

メタサーフェスで光と熱をあやつる



研究ノート

高原 淳一*

Control of light and heat by metasurface

Key Words : metamaterial, metasurface, plasmonics, structural color, sky radiator

はじめに

2000年にマイクロ波帯(4.8GHz)においてメタマテリアル(metamaterial)による自然には存在しない負の屈折率($n < 0$)がはじめて実現された¹⁾。そのインパクトは非常に大きく、メタマテリアルに関して多くの研究が行われてきた。しかし、フォトンクスでの応用を考えると、メタマテリアルは3次元の微細加工を必要とするためにマイクロ波から短波長化して可視光域になると作製が難しい。そこで2次元のメタマテリアル、すなわちメタサーフェス(metasurface)が生まれた。2次元なら半導体微細加工技術が応用できるから、作製は大幅に簡単になる。それに加えて多様な光機能が得られるとあって、

最近の応用研究の中心はメタサーフェスに移っている。世界的には特にメタレンズとよばれる極薄のフラットレンズの研究が盛んである。

メタサーフェスの研究は材料も応用分野も多岐にわたるが、本稿では当研究室ですすめている金属メタサーフェスと誘電体メタサーフェスの研究を紹介する。

メタマテリアルからメタサーフェスへ

物質(マテリアル)は原子(atom)が3次元的に配列したものである(図1(a))。原子の種類と配置によって物質の光(広く電磁波としても同じことである)に対する応答が決まる。メタマテリアルは

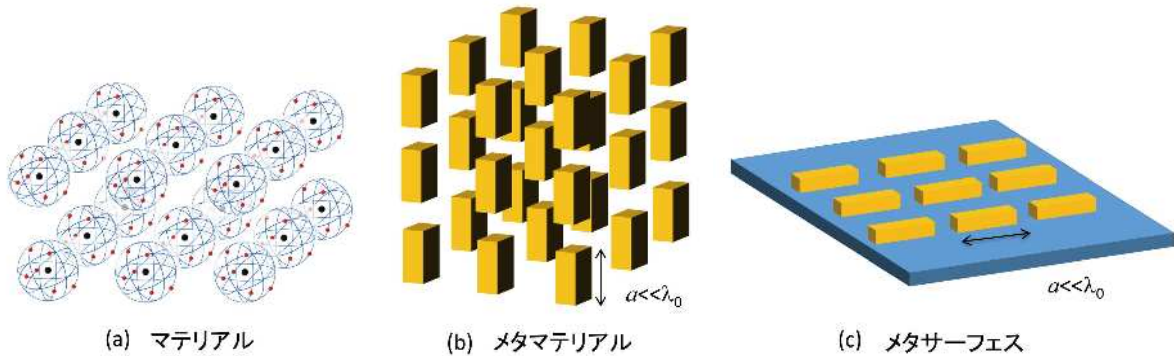


図1 メタマテリアルのコンセプト (a) 原子から構成されるマテリアル、(b) メタ原子から構成されるバルク有効媒質としてのメタマテリアル、(c) 光アンテナとしてのメタ原子を平面に並べたメタサーフェス



* Junichi TAKAHARA

1967年8月生まれ
大阪大学大学院基礎工学研究科 物理系
専攻修了(1995年)
現在、大阪大学 大学院工学研究科 精密科学・応用物理学専攻 教授 工学研究科附属フォトンクスセンター 教授(兼)博士(工学) ナノフォトンクス、メタマテリアル
TEL : 06-6879-8503
FAX : 06-4864-2695
E-mail : takahara@ap.eng.osaka-u.ac.jp

真空波長(λ_0)より十分小さな構造をもつメタ原子(meta-atom)とよばれる人工的な光共振器を3次元的に配列した光学的な有効媒質である(図1(b))。メタマテリアルではメタ原子の構造により誘電率と透磁率を独立に制御して、負の値も含めて任意の有効屈折率を作り出すことができる。これに対し、メタ原子を基板上に2次元的に並べたものがメタサーフェスである(図1(c))。

メタマテリアルとメタサーフェスの名前は似ているが、動作原理が異なっている。メタマテリアルは有効屈折率をもつバルクとしての有効媒質である。光の伝搬は境界での屈折率差と界面の角度や曲率を変えることにより屈折や反射が制御される。屈折率の値が自然界に存在する物質と大きく異なることを除くと、メタマテリアルといえども通常の光学素子と設計原理は大きくは変わらない。一方、メタサーフェスではメタ原子ごとの散乱を制御するという設計方針をとる。すなわち、散乱される光の入射光に対する位相や吸収を変化させ、波長より十分薄いメタ原子一層だけで光の伝搬方向や吸収を制御する。このためメタ原子はアンテナに例えられることが多い。波長より十分薄いという特徴がバルクのメタマテリアルと異なるメタサーフェスの魅力の一つである。

色素を使わない回折限界解像度のカラー印刷

メタサーフェスの応用例を紹介する。図2(a)に示す金属・誘電体・金属の三層構造 (MDM 構造とよばれる) は特定波長の光を良く吸収する完全吸収

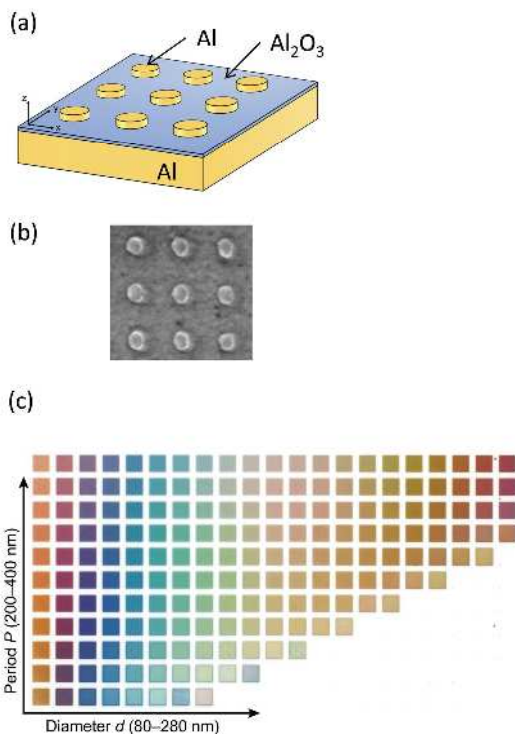


図2 プラズモニック構造色 (a)MDM 構造、(b) アルミニウムのメタサーフェスの電子顕微鏡像、周期 300nm、(c) カラーパレットの光学顕微鏡像 (パレットごとに周期と直径を変化させている、パレットのサイズは $10\ \mu\text{m}$ 四方)

体 (perfect absorber) の典型である。吸収波長はサイズによって変わるから、MDM 構造を多数並べると表面からの反射スペクトルを制御できる。これをカラー印刷に応用したのがプラズモニックカラーである。これは従来の回折格子やフォトニック結晶による構造色と異なり、周期性による回折光の干渉を利用しておらず、角度依存性が小さいという特徴がある。また、単一の MDM 構造でも色が出せるので原理的に高い解像度を実現できる。

図2(b),(c) は金属としてアルミニウムを用いた MDM 構造から構成されたカラーパレットである²⁾。この技術を用いると単一の MDM 構造を用いて制御性良く色を出すことができる。このときの解像度は 100000 dpi (dots per inch) であり、高い像度をもつカラー印刷を実現することに成功した。通常のカラープリンタの解像度が数 100 dpi であるからその 100 倍以上で回折限界の解像度をもつカラー画像を実現した。これは偽造防止マーカーなどへの応用が期待でき、企業と共同で実用化をすすめている³⁾。

プラズモニックカラーでは金属の強い光閉じ込め効果 (プラズモニック効果) により高い解像度を得ているが、金属のオーミック損失のため分解能を維持したまま色の彩度を高くできない。これを解決するのが高屈折率の誘電体を用いた誘電体メタサーフェスである (図3(a))。図3(b),(c) は SOQ (Silicon on Quartz) 基板上的の単結晶シリコン (c-Si) を直方体形状に微細加工した誘電体光共振器 (高さ 150 nm、一辺 60 ~ 200 nm) によるカラーパレットである⁴⁾。c-Si のような高屈折率材料 ($n \sim 4$) の構造体にサイズと同程度の波長の光を当てるとミー共振がおきる。このとき共振によって後方散乱が増強されるので反射光スペクトルに色が出る。c-Si の高い屈折率閉じ込め効果により MDM 構造と同等の高解像度 (86000 dpi) を維持したまま高い彩度の色を出すことに成功した。最近では誘電体光共振器の表面に金属を付加することにより、解像度と彩度をさらに向上させている⁵⁾。

誘電体メタサーフェスカラーは反射だけでなく透過型のフィルターとしても応用できる。c-Si は CMOS 整合性も高く、色素を用いないイメージングセンサー用のカラーフィルターとしても利用できる。

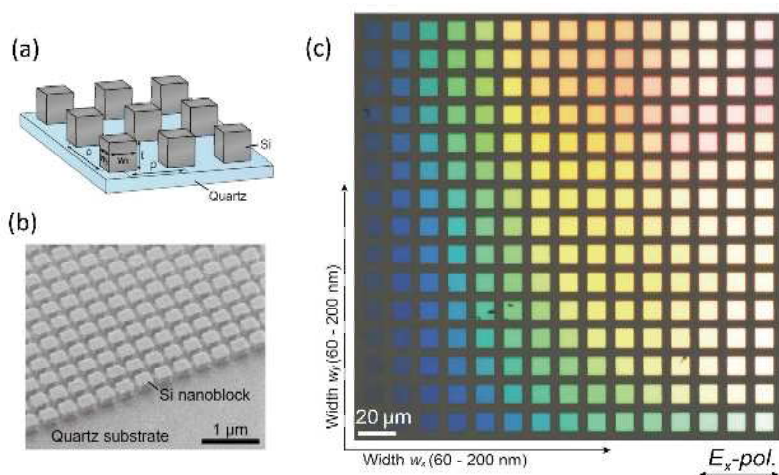


図3 高屈折率誘電体のミー共振構造色 (a) 誘電体ナノブロック構造、(b) シリコン単結晶のナノブロックのイオン顕微鏡像 (ブロックの厚さは150nm、周期300nm)、(c) カラーパレットの光学顕微鏡像 (パレットごとにブロックの縦横幅を変化させている、パレットのサイズは10 μ m四方)

高効率エコ電球と放射冷却素子

メタサーフェスは熱輻射の制御にも応用できる。はじめに高効率白熱電球への応用例を紹介する。図4は作製したプロトタイプ電球 (我々はeco電球とよんでいる) の写真である。タンタルからできたフィラメント部分に挿入図に示す穴 (マイクロキャビティ) が形成されており (図4挿入図)、共振効果により赤外光を抑制し可視光を増幅できる。この電球は実際に点灯させることができ、積分球を用いて輻射の全光束スペクトル計測を行った結果、可視光域の輻射率を平面フィラメントより2倍に増強させることに成功した6)。フィラメントへの微細加工はナノインプリントで行っているため、大量生産にも対応できる。ナノインプリントは大量生産に適したナノ加工法であり、メタサーフェスの実用化において重要となる。

メタサーフェスによる熱輻射の制御を利用するとエネルギーを消費せずに冷却を行うこと (受動冷却とよばれる) ができる。大気には水などの吸収をほとんど受けない透過率の高い波長帯域がいくつも存在し、「大気の窓」とよばれている。もし地球上の室温付近の物体が出す熱輻射の帯域を制御して、大気の窓の代表である中赤外域の8-13 μ m帯に持ってくると、宇宙空間に熱を効率良く放熱できる。これは高温物体から低温物体へ熱輻射による伝熱によってエネルギー移動を行うもので、放射冷却とよばれる。このうち地球上の物体と宇宙空間 (宇宙背景放

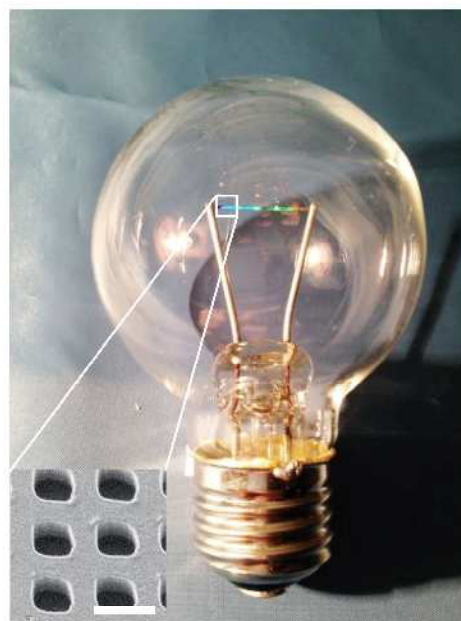


図4 高効率エコ電球のプロトタイプ
挿入図：フィラメント上に形成した一辺350nmのマイクロキャビティの画像

射の温度は2.7K) との間の温度差を利用して放射冷却を行うものをスカイラジエータとよぶ。

我々の開発したメタサーフェス型スカイラジエータは理論的には200 W/m²、実験室内の環境下で100 W/m²以上の冷却能力を示す。高温多湿の日本の夏の夜間での実験では電力供給なしに平均2 $^{\circ}$ Cの冷却を達成した7)。赤外域のメタサーフェスは薄くて熱容量も極めて小さく、光を吸収して熱に変換したり、逆に熱を光に変換したりするエネルギー変

換を効率良く行うことができ、光・熱変換のキーデバイスとなっている8)。

おわりに

メタサーフェスによる高解像度の色生成や熱輻射制御への応用を紹介した。この分野は最近では誘電体メタサーフェスの研究が大幅に増加している。昔から高屈折率誘電体とミラー共振は良く研究されていたが、最近になって誘電体メタサーフェスに注目が集まるのは金属メタマテリアルで培われたメタ原子の考え方を取り込んだ成果といえる。メタマテリアルのコンセプトはすでに音波や熱などにも拡張されており、今後も様々な分野でのイノベーションの源泉となると予測される。色々な分野の方に興味をお持ちいただければ幸いである。

参考文献

- 1) D. R. Smith, W. J. Padilla, D. C. Vier, S. C. Nemat-Nasser, and S. Schultz, Phys. Rev. Lett. 84, 4184 (2000).
- 2) M. Miyata, H. Hatada, and J. Takahara, Nano Lett. 16, 3166 (2016).
- 3) 上羽陽介、高野倉知枝、北村満、高原淳一：第79回応用物理学会秋季学術講演会 19p-PA7-2, 2018年9月19日.
- 4) Y. Nagasaki, M. Suzuki, and J. Takahara, Nano Lett. 17, 7500 (2017).
- 5) Y. Nagasaki, I. Hotta, M. Suzuki, and J. Takahara, ACS Photonics 5, 3849 (2018).
- 6) 高原淳一：応用物理, Vol. 84, No. 6, 564 (2015).
- 7) 大塚節文、井上武、君野和也、高原淳一：第79回応用物理学会秋季学術講演会 20a-225B-1, 2018年9月20日.
- 8) 高原淳一：光学 Vol. 47, No. 9, 358 (2018).

