナへの応用例は多く報告されて おり¹³⁻¹⁵⁾, 2.4GHz 帯といった無線 LAN などの規格に準じて 設計されたものもあり¹⁶⁾, 今後も活躍する場が広がることと 思われる. その一方でこれらをメタマテリアルと明言せずに インスパイアとして記述した報告もある¹⁷⁾. 分割リング共振 器(SRR)を利用したアンテナとループアンテナとの差異を考 えると必ずしも明確でないが, 一つは給電点の違いとも受け 取れられるが, ループアンテナと同様な取り方であってもメ タマテリアルとして報告されている例もある¹⁸⁾. その意味で はメタマテリアル(特に SRR)とループアンテナの決定的な 違いは曖昧でもある. ここで SRR などのようにメタマテリ アルの形状を模したアンテナをメタマテリアルーインスパ イアド・アンテナ(MMIA)と呼び, 具体的な応用例として無 線 LAN 用のアンテナを試作し,研究室内で伝送試験を行っ た.



Fig. 14 Fabricated antenna patterns on substrate after etching.

設計したアンテナは PCBE によって印刷データを作製し, 本手法でアンテナの作製を行った.このパターンは 200 μ m 幅の隙間を多く含むため,設計値とは多少の誤差が生じやす く,また,線同士のショートも生じやすい.エッチングが完 了したアンテナパターンを Fig. 14 に示す.基板を各アンテ ナ単位で切り取り, SMA コネクタに取り付けた様子を Fig. 15 に示す.コネクタへの取り付けは大変難しく,それらの ばらつきをふまえて,全部で6つのアンテナを作製し,ネットワークアナライザ(N9923A, Agilent Technologies)を用いて 反射係数(S₁₁)測定を行った. (Fig. 16)



Fig. 15 Fabricated MMIA (MetaMaterial-Inspired Antenna) connected to SMA connector.



Fig. 16 Simulated and experimental reflection coefficients of MMIA (fabricated MetaMaterial-Inspired Antenna).

ネットワークアナライザによる反射係数(S₁₁)の測定では,共 鳴点が設計した 2.45GHz から 2.60GHz へ試作したアンテナ の共鳴点がずれていることが観測された.作製したアンテナ 6 つ全てで若干の個体差はあるものの高周波側へのシフトが 見られた.その結果 2.4GHz 帯での放射・受信特性が悪くな っていることを意味している.このずれは,ソルダカップ部 を短くすることで,シフト量が減少したことより主に SMA コネクタへの接続技術によると考えられる.



Fig. 17 Wireless LAN experiment at 2.427GHz within laboratory room between router and PC with the distance about 3.4m.

無線 LAN の実験環境を Fig. 17 に示す.使用したルータは WN-G54/R4 (I-O DATA), PC は Inspiron 620s (DELL)を使用し, 約 3.4m の距離で行った. 試作したアンテナをパソコン(PC) の無線 LAN のアンテナとして用いた結果,共鳴周波数のず れがあるにもかかわらず,室内では市販の無線 LAN 用モノ ポールアンテナに劣らない受信強度が得られた.アンテナの 角度によって受信感度の低下が確認でき,指向性についても 確認できた.また,無線ルータにこのアンテナを用いた場合 では送信特性が悪く,モノポールアンテナに劣った.

5. テラヘルツ領域メタマテリアル作製への 展望

より高周波の電磁波領域へ拡張するには、より高精細 なメタマテリアル構造を作る必要がある.作製可能な構 造サイズをさらに微細にするにはレーザプリンタで得ら れる解像度を高くすることが有効である.本研究では最 高解像度 1200dpi のプリンタを用いているが、現在にお いては 2400 や 4800dpi のプリンタが普及している.この ことからさらなる微細化を図ることが可能であると言え る.銅への転写に際して理想的な用紙を挙げるならば、 平滑性がありながらも高い摩擦係数を持ち、高い耐熱性 と水溶性及び転写・剥離時に余計な繊維やコート層など の付着物がないトナーを転写しやすい用紙である.

以上をまとめると、本作製手法では大きく分けて3つ の要因がパターンのラフネスを生んでいる.

a)プリンタ等の性能:解像度,トナー像の広がりや欠損 など → 主に機械的エラー要因

b)転写処理:トナー像欠損,繊維やコート層残留 → 主 にヒューマンエラー要因

c)エッチング:トナー像欠損,サイドエッチ,パターンショート → 主にヒューマンエラー要因

機械的要因の改善にはコストの上昇を伴い,本報告の目 的である研究室で簡便に試作可能という趣旨とトレード オフの関係になる.

6. まとめ

レーザプリンタを用いた電磁メタマテリアルの簡易的 作製手法の確立を行った.設計したパターンの転写につ いて最適な作製条件の決定を行い,最小で250µmのU 字 SRRの作製に成功した.転写に最適な用紙としてコー ト紙であるマット紙に決定し,30~50kg/cmの圧力下で, 140~150℃で加熱することで良好な結果を得た.作製で きるサイズに限度はあるものの1時間で50×50mm²のサ イズの基板にサブミリオーダのパターンの作製が可能で, 研究室レベルでの試作には有用であることを実証した. また,本手法の基本的な製造環境は簡便で安価な手法で あると考えられ,研究室等の教育現場においてメタマテ リアルの試作を通じた体験に寄与すると考えます.

謝辞

試作したメタマテリアルの性能評価に関しまして、東 京工芸大学新宅敏宏教授に感謝致します.

参考文献

- V. G. Veselago: The Electrodynamics of Substances with Simultaneously Negative Values of ε and μ, Sov. Phys. Uspekhi 10, pp. 509-514 (1968).
- J. B. Pendry, A. J. Holden, W. J. Stewart, I. Youngs: Extremely Low Frequency Plasmon in Metallic Mesostructures, Phys. Rev. Lett. 76, pp. 4773-4776 (1996).
- J. B. Pendry, A. J. Holden, D. J. Robbins and W. J. Stewart: Magnetism from Conductors and Enhanced Nonlinear Phenomena, IEEE Trans. Microwave Tech 47, pp. 2075-2084 (1999).
- R. A. Shelby, D. R. Smith, S. Schultz: Experimental Verification of a Negative Index of Refraction, Science 292, pp. 77-79 (2001).
- Ting Xu et al.: All-Angle Negative Refraction and Active Flat Lensing of Ultraviolet Light, Nature 497, pp. 470-474 (2013).
- 6) Filippo Capolino, "Theory and Phenomena of Metamaterials", CRC Press (2009).
- Costas M. Soukoulis, Stefan Linden, Martin Wegener: Negative Refractive Index at Optical Wavelengths, Science 315, pp. 47-49 (2007).
- 8) Martin Wegener, Stefan Linden: Shaping Optical Space with Metamaterials, Phys. Today **63**, pp. 32-36 (2010).
- Alexandra Boltasseva, Vladimir M. Shalaev: Fabrication of Optical Negative-Index Metamaterials: Recent Advances and Outlook, Metamaterials 2, pp.1 -17(2008).
- G. Dolling, M. Wegener, C. M. Soukoulis, S. Linden: Negative-Index Material at 780nm Wavelength, Opt. Lett. 32, pp.53-55 (2007).

- Wei Wu et al: Midinfrared Metamaterials Fabricated by Nanoimprint Lithography, App. Phys. Lett. 90, 063107 (2007).
- 12) Fuli Zhang, Sylvain Potet, Jorge Carbonell: Negative-Zero-Positive Refractive Index in a Prism-Like Omega-Type Metamaterial, IEEE Trans. on microwave theory and Tech. 56, pp.2566-2573 (2008).
- H. X. Araujo, S. E. Barbin, L. C. Kretly: Metamaterial Cell Patterns Applied to Quasi-Yagi Antenna for RFID Applications, IEEE Radio and Wireless Symposium (RWS), 383 (2012).
- 14) S. R. Bhadra Choudhuri, D. R. Poddar, R. Ghatak, R. K. Mishra: Modulating Properties of a Microstrip Patch Antenna Using Complementary Split Ring Resonator, Antenna Technology, 2009. iWAT 2009. IEEE International Workshop, 1 (2009).
- C. Caloz, A. Rennings: Overview of Resonant Metamaterial Antennas, IEEE Antennas and Propagation EuCAP 2009 3rd Europian Conference, 615 (2009).
- 16) Xiaoyu Cheng, David E. Senior, Cheolbok Kim, Yong-Kyu Yoon: A Compact Omnidirectional Self-Packaged Patch Antenna With Complementary Split-Ring Resonator Loading for Wireless Endoscope Applications, IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 10, 1536 (2011).
- 17) N. Zhu, R. W. Ziolkowski, H. Xin: A metamaterial-inspired, electrically small rectenna for high-efficiency, low power harvesting and scavenging at the global positioning system L1 frequency, Appl. Phys. Lett., 99, 114101 (2011).
- Yingquing Xia, LinWang: A Wireless Sensor Using Left-Handed Metamaterials, Wireless Communications, Networking and Mobile Computing, 2008. WiCOM '08.
 4th International Conference, 1 (2008).