現実世界のアプリケーションを模索するメタマテリアル

ジェフ・ヘクト

半世紀前のレーザと同様に、メタマテリアルは課題を探しているソリューションのように思われることが多い。現在は従来の光学では対応できないニッチな応用に向けた第1ラウンドが始まっている。

合成メタマテリアルは光学分野の人々を興奮させてきたが、それは従来の材料では利用できない光学的性質が約束されているからだ。初期の驚くべき事例は、長期にわたり不可能と思われてきた負の屈折率材料の実証であった。目に見えない光学クロークには、一般紙も関心を示した。

研究所ではいくつかの実験が華々しく行われたが、実用上の問題は解決されていない。単色光を顕微鏡の対物レンズで照射したときにだけ動作するとしたら、目に見えないクロークにはどのような用途があるのだろうか？ メタマテリアルは初期のレーザと同様に、「課題を捜し求めるソリューション」と呼びたい誘惑にかられる。しかしながら、新しく始まった開発ラウンドは広帯域偏光フィルタ、ほぼ完全な光吸収体、テラヘルツ帯用の光学系など、従来の光学材料では実現できない重要な実用可能性が期待されている。

メタマテリアルの基礎

メタマテリアルは電磁波と集合的に相互作用するように設計されたサブ波長構造素子の組立部品からなる。構造のビルディングブロックは、光波を構成する電磁場と相互作用する小型の誘導性‐容量性回路として機能する。代表的な構造は、磁場との相互作用が従来の材料よりも強くなるように設計されている。この効果はこの構造と共鳴する周波数の場合に著しい。

原理的に言うと、これらの相互作用は従来の材料からは得られない負の屈折率のようなさまざまな光学的性質を生成できる。さらに、構造の形状や構成を変えると、光を操作できる光学的性質の傾斜の創成が可能になる。このような構造は波面を変換できるため、この分野は「変換光学」と呼ばれる[1]。構造を動的に変えて性質を変化させることも可能になる。

実験は素晴らしい成果をもたらしたが、そこには実用上の限界があることも明らかになっている。重要な構造素子の多くは金属から構成されているため、いずれも光減衰が非常に大きい。最も重要な成果は長波長、とくにマイクロ波領域から得られているが、それはこれらの帯域におけるサブ波長構造の製作が可視領域よりも容易なことによる。確かに、その製作は非常に複雑になるため、代表的な実験はメタマテリアルの単位格子の単層だけを使用して行われ、真の三次元構造を実証した実験は少数に限られる。とは言いながら、これらの問題がメタマテリアルの開発を止めているわけではない。そこでは現実世界の応用を目指して、とくに面倒な問題のいくつかを克服する努力がなされている。

マイクロ波とテラヘルツ波の光学系

米ボーイング・ファントムワークス社（Boeing Phantom Works）のクラウジオ・パラッツォーリ氏（Claudio Parazzoli）によると、最初のメタマテリアルの実験はマイクロ波帯で行われ、そのデバイス開発は位相アレイアンテナなどを対象にしていた。一方で、より「光学的な」デバイスは従来の光学デバイスでは不可能なテラヘルツ帯を目指している。テラヘルツ帯は波長がとても長く、数十マイクロメートルの尺度がサ

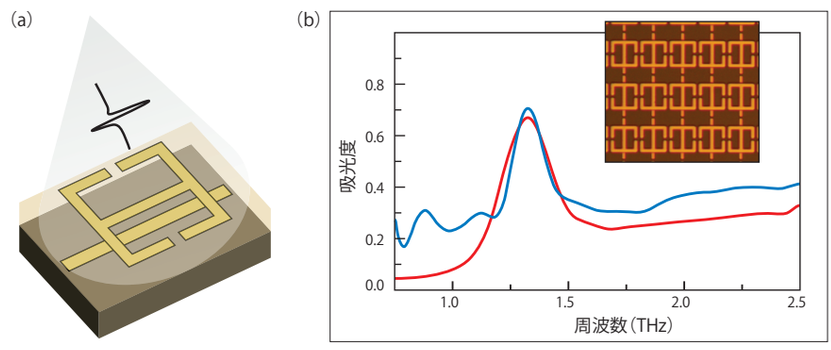

図1　テラヘルツ吸収体の単位格子はポリイミドスペーサ上の電気共振器部品と底部のヒ化ガリウム基板上の磁気結合用カットワイヤからなる（a）。吸収の実験結果（青色の曲線）とシミュレーション結果（赤色の曲線）で比較している（b）。（資料提供：：H・タオ氏ら）

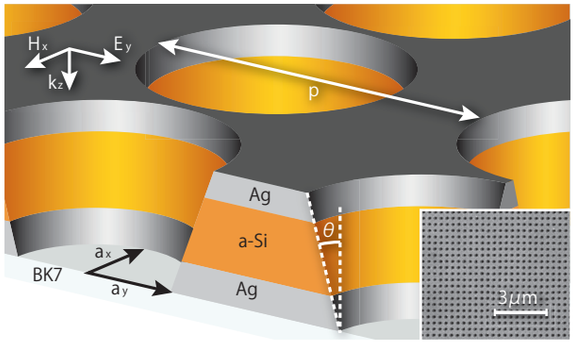

図2　魚網メタマテリアルの拡大図。2つの28nm厚の銀層が誘電体として作用する68nmの非晶質シリコンを用いて分離されている。非晶質シリコンに緑色フェムト秒パルスを照射すると、導体間の誘電体ギャップが短絡してスイッチング状態になる。345nmのホール間隔は18°の傾斜をもつため、2つの銀層のホールは異なるサイズになる。（資料提供：ダニ氏ら）

ブ波長構造になるため、従来の半導体技術を用いた製作が容易になる。

一般に、天然材料はテラヘルツ帯の吸収が低いため、メタマテリアルのテラヘルツ帯の高い吸収は魅力になる。例えば、8μmの単層メタマテリアルは1.3THzにおいて0.7の吸収率を示し、その吸収係数はセンチメートル当たり2000になる（図1）[2]。偏光と入射角に依存しないテラヘルツ吸収体も製作されている。

最近のレビュー論文は多数のテラヘルツ材料の実証を列挙し、そこには4分の1波長板、スイッチングと変調、動的構造素子による共鳴挙動の同調などの成果が含まれている。共振周波数のシフトの実証も報告された。この場合のメタマテリアルは20%の大きな周波数シフトを示し、メモリ効果も大きく、最初の配置に戻るには20分以上が必要であった。米ボストン大学（Boston University）とボストン単科大学（Boston College）からなる研究チームは、「多くの場合、『メタマテリアル』にもとづくテラヘルツデバイスは、従来の材料にもとづくデバイスの性能を上回る。とは言いながら、多くの場合、このようなテラヘルツ用の競合材料は存在しない」と記述している[3]。

赤外メタマテリアル

赤外波長用のメタマテリアルレンズも魅力がある。従来の赤外波長用レンズは大型で、そのコーティングは難しい。米ニューメキシコ大学（University of New Mexico）高度先端技術材料センターの所長を務めるスティーヴ・ブリューク氏（Steve Brueck）は、「極めて少数の層からなる負の屈折率材料の非常に薄いレンズは、レーザレーダ用として多方面への応用が期待できる」と語っている。

もう1つの赤外線における重要な応用可能性は、高速スイッチングと変調にある。応答時間はデバイスの大きさに依存するため、そのサイズは周期分極ニオブ酸リチウムの場合のセンチメートルから、ファイバ媒質の場合の数キロメートルまでの範囲に及ぶ。半導体光増幅器は能動デバイスのため、短い長さを実現できるが、雑音が付加され、構造も複雑になる。プラズモニックスイッチの応答はピコ秒になるが、マイクロメートルスケールのデバイスの変調深さは10%に制約される。

ブリューク氏のグループと米ロスアラモス国立研究所（Los Alamos National Laboratory）の同僚は、サブミクロンのメタマテリアル層を用いて600fsの応答を実証した。彼らは分離された二つの薄い銀層ではさんだ非晶質シリコン誘電体の二次元「魚網」構造を使用した（図2）。このシリコン層に高速緑色レーザパルスを照射すると、電子-正孔対が発生し、2枚の金属シートは短絡して、この構造はさまざまな共振周波数をもつ単一金属格子と同様の動作を示した。この動作は電子と正孔が散逸するまで継続し、散逸後の構造は正常な共振に復帰した。同グループはこの構造が高速スイッチングに適していることを示唆する約70%の変調深さを測定している[4]。

円偏光

メタマテリアルのもう1つの魅力は、従来のバルク光学系では難しい強い円偏光などの効果を生成する能力にある。初期の実験はマイクロ波およびテラヘルツ波領域における強いカイラリティと負の位相速度を実証したが、これらの効果は狭い帯域幅の範囲内に限られていた。

独カールスルーエ大学（University of Karlsruhe）のマーティン・ウェゲナー氏（Martin Wegener）のグループは、この問題を解決するために、広く使われているスプリットリング共振器にヘリックス構造を導入した。単サイクルのらせんからはヘリックス構造の軸方向に透過する赤外線の円偏光が生成された。このグループはらせんを完全な2サイクルに拡張し、ほとんどの右手系円偏光と少しの左手系円偏光が3.5から7.5μmのオクターブにわたり透過する広帯域円偏光を発生させた。

このグループはフェムト秒レーザパルスを強く集光して、感光性高分子レジストの内部に3次元構造を形成し、次に、薄い金膜を高分子のらせん上に蒸着した。さらに、被覆されたコイルをカイラル分子の赤外センシングの用途に使用した[1]。ウェゲナー氏は「われわれが研究してきた性能の改善は企業の関心を集めている」と語っている。

彼のグループは磁場制御への応用も検討し、完全なインピーダンス整合、つ

まりメタマテリアルによる入射光の完全吸収を実現しようとしている。今までに、この構造は吸収したエネルギーを熱に変換したが、エネルギーが熱以外の形に変換されると、センシングへの応用が可能になる。米カリフォルニア工科大学（California Institute of Technology）のハリー・アトウォーター氏（Harry Atwater）のグループは、太陽電池の性能を改善するための完全吸収体の製作を試行している。

能動メタマテリアル：損失を補償する利得

メタマテリアルのやっかいな損失を克服するために、構造内部に利得媒質を挿入する開発も行われている。昨年、米パデュー大学（Purdue University）のウラジミール・シャラーエフ氏（Vladimir Shalaev）のグループは、電磁場強度がとくに高い場所にローダミン6G染料のような利得媒質を挿入すると、利得による損失の十分な相殺が可能になることを明らかにした[6]。

量子ドットや光パラメトリック増幅などを用いてメタマテリアルに利得を付加する方法も研究されている。英ソルフォード大学（University of Salford）のアラン・ボードマン氏（Allan Boardman）は9名の共著者と一緒に能動および可変同調メタマテリアルをレビューし、「メタマテリアルの損失補償は、それらの実用化に向けての重要な段階になる」と記述している[7]。このレビューに記載された130件の論文の引用が示すように、利得と可変同調性はメタマテリアルにおいて話題の分野になっている。

将来展望

メタマテリアルの概念はたくさんの可能性をもつが、可能性を現実世界のものにするには、デバイスの製作や損失などの難しい実用上の問題の克服が必要になる。近未来の応用を見付けることに成功すれば、より広い長期の開発に対する支援の確保が可能になる。昨年、英サウサンプトン大学（University of Southampton）のニコライ・ジェルデフ（Nikolay Zheludev）氏は、カイラリティ、負の屈折率および強い磁気応答を「メタマテリアルという知識の木の完熟した果実」と名付けた[8]。彼はその他のスローライト、スイッチング、増幅などの果実も成長し、完熟に向かっていると指摘している。

ジェルデフ氏は良い製法の開発が鍵となり、「分子レベルに近いナノ構造の完全性を低コストで実現できる、新しい技術が必要になるだろう」と記述している。彼は「真の分子レベルでの自己組織化力により制御される化学プロセスと、精度は不十分でもメタマテリアルのほとんどすべてを設計できるトップダウン方式との間に収まる」新しいアプローチを期待している。これは大きな挑戦だが、その見返りはさらに大きい。

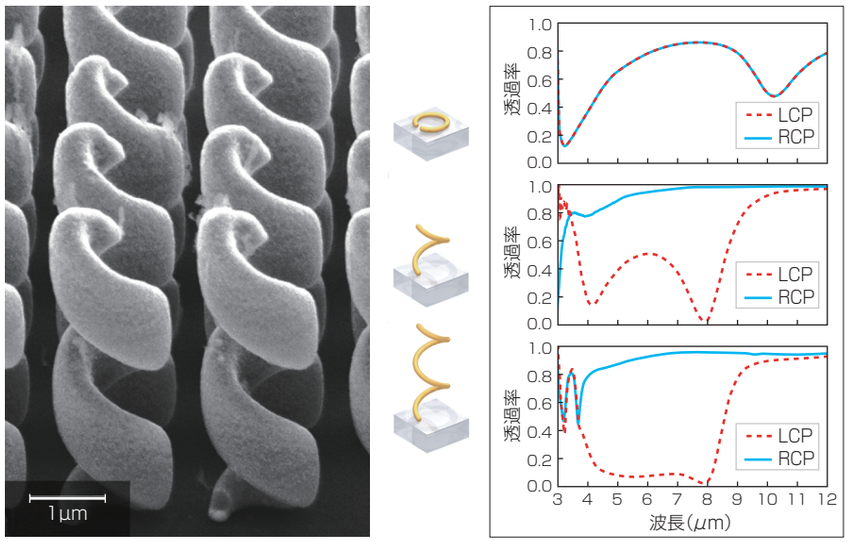

図3　形の異なるスプリットリング共振器（中央）から組立てられた三種類の異なるメタマテリアルによる円偏光の透過を示している。青色の曲線は右回り円偏光の透過率を示し、赤色の曲線は左回り円偏光の透過率を示す。左の顕微鏡写真の底部にある二つのねじれらせんからは最強のカイラリティが得られた。頭部の平坦リングは偏光効果を示さない。（資料提供：カールスルーエ大学）

参考文献

(1) M. Wegener and S. Linden, "Shaping Optical Space with Metamaterials," Physics Today, 63, 32（Oct. 2010）.
(2) H. Tao et al., "A metamaterial absorber for the terahertz regime: Design, fabrication and characterization," Opt. Exp., 16, 7181-7188（May 2008）.
(3) H. Tao et al., "Recent Progress in Electromagnetic Metamaterial Devices for Terahertz Applications," IEEE J. Selected Topics in Quant. Electron., 17, 92-101（January/February 2011）.
(4) K.M. Dani et al., "Ultrafast nonlinear optical spectroscopy of a dual-band negative index metamaterial all-optical switching device," Opt. Exp. 19, 5, 3973（Feb. 28, 2011）.
(5) J. Gansel et al., "Gold helix photonic metamaterial as broadband circular polarizer," Science, 325, 1513-1515（Sept. 18, 2009）.
(6) S. Xiao et al., "Loss-free and active optical negative-index metamaterials," Nature, 466, 735-738（Aug. 5, 2010）.
(7) A.Boardman et al., "Active and tunable metamaterials," Laser & Photon. Rev., 5, 2, 287-307（2011）; doi: 10.1002/lpor.201000012.
(8) N.I. Zheludev, "The road ahead for metamaterials," Science, 328, 582-583（Apr. 30, 2010）.

LFWJ