

【研究論文】

【令和6～7年度 県単独試験研究】

印刷機を用いた機能性形状転写の研究

小松 迅人

機械電子情報技術部

(現 自動車産業支援部)

近年、印刷技術の微細化が急速に進展しており、製造業における応用が期待されている¹⁾。とりわけ、省人化や生産性の向上、省資源化といった社会的要請を背景に、新たな製造手法としての印刷技術の活用が注目されている²⁾。

本研究では、構造物構築を可能とする印刷技術の応用条件を明らかにすることを目的とし、スクリーン印刷法と手動オフセット印刷によって形成されたパターンと、半導体プロセスであるフォトリソグラフィ技術を用いた高精度に作製されたメタサーフェス構造との機能差に着目して、両製法によるパターン形成の違いがメタサーフェスの機能性に及ぼす影響を検討したので報告する。

キーワード：スクリーン印刷、オフセット印刷、メタサーフェス、電磁界シミュレーション(HFSS)、フリースペース測定法

1 緒言

近年、印刷技術の微細化が急速に進展しており、製造業における応用が期待されている。エレクトロニクス分野や微細構造体の形成など、機能性を伴う新たな応用分野へと展開が進んでいる。特に、スクリーン印刷、インクジェット印刷、グラビア印刷といった既存の印刷プロセスに対し、微細化・高精度化・材料多様化が進められており、これまで半導体プロセスに依存してきた領域においても、簡便かつ低コストな製造技術として期待されている。これらの動きは、近年の「ファインパターン印刷技術」として体系化されつつあり、研究開発が国内外で活発に行われている³⁾。とりわけ、省人化や生産性の向上、省資源化といった社会的要請を背景に、新たな製造手法としての印刷技術の活用が注目されている。印刷手法は、同一構造の大量生産に適していることから、地域中小企業においても関心が高まりつつあるが、導入には依然として慎重な姿勢が見られる。その主因として、装置のみでは製造が成立せず、電子部品等への応用においては紙媒体とは異なる転写条件やプロセス制御が求められる点が挙げられる。

一方、社会的背景として、国内の製造業は生産人口の減少による人手不足に直面しており、生産工程の自動化・省人化が急務となっている。加えて、カーボンニュートラルや資源循環型社会の実現に向けて、省資源・省エネルギーな製造プロセスへの転換が求められてい

る。このような要請に応える手段として、印刷技術による製造は、材料使用量の最小化、エネルギー消費の抑制、製造装置の簡素化といった観点から注目されている。

特に、同一パターンの繰り返し構造を短時間かつ大量に形成可能な印刷技術は、中小企業にとっても導入のハードルが比較的低く、ものづくり産業においても応用可能性が高いと評価されつつある。しかしながら、実際の現場では装置を導入するだけで即座に実用化できるものではなく、その技術的成立には多くの課題が残されている。

主な課題の一つとして、印刷対象物の違いに起因するプロセス条件の最適化が挙げられる。紙媒体への印刷と異なり、電子部品や樹脂、金属基板などへの印刷では、インクの濡れ性、密着性、焼成条件、さらには微細構造の精度と再現性といった要素が製品機能に直結する。また、材料の熱的・化学的特性に応じた工程制御が求められるため、プロセス開発には応用先ごとの個別検討が不可欠である。

本研究では、こうした背景を踏まえ、構造物による機能発現を目的とした印刷技術の応用において、量産技術としての成立性を持った基礎的な転写条件のパラメータの抽出を目的とする。

印刷プロセス(スクリーン印刷法、オフセット印刷法)と半導体プロセスによる同じパターンのメタサーフェスを作製し、作製手法の違いによるパターン形成の違いがメタサーフェスの機能性に及ぼす影響をフリースペース法

により比較・評価したので報告する。

2 実験方法

半導体プロセスと印刷プロセスでの機能発現の違いを検証するため、令和4～5年度の期間で実施した研究テーマ「メタサーフェスデバイスの研究」⁴⁾のパターン形状およびサンプルを比較用に用いた⁵⁻⁸⁾。

2.1 メタサーフェスパターン

ある角度に反射させるグラディエントメタサーフェスのパターンおよびパッチは、スネルの法則から1セルのX方向の長さDxは下記の式で表される。

$$Dx = \frac{\lambda}{|\sin\theta_r - \sin\theta_i|}$$

θ_r : 反射角、 θ_i : 入射角

また、1セルのY方向の長さDyは、

$$Dy = \frac{\lambda}{2}$$

で求まる。

また、ある反射角度 θ を発現させる、i番目のパッチの抵抗値は下記の式で表される。

$$R(X_i) = \frac{Z_s(X_i) - \eta_0}{Z_s(X_i) + \eta_0}$$

$$Z_s(X_i) = \frac{\eta_0}{\sqrt{\cos\theta_R}} \frac{\sqrt{\cos\theta_R} + \exp(-jk_0 X_i \sin\theta_R)}{1 - \sqrt{\cos\theta_R} \exp(-jk_0 X_i \sin\theta_R)}$$

ここで、 X_i はi番目のパッチ中心座標、 $\eta_0(\Omega)$ は真空中のインピーダンス、 k_0 は真空中の空間波数である。

以上の式から、セル内のパッチの数を8個として、真空中の空間波数が28 GHz帯で60度反射を起こす各パッチの位置と位相を求めた(図1)。

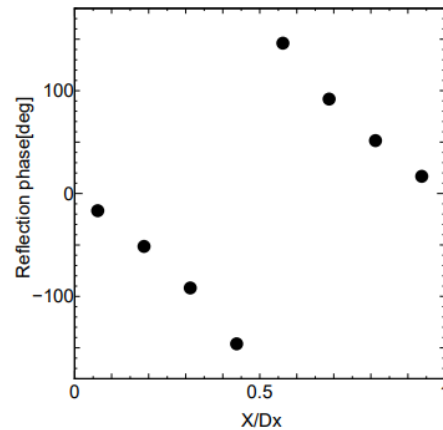


図1 パッチの位置と位相

パッチのそれぞれの長さは、電磁界シミュレーション Ansys HFSS (Ver 13.0) を使用し割り出した。

2.2 パターン作製方法

(1) 半導体プロセス法(フォトリソグラフィ)

基材には、厚さ100 μm のポリエステルフィルム(コスモシャインA4160)に、メタロイドML-450⁹⁾とレジストを配合したインクを両面塗布したものを使用した。パターン露光には高精度な露光機を使用した。

(2) スクリーン印刷法

サンプル作製に使用したスクリーン印刷では、線幅が20 μm 増加する特徴があるため、それぞれのパッチ幅の寸法を20 μm 縮小し1.23 μm とした(図2)。

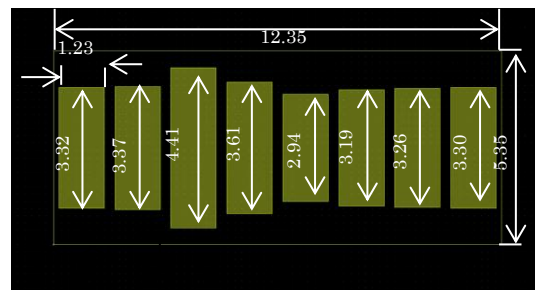


図2 1セル内のパッチの位置と寸法

スクリーン版の紗はSUS、460メッシュ、乳剤厚8 μm 、基材には、ポリエステルフィルム(コスモシャインA4160:厚み100 μm 、50 μm)、インクはパターン部にML-270、裏面のグラント面はML-250SLV3を使用した。

スクリーン印刷は以下の工程で実施した。

- ① 裏面にML-250SLV3をバーコーターにより塗布 (wet6 μm)→乾燥120 $^{\circ}\text{C}$ ×2 分

- ② 表面にML-270スクリーン印刷→乾燥120℃×20分
- ③ アルカリ脱脂 45℃×3分
- ④ 無電解Cu 40℃×20分(厚み1μm狙い)
- ⑤ 防錆処理(BTA系)RT×30秒
- ⑥ 熱処理120℃×30分

(3) 手動オフセット印刷法

パターン作製された版にメタロイドインクをスピコーターで塗布(500 rpm、20 秒)し、ブランケットにこの版のパターンを手動で転写後、ブランケットを基材に0.2 MPaの圧力で押し当てオフセット印刷を行った。その後、下記の順番でメッキ処理を行った。

- ① アルカリ脱脂 45℃×3分
- ② 無電解Cu 40℃×20分
- ③ BTA系防錆処理 RT×30秒
- ④ 熱処理 100℃×30分

3 実験結果

3.1 作製サンプルの寸法比較

28 GHz、60 度反射を発現するメタサーフェスの設計寸法と、半導体プロセス法およびスクリーン印刷法で作製したサンプル寸法の違いを測定した(表1)。

半導体プロセス法では20 μm、スクリーン印刷手法では150~200 μmのパッチの幅が増加していた(図3)。

表1 設計・シミュレーション寸法と各プロセスで作製したサンプルの計測値との関係
(設計値との差:測定箇所3カ所の平均値)

	設計	フォトリソ	スクリーン	スクリーン
基材厚さ	100 μm	100 μm	100 μm	50 μm
パッチ間 (mm)	0.3 ※+10μm	0.3 (+0.01)	0.19 (-0.11)	0.09 (-0.21)
パッチ幅 (mm)	1.23 ※-20μm	1.27 (+0.02)	1.38 (+0.15)	1.43 (+0.2)
インク 膜厚 (mm)	0.1	0.03 (-0.07)	0.02 (-0.08)	0.04 (-0.06)

※スクリーン印刷用に設計寸法変更

(設計寸法:パッチ間0.29、パッチ幅1.25 mm)

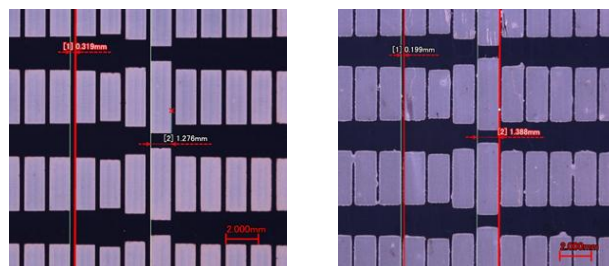


図3 フォトリソ(左側)とスクリーン100 μm(右側)のサンプル外観

3.2 作製サンプルの機能比較

評価測定は、京都府中小企業技術センターの光・マイクロ波・ミリ波ネットワーク測定システム(アンリツ社製広帯域ベクトルネットワークアナライザ ME7838A)¹⁰⁾を使用し、フリースペース法による吸収・シールド性能を評価した(図4)。

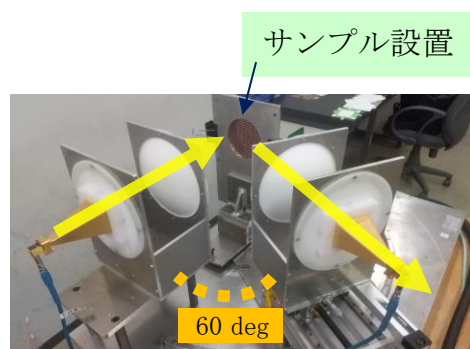


図4 測定風景

3.2.1 半導体プロセスのサンプル特性(基材t=100 μm)

半導体プロセス(フォトリソグラフィ)により作製したメタサーフェスサンプルの26.5~40 GHz帯での反射特性は、28 GHz付近で変化が見られた。また、同じサンプルを180度回転させた特性は、39 GHz付近で反射傾向が見られた(図5)。

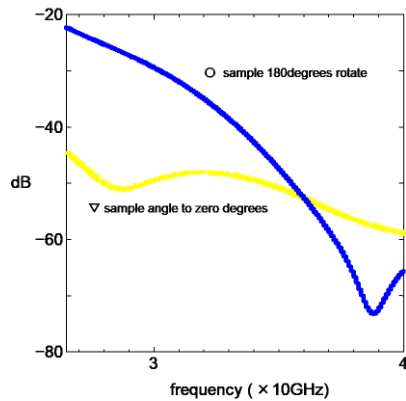


図 5 フトリソグラフィによるサンプル反射板の
26.5～40 GHz反射特性実測値 (PET $t=100 \mu\text{m}$)

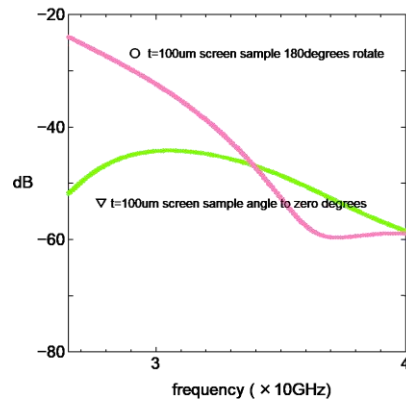


図 7 スクリーン印刷手法試作反射板の
26.5～40 GHz反射特性実測値 (PET $t=100 \mu\text{m}$)

3.2.2 スクリーン印刷のサンプル特性(基材 $t=100 \mu\text{m}$)

PETフィルムの厚み $100 \mu\text{m}$ の基材に、スクリーン印刷により作製したメタサーフェスサンプルの18～26.5 GHz帯での反射特性は、21 GHz付近で変化が見られた(図.6)

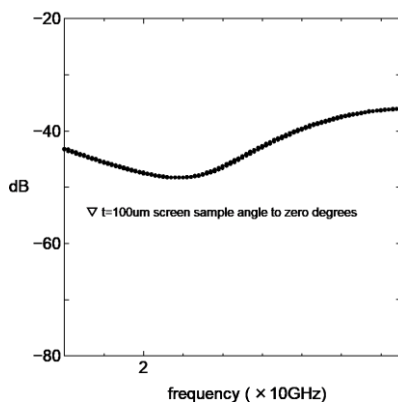


図 6 スクリーン印刷手法試作反射板の
18.5～26.5 GHz反射特性実測値 (PET $t=100 \mu\text{m}$)

同じスクリーン印刷で作製したサンプルを180度回転させた26.5～40 GHz帯での測定では、37 GHz付近で反射傾向が見られた(図7)。

3.2.3 スクリーン印刷のサンプル特性(基材 $t=50 \mu\text{m}$)

PETフィルムの厚み $50 \mu\text{m}$ の基材に、スクリーン印刷により作製したメタサーフェスサンプルの反射特性は、37.5 GHz付近で変化が見られた。また、同じサンプルを180度回転させた特性は、38.5 GHz付近で反射傾向が見られた(図8)。

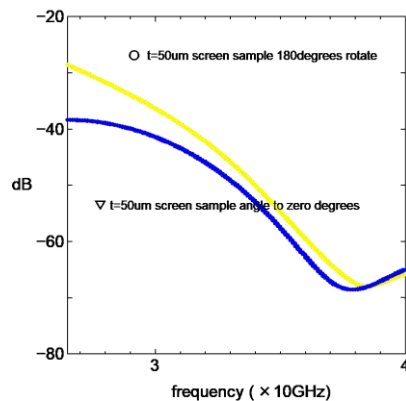


図 8 スクリーン印刷手法試作反射板の
26.5～40 GHz反射特性実測値 (PET $t=50 \mu\text{m}$)

半導体プロセスによるパターンでは、高精度な寸法制御が可能で、メタサーフェスとしての機能(反射制御)が明確に発現した。また、180度回転すると特性が変化するグラジエントメタサーフェスの特徴が確認できた。

スクリーン印刷法のサンプルでは、パターン寸法のばらつきやエッジの丸まりが確認された。基材の厚みが

100 μm の場合は、比較的パターン形状の転写が見られたため、メタサーフェスの特徴である180度回転すると特性の変化が見られた。

一方、基材の厚みが50 μm のスクリーン印刷で作製したサンプルは、パターン形状が非対称ではなくなっていることが見られ、サンプルを180度回転させた反射特性が相似することが確認できた(図9)。

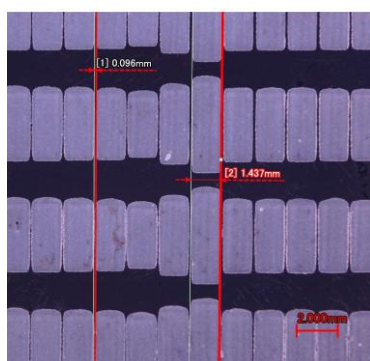


図9 スクリーン 50 μm のサンプル外観

3.2.4 手動オフセット印刷のサンプル特性

メッキ後のサンプルは、手動でオフセット印刷を行ったため印圧が不均一になり、 $\phi 100$ mmのサイズ領域では転写されない部分があるなどの転写斑が確認された(図10)。

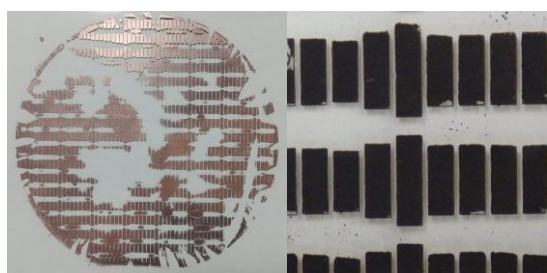


図10 手動オフセット印刷で作製したサンプル外観
(転写斑の例とパターン部)

パターンが転写されている部分のパッチ間、パッチ幅は、それぞれ30 μm 程度の誤差であった(表2)。

これは、フォトリソグラフィで作製したサンプルに近い数10 μm 単位の差であった。

表2 設計値の寸法と手動オフセット印刷での
パターン部の差

設計値	パッチ間	パッチ幅
(mm)	0.293	1.25
サンプル	0.264 ※-29 μm	1.281 ※31 μm

※設計値との差:測定箇所3カ所の平均値

手動オフセット印刷で転写されたサンプルパターンでは、ある特定の周波数に反射制御の機能が明確に発現した。このサンプルは、転写斑があるものの、セル寸法のばらつきが抑えられ、パッチ部ではエッジの角が確認された。フリースペース法による測定では、34.6GHzに反射のピークが出現したが、転写斑の影響から40GHz以上にピークが出現することが確認できた(図11)。

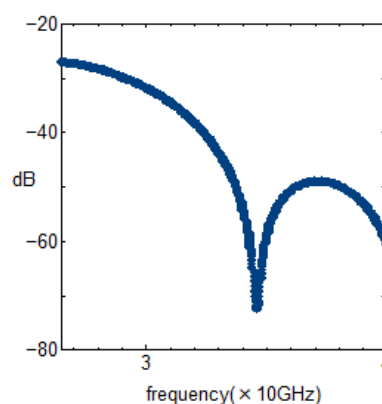


図11 手動オフセット印刷試作反射板の
26.5～40 GHz反射特性実測値 (PET t=100 μm)

3.2.5 $\phi 40$ の測定治具を用いた手動オフセット印刷のサンプル特性

転写斑が少なく機能性を持たせたパターンが転写されているサンプル分部を、通常 $\phi 100$ のアルミ板の測定治具から $\phi 40$ の治具に交換し反射特性の評価を行った(図12、13)。

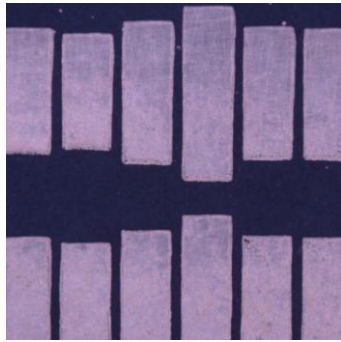
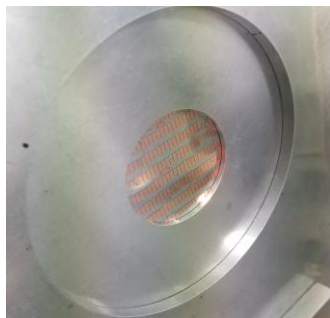
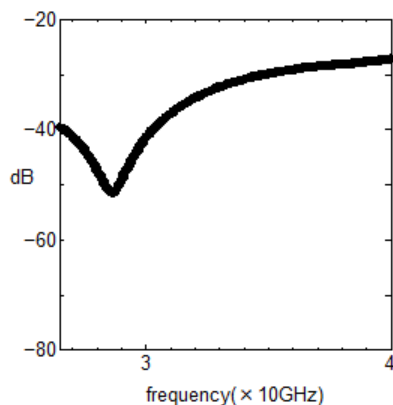


図 12 転写斑が少ないパターン部の外観

図 13 $\phi 40$ の治具の外観

この測定治具では、28.7 GHz付近で反射傾向が見られた(図14)。

図 14 手動オフセット印刷試作反射板測定($\phi 40$ 治具)

4 考察

半導体プロセスは、高精度なパターン形成が可能である一方で、装置コストが高く、製造工程も複雑化する傾向があることから、地域中小企業への技術展開には一定の制約が存在する。これに対し、印刷法はプロセスの簡便さおよび低コストといった利点を有するが、微細構造の形成における再現性には課題が残る。

本研究では、半導体プロセス、スクリーン印刷法およ

び手動オフセット印刷により作製した各種グラジエントメタサーフェスのサンプルを比較した。実験結果からは、スクリーン印刷の基材の厚みが100 μm のサンプルの測定位置を180度回転した場合に、グラジエントメタサーフェスの特徴である離れた周波数帯域への反射のシフトが見られた。一方、スクリーン印刷の基材の厚みが50 μm のサンプルでは、180度回転してもほぼ同じ反射帯域であった。

手動オフセット印刷では、印刷斑があるものの明確な反射のピークが見られた。印刷斑が比較的少ない範囲部分のみを選択して $\phi 40$ mmの測定治具を用いて評価した結果では、28 GHzの近傍で反射特性が得られているのが確認できた。

これらのことから、印刷手法による機能を持たせた構造物は、印刷プロセス条件(例:インク粘度、スクリーンメッシュ、転写速度など)の最適化¹¹⁻¹⁴⁾、ブランケットを用いたオフセット手法¹⁵⁻¹⁷⁾による印刷精度の向上で十分な機能発現が可能となると考える。

5 結論

本研究では、メタサーフェス構造のパターン形成手法としてスクリーン印刷と手動オフセット印刷を用いたデバイスについて、半導体プロセスであるフォトリソグラフィ技術を用いた高精度に作製されたデバイスと比較することで、印刷技術による微細構造形成の現状と課題を把握することを目的とした。具体的には、同一の設計パターンを両手法に適用し、得られた構造の形状精度、膜厚、ならびに機能性(フリースペース法を活用した反射特性)について定量的評価を実施した。

これにより、スクリーン印刷法における形成限界やプロセスのばらつきの傾向の把握、手動ではあるがオフセット印刷の可能性を示唆するとともに、フォトリソグラフィ手法に対する性能差を明確化することができた。これらの比較検討結果は、今後の印刷技術の工程最適化および応用展開に向けた指針を得る上での基礎資料となった。

謝辞

本研究を進めるにあたり、メタロイドインクを使ったスクリーン印刷のサンプル作製およびメッキ処理に関しては、株式会社イオックス 中澤様、中辻様、測定に関しては、京都府中小企業技術センター 坪井様、小山様、Si版の作製には株式会社デアネヒステ 中尾様には多大なるご協力を頂きました。ここに謝意を表します。

参考文献

- 1) 栗山 博道, 中島 聡, 大村 知也, 鷹氏 啓吾, 梶田 倫正, 木田 仁司, 金子 哲也, 岩永 秀規, 後河内 透. インクジェット印刷技術によるリチウムイオン電池のデジタル製造. Ricoh Technical Report No.45(2023).
https://jp.ricoh.com/-/Media/Ricoh/Sites/jp_ricoh/technology/techreport/45/pdf/RTR45a08.pdf
- 2) 時任 静士. プリンテッドエレクトロニクスの新展開. 色材協会誌. 2021-08-20, 94 (8), p. 234-241. DOI: 10.4011/shikizai.94.234
- 3) 日下 靖之. 電子デバイス製造のための微細印刷技術. 日本印刷学会誌. 2022, 第59巻第3号, p. 104-109.
- 4) 小松 迅人, 佐藤 裕高2021-08-20. メタサーフェスデバイスの研究. 2024, 令和5年度宮城県産業技術総合センター研究報告, No.21, p. 1-6.
https://www.mit.pref.miyagi.jp/wp-content/uploads/2024/09/Report_No_21.pdf
- 5) Yuto, Kato; Kohei, Omori; Atsushi, Sanada. D-Band Perfect Anomalous Reflectors for 6G Applications. IEEE Access. 23 November 2021, vol.9, p.157512-157521. DOI: 10.1109/ACCESS.2021.3130058
- 6) A, Díaz-Rubio; V,S, Asadchy; A, Elsakka; S,A, Tretyakov. From the generalized reflection law to the realization of perfect anomalous reflectors. Sci. Adv. Aug. 2017, vol. 3, no.8, Art. no. e1602714.
- 7) Shulin, Sun; Kuang-Yu, Yang; Chih-Ming, Wang; Ta-Ko, Juan; Wei, Ting, Chen; Chun, Yen, Liao; Qiong, He; Shiyi, Xiao; Wen-Ting, Kung; Guang-Yu, Guo; Lei, Zhou; Din, Ping, Tsai. High-Efficiency Broadband Anomalous Reflection by Gradient Meta-Surfaces. 2012, Nano Let., 12, p.6223-6229. DOI: 10.1021/nl3032668
- 8) Olli, Luukkonen; Constantin, Simovski; Gérard, Granet; George, Goussetis; Dmitri, Lioubtchenko; Antti V. Räisänen; Sergei A. Tretyakov. Simple and Accurate Analytical Model of Planar Grids and High-Impedance Surfaces Comprising Metal Strips or Patches. IEEE Transactions on Antennas and Propagation. June 2008, Volume:56, Issue:6, p. 1624 - 1632.
- 9) メタロイドインク, 株式会社イオックス,
<https://www.iox.co.jp/>
- 10) フリースペース法, 光・マイクロ波・ミリ波ネットワーク測定システム, 京都府中小企業技術センター,
https://www.kptc.jp/mtc/wp-content/uploads/2016_09-20.pdf
- 11) Sarah-Jane, Potts; Chris, Phillips; Tim, Claypole; Eifion, Jewell. The Effect of Carbon Ink Rheology on Ink Separation Mechanisms in Screen-Printing. Coatings. 2020, 10(10), 1008.
<https://doi.org/10.3390/coatings10101008>
- 12) Sarah-Jane, Potts; Chris, Phillips; Eifion, Jewell; Ben, Clifford; Yin, Cheung, Lau; Tim, Claypole. High-speed imaging the effect of snap-off distance and squeegee speed on the ink transfer mechanism of screen-printed carbon pastes. SPRING NATURE, 2020, Volume17, p. 447-459.
- 13) Taejun, Lee; Chihun, Lee; Dong, Kyo, Oh; Trevon, Badloe; Jong, G. Ok; Junsuk, Rho. Scalable and High-Throughput Top-Down Manufacturing of Optical Metasurfaces. Sensors. 2020, 20(15), 4108.
<https://doi.org/10.3390/s20154108>
- 14) Nathan, Zavanelli; Woon-Hong, Yeo. Advances in Screen Printing of Conductive Nanomaterials for Stretchable Electronics”, ACS Omega 2021, 6, p. 9344-9351.
<https://doi.org/10.1021/acsomega.1c00638>
- 15) 野村 健一, 牛島 洋史, 永瀬 和郎, 池戸 裕明, 三井 亮介, 高橋 誠哉, 中島 伸一郎, 岩田 史郎. スクリーンオフセット印刷装置の開発と高品質配線形成. 2014. 第28回エレクトロニクス実装学術講演大会,
https://doi.org/10.11486/ejisso.28.0_289
- 16) Konami, Izumi; Yasunori, Yoshida; Shizuo, Tokito. Soft blanket gravure printing technology for finely patterned conductive layers on three-dimensional or curved surfaces. Japanese Journal of Applied Physics. 2017, Volume 56, Number 5S2.
- 17) Jessamine, Ng, Lee; Cheolmin, Park; George, M. Whitesides. Solvent Compatibility of Poly(dimethylsiloxane)-Based Microfluidic Devices. Anal. Chem. 2003, 75, p. 6544-6554.