

図2 安全鍵生成率と伝送損の関係 30 km のファイバ伝送を達成。図中■はファイバ伝送、●は光減衰器により伝送損を模擬した場合の結果を示しており、これらの結果の間に差異は見られなかった。許容可能な伝送損は、誤り率が伝送損による光子検出の信号対雑音比の劣化により増大し、その値が誤り訂正可能なしきい値を超える点となり、本実験では約 9 dB であった。

り訂正可能なしきい値を上回った点で与えられ、本実験では約 9 dB であった。

今回得られた成果により、送信者と受信者の間でテストビットを用いた定期的な誤り率の監視を省略した QKD が可能であることが実証された。今後、本成果を用いて QKD システムの簡略化と鍵生成の効率向上を実現できる。また本成果は、不確定性原理によらずに全く新しい原理でどんな盗聴に対しても安全な鍵配送ができることを世界で初めて証明した実験であり、QKD 研究の新たな展開を促すことが期待される。

今回得られた成果は、英国の科学誌ネイチャー・フォトニクス（2015 年 9 月 14 日オンライン版）に掲載された。

（平成 27 年 12 月 7 日受付 平成 27 年 12 月 21 日最終受付）

【関連報道】 日刊工業新聞，2015.9.15. 日経産業新聞，2015.9.16.

【取材協力】 武居弘樹 日本電信電話株式会社 NTT 物性科学基礎研究所

（担当委員 丸谷和史）

## 高屈折率・極低反射・低損失な テラヘルツメタマテリアルを実現

——産業応用化に向け、テラヘルツデバイスの  
超小形化・省エネ化へ貢献——

テラヘルツ波の応用研究が非常に積極的に推進されている。特に X 線に代わる安全かつ高精度な可視化技術や高速無線通信でのテラヘルツ波の活用に注目が集まっている。具体的なアプリケーションとして共鳴トンネルダイオードを用いたテラヘルツイメージングやテラヘルツ高速無線通信が報告されている。基礎研究分野におい

てもテラヘルツ波を活用した計測により、2013 年にはグラフェンでの光学量子ホール効果、2014 年には超伝導体中でのヒッグスモードが観測されるなど、テラヘルツサイエンスの新しい扉が開かれ、テラヘルツテクノロジーでのブレークスルーの予感が実感となりつつある。

テラヘルツデバイスで用いられるレンズなどの従来のテラヘルツコンポーネントは波長に対して非常に大きい。産業応用化に向けたテラヘルツデバイスのコンパクト化には小形な光学コンポーネントが必要不可欠である。しかしながら、自然界のテラヘルツ波帯材料には高屈折率、極低反射、低損失の 3 点を両立する物質は存在しない。メタマテリアル（メタは“超”の意味）は図 1

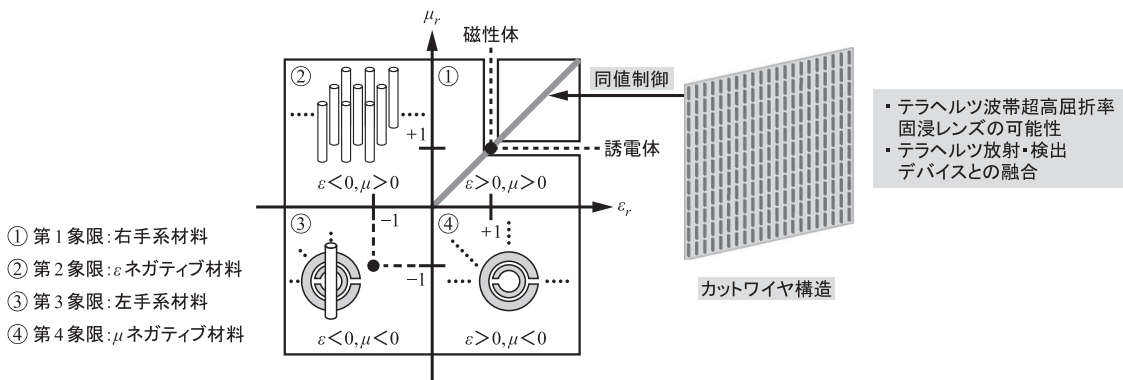


図1 メタマテリアルの誘電率と透磁率の分類

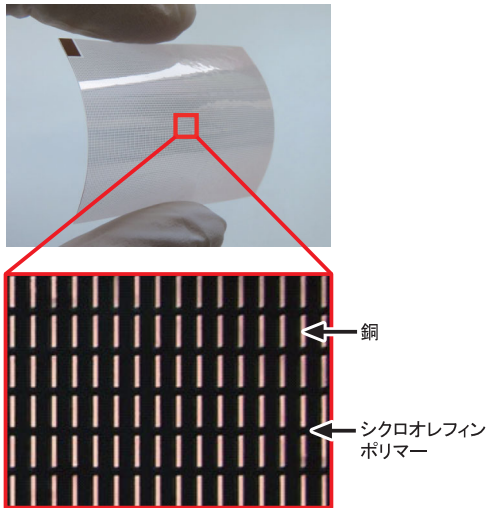


図2 高屈折率・極低反射・低損失なテラヘルツメタマテリアル

に示す金属ワイヤや分割リング共振器などのサブ波長構造体を，原子や分子に見立てて配列し，自然界には存在しない電磁的性質（比誘電率，比透磁率）を持つスーパ物質を設計できる概念である．メタマテリアルにより，自然界には存在しない高屈折率，極低反射，低損失を全て両立した物質を所望の周波数帯で設計でき，光学素子の超小形化・省エネ化へ貢献できる．

今回，茨城大学の石原功基氏，大内隆嗣氏，鈴木健仁講師らの研究グループは，0.3 THz 帯で高屈折率，極低反射，低損失なメタマテリアルの開発に成功した．テラヘルツ波帯は波長がマイクロメートルオーダーのため，比誘電率を制御する金属ワイヤと比透磁率を制御する分割リング共振器の両方を使用した試作は容易ではない．そこで今回の高屈折率・極低反射・低損失なテラヘルツメタマテリアルでは，図2に示す対称ベアカットワイヤ構造により比誘電率と比透磁率を同時かつ同値に制御し，高屈折率と自由空間とのインピーダンス整合を両立している．テラヘルツ波帯で低損失なシクロオレフィンポリマーフィルムの裏表に金属の微細なワイヤ構造を対称に

配置している．0.31 THz で実効屈折率  $n_{\text{eff}}=6.7+j0.12$ ，反射電力 1.2%，透過電力 91.8%，電力損 7.0% である．テラヘルツ波帯での高屈折率材料としては Si の 3.4 や MgO の 3.1 などが挙げられるが，これらのおおよそ 2 倍と非常に高い屈折率である．屈折率の実部を虚部で割った値で表した性能指数においても，最高で 314 (0.29 THz での値) を確認している．高ければ高いほど損失が少ないことを意味する．これまでに性能指数が高い高屈折率，低損失なテラヘルツメタマテリアルは報告されていたが，比誘電率と比透磁率を同値に制御できておらず反射電力が非常に高くなり，多くの電磁波が失われていた．更に今回は産業応用化を強く意識し，厚さが波長の 1/20 の  $51 \mu\text{m}$  と極めて薄くフレキシブルなアンテナ構造へも応用した．構造の規格化により，より高周波数なテラヘルツ波帯へも応用可能である．更に MEMS 駆動などによるアクティブな屈折制御も魅力的である．

現在は電磁界シミュレータを活用した膨大な時間を必要とする設計を避けられないが，今後はモーメント法やスペクトル領域法などのアンテナ解析技術により本構造の高速かつ高精度な設計法を確立する．またテラヘルツ波帯超高屈折率固浸レンズを実現し，回折限界を突破した波長以下の顕微技術へ応用する．更に高屈折率，極低反射，低損失な材質の特長を生かし開発を進めている極めて薄くフレキシブルなアンテナ構造を，テラヘルツ放射・検出素子に融合した一体化デバイスの研究を行い，テラヘルツデバイスの超小形化，省エネ化へ貢献していくという．

(平成 27 年 12 月 4 日受付 平成 27 年 12 月 21 日最終受付)

[関連記事] 日刊工業新聞，2015.8.21.

[取材協力] 鈴木健仁 正員 茨城大学工学部電気電子工学科

石原功基 学生員 茨城大学大学院理工学研究科電気電子工学専攻

大内隆嗣 茨城大学大学院理工学研究科電気電子工学専攻  
(担当委員 植松芳彦)