

鈴木 健仁

産業に用いられる電磁波の周波数は時代とともに高周波数帯へと移ってきており、当初は産業化が難しいと考えられていた周波数も創意工夫により有効活用されている。しかしながら、ミリ波と可視光の間のテラヘルツ波帯では、光学コンポーネントが成熟しておらず、開発に必要な材料も不足している。筆者の研究室では、

超高屈折率・極低反射材料などの極限屈折率材料を生み出した。この材料の応用例の1つとして、さまざまな連続発振テラヘルツ波光源に導入可能な平面アンテナを紹介する。また、メタマテリアルの発想に基づいて製品化に取り組んだ超高感度テラヘルツ波帯偏光子 GoIS[®] も紹介する。

1. まえがき

電磁波は我々人類にとって貴重な有限の資源であり、長い歴史をみると、産業に用いられる周波数はその軸上を高周波数帯に向けて一步一步ではあるが、着実に駆け上がってきている。例えば、テラヘルツ波帯での光源の研究開発は急速に成熟を遂げている。2013年に量子カスケードレーザーにより160 Kでの1.9 THzの発振が報告されている¹⁾。2016年には、共鳴トンネルダイオードにより室温での1.92 THzの発振が報告されている²⁾。さらに今年2017年には、差周波発生を用いて量子カスケードレーザーにより室温での2.8 THzの発振が報告されている³⁾。検出器については、テラヘルツカメラの製品化⁴⁾や、カーボンナノチューブ(Carbon Nanotube: CNT)によるフレキシブルなテラヘルツカメラ⁵⁾なども報告されている。テラヘルツ波帯の光源や検出器を生かした産業では、0.3 THz帯に代表される高速無線通信⁶⁾やテラヘルツイメージング⁷⁾などが報告されている。また現在のミリ波産業の盛り上がりも、次世代での活用が期待される周波数帯を利用したテラヘルツ波産業にとって大きな希望である。

しかしながら、テラヘルツ波^{†1}を発振、検出するデバイスに用いるアンテナ、レンズ、偏光子、ビームスプリッタ、波長板、フィルタ、ミラーなどのテラヘルツコンポーネントは、性能やサイズも成熟の域までまだまだ達していない。テラヘルツ波の巧みな制御を可能にするテラヘルツコンポーネントの成熟化が不可欠である。そこで筆者の研究室では、周波数が時代とともに必ず駆け上がってくると確信をもちながら、アンテナ技術を1つのキーワードに、テラヘルツ波産業の全盛期に向けた準備を進めている。しかしながら、アンテナをはじめとしたテラ

ヘルツコンポーネントの開発を進めようとする、テラヘルツ波帯の材料不足の壁にぶつかる。例えば、自然界由来の高屈折率なテラヘルツ波帯材料は非常に限られている。電磁波は物質の材料特性により屈折、反射、透過する。特定の屈折率^{†2}や透明度をもつ材料を自由自在に実現できれば、電磁波の操作に大幅な自由度を与えられる。筆者の研究室では、2000年前後に登場したメタマテリアル⁸⁾†3を活用し、極低反射な超高屈折率材料などの極限屈折率材料^{9,10)}を生み出した。誘電体中でメタアトムがばらばらな状態では極限屈折率材料は機能しないが、図1のように、人の力で最適にメタアトムを配置することで極限屈折率材料を生みだせる。そこで第2章では、図1に示す極限屈折率材料を紹介する。第3章

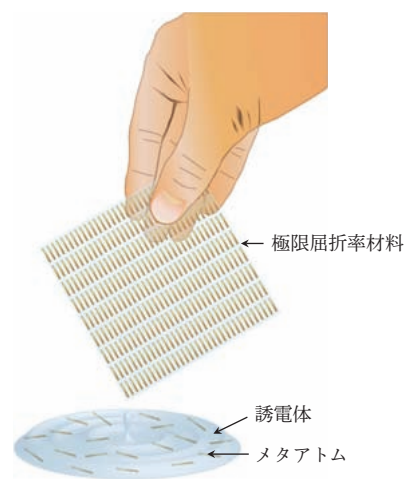


図1 極限屈折率材料.

^{†1} テラヘルツ波 周波数で100 GHz~10 THzの電磁波。1 GHz(ギガヘルツ)は 10^9 Hz。1 THz(テラヘルツ)は 10^{12} Hz。波長で3 mm~30 μ mの電磁波。

^{†2} 屈折率 電磁波の伝搬に関する媒質のパラメータ。負の屈折率を有する材

料に入射した電磁波は“く”の字に曲がる。虚数部は損失を表す。

^{†3} メタマテリアル 波長よりも微細な構造(メタアトム)により、波長よりも大きな全体構造を成すことで、自然界の材料では実現できない特性を設計できる技術。

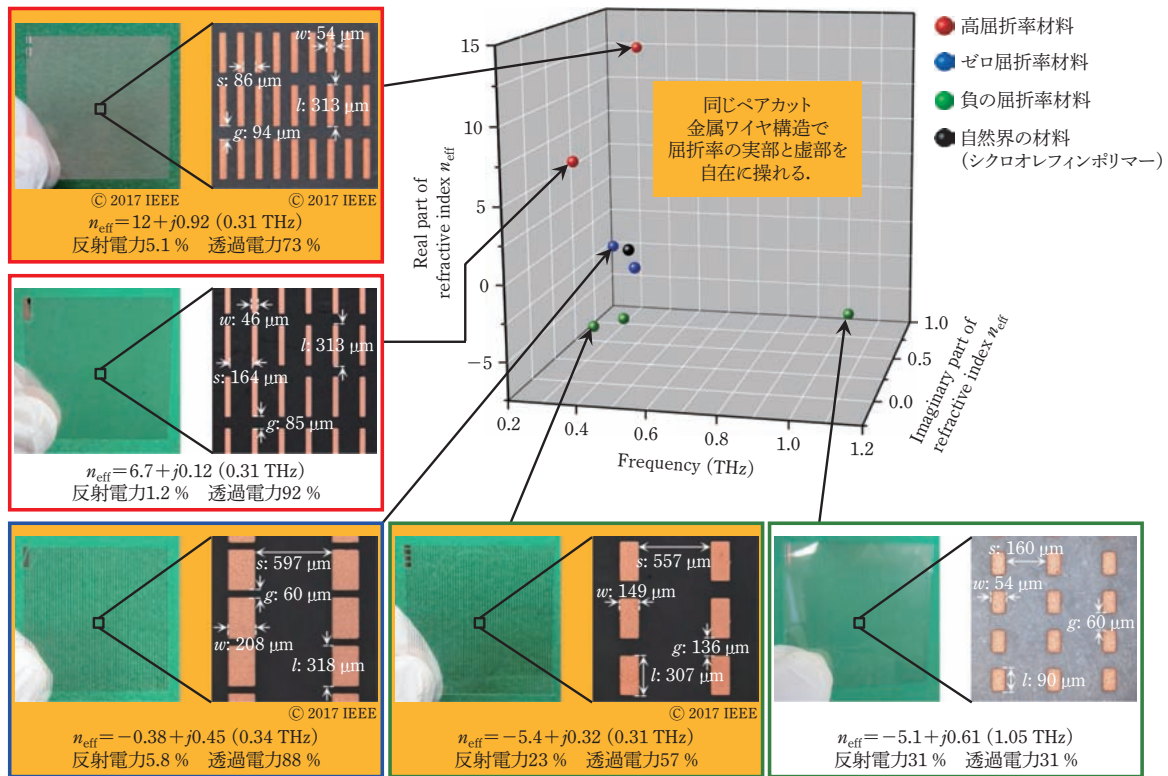


図2 高屈折率材料（全体像と拡大像）、ゼロ屈折率材料、負の屈折率材料の屈折率実部・虚部の分布地図^{15,16)}。

では、独自に生みだした極限屈折率材料のテラヘルツ波帯での応用例の1つの平面アンテナ^{11,12)}を紹介する。第4章では、同様にメタマテリアルの発想に基づいて生みだした超高感度テラヘルツ波帯偏光子 GoIS^{®13,14)}を紹介する。第5章では「むすび」として今後の展望を述べる。

2. 極限屈折率材料の探索

テラヘルツ波帯での自然界由来の高屈折率な材料としては、屈折率 3.4 の Si や屈折率 3.1 の MgO が挙げられる。自然界由来の材料は屈折率が高くなると、反射も大きくなる。また、テラヘルツ波帯での自然界由来の低損失な材料としてシクロオレフィンポリマーが挙げられ、テラヘルツ時間領域分光法 (Terahertz TimeDomain Spectroscopy: THz-TDS) による実測の屈折率は 0.5 THz で $1.53 + j0.0012$ である。メタマテリアルは、波長よりも小さな構造体のメタアトムの設計により、比誘電率 ϵ_r と比透磁率 μ_r を自由自在に制御できる。材料の屈折率 n_{eff} と波動インピーダンス Z はそれぞれ式 (1), (2) で表せる。

$$n_{\text{eff}} = \sqrt{\epsilon_r} \sqrt{\mu_r} \quad (1)$$

$$Z = (\sqrt{\mu_r} / \sqrt{\epsilon_r}) Z_0 \quad (2)$$

ここで、 ϵ_r , μ_r , Z_0 はそれぞれ材料の比誘電率、材料の比透磁率、真空の波動インピーダンスである。メタアトムで比誘電率と比透磁率を設計し、任意な屈折率と反射率を有する材料を自由自在に生みだせる。図2に、筆者の研究室でテラ

ヘルツ波帯のために準備を進めている高屈折率材料、ゼロ屈折率材料、負の屈折率材料の屈折率実部・虚部の分布地図を示す。極限屈折率材料として、屈折率 12 の超高屈折率・低反射材料、屈折率 6.7 の高屈折率・低反射材料、ゼロ屈折率・低反射材料を今後、高速無線通信で広く用いられることが期待される 0.3 THz 帯で実現している。産業化の際、製品ニーズの周波数帯や屈折率値に合わせた材料を提供できる。材料の高周波数化も進んでいる。

図3に、0.3 THz 帯の極限屈折率材料の構造とパラメータを示す。波長よりも小さな構造体のメタアトムを周期的に配列して、波長よりも十分に大きな全体構造を構成したメタマテリアルである。メタアトムとして誘電体基板の表裏に金属ワイヤを配置している。この材料は偏波特性を有しており、テラヘルツ波の電界成分が金属ワイヤと平行な場合に材料特性が現れる。極限屈折率材料は、周期的な構造材料であることに着目し、周期境界条件を有するメタアトムの1要素で材料特性を設計できる。実効屈折率 n_{eff} は式 (3)~(5) を用いて、周期構造解析で得られた散乱行列 $S(S_{11}, S_{21})$ から導出できる¹⁷⁾。

$$n_{\text{eff}} = \frac{\text{Im}[\ln(e^{jk_0(d+2t)})] + 2m\pi - j\text{Re}[\ln(e^{jk_0(d+2t)})]}{k_0(d+2t)} \quad (3)$$

$$e^{jk_0(d+2t)} = \frac{S_{21}}{1 - S_{11} \frac{Z_r - 1}{Z_r + 1}} \quad (4)$$

$$Z_r = \pm \sqrt{\frac{(1 + S_{11})^2 - S_{21}^2}{(1 - S_{11})^2 - S_{21}^2}} \quad (5)$$

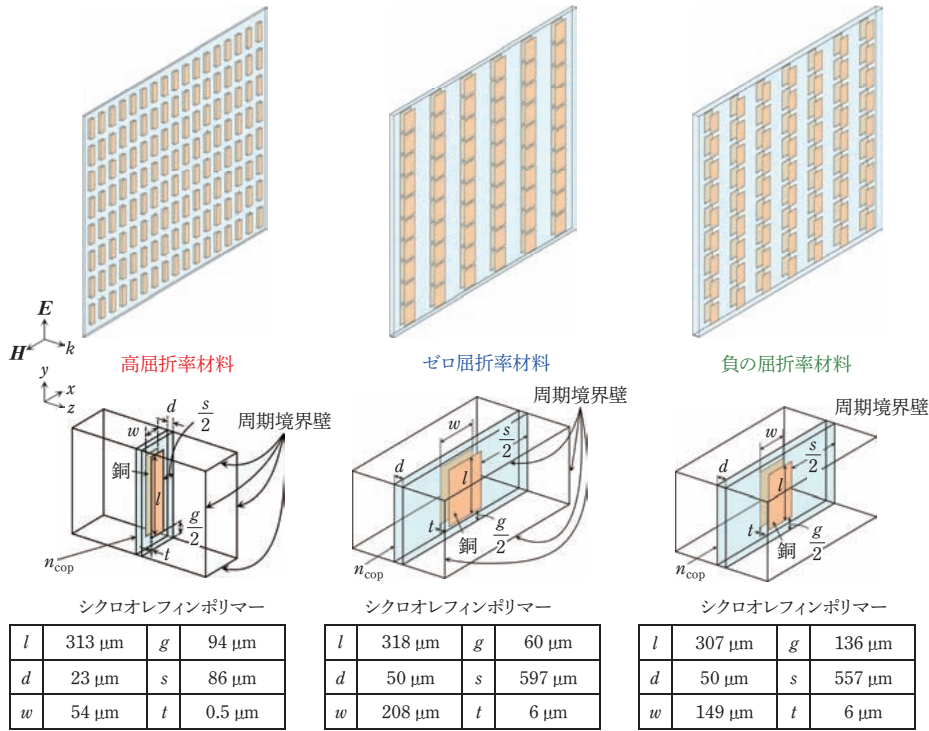


図3 極限屈折率材料の構造とパラメータ.

ここで k_0 は真空の波数, m は整数, Z_0 は真空の波動インピーダンス Z_0 で規格化した波動インピーダンスである.

図4に、ペアカット金属ワイヤ構造による材料の動作原理と、それぞれの材料の比誘電率と比透磁率の設計結果の周波数特性を示す。テラヘルツ波の電界成分に対しては、金属ワイヤ上に、電流が y 軸方向に誘起される。金属ワイヤ自体がインダクタンス成分と抵抗成分を有する。 y 軸方向の金属ワイヤ間のギャップはキャパシタ成分として動作する。等価回路として考えると、図4左上図のように、直列の LC 共振回路として考えられる。この共振現象を利用することで、材料の比

誘電率を制御できる。一方で、テラヘルツ波の磁界成分に対しては、表裏の金属ワイヤがコイルとして動作する。表裏の金属ワイヤ自体がインダクタンス成分と抵抗成分を有するとともに、表裏の金属ワイヤ間がキャパシタ成分として動作する。これは、図4左下図のように、並列の LC 共振回路として考えられる。この共振現象を利用することで、材料の比透磁率を制御できる。高屈折率材料として振る舞う周波数帯では、比誘電率と比透磁率が同時に高い値をとる。ゼロ屈折率材料として振る舞う周波数帯では、比誘電率と比透磁率が同時にゼロに近い値をとる。負の屈折率材料として振る舞う周波数帯

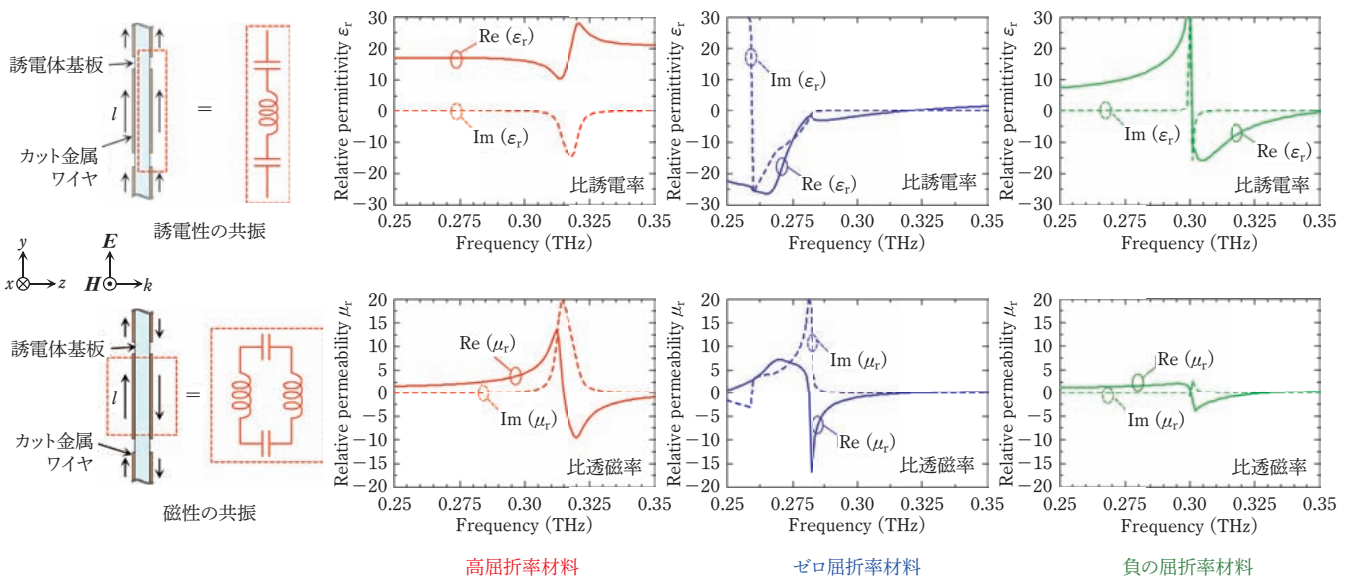


図4 極限屈折率材料の動作原理.

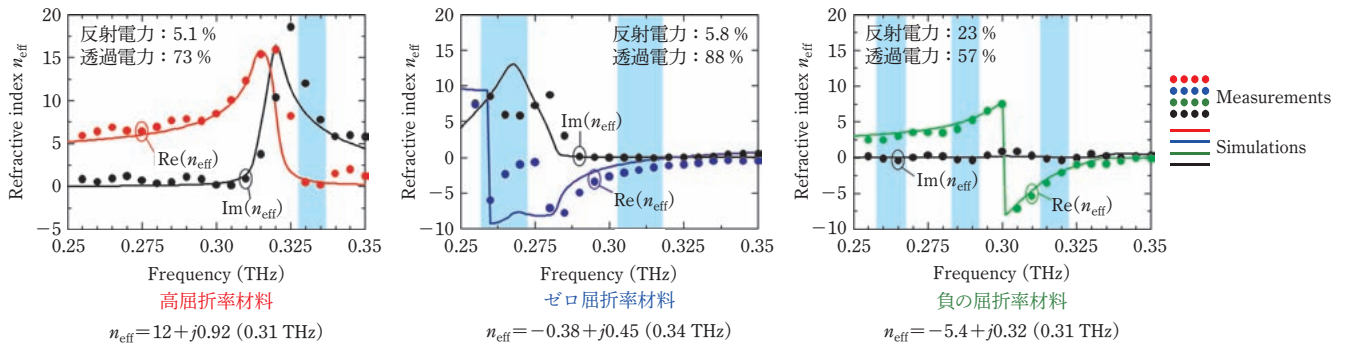


図5 高屈折率材料, ゼロ屈折率材料, 負の屈折率材料の実効屈折率スペクトル (実験結果と解析結果).

では, 比誘電率と比透磁率が同時に負の値をとる. 比誘電率と比透磁率を同値制御することで, 極低反射材料を実現できる. メタ材料を利用した高屈折率材料は2011年に報告されていた¹⁸⁾が, 比誘電率と比透磁率の同値制御ができておらず, 反射が大きい材料であった. ペアカット金属ワイヤ構造を利用した負の屈折率材料はすでにマイクロ波帯で報告されていた^{19~21)}が, 高屈折率材料の発見には至っていなかった.

図5に, 高屈折率材料, ゼロ屈折率材料, 負の屈折率材料の実効屈折率スペクトルの実験結果と解析結果を示す. 高屈折率材料は, 0.31 THzで $n_{\text{eff}} = 12 + j0.92$, 反射電力5.1%, 透過電力73%である. ゼロ屈折率材料は, 0.34 THzで $n_{\text{eff}} = -0.38 + j0.45$, 反射電力5.8%, 透過電力88%である. 負の屈折率材料は, $n_{\text{eff}} = -5.4 + j0.32$, 反射電力23%, 透過電力57%である. 材料の屈折率の実験値は, THz-TDS法(ドイツToptica Photonics社製TeraFlashを使用)により測定した材料の透過係数 S_{21} と反射係数 S_{11} を用いて, 式(3)~(5)から求まる¹⁷⁾.

THz-TDS法で反射係数を求める際, サンプルの材料のたわみにより, リファレンスのミラーと比較した際に位相のずれが起きる. 有限要素法電磁界シミュレータ(米国Ansys社製

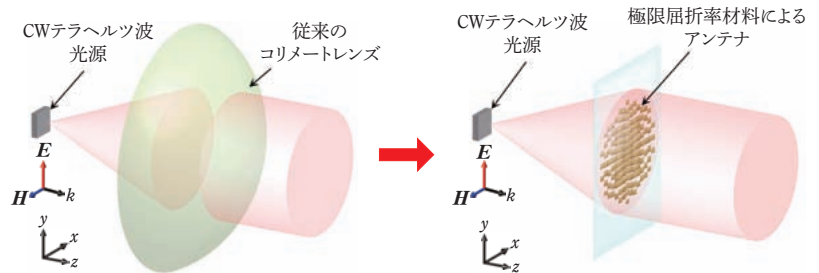


図6 極限屈折率材料のテラヘルツ波帯アンテナへの応用.

HFSSを使用)により求めた理想的な実験条件での反射位相と比較し, たわみ量を見積もることで実験結果を補正している. 高屈折率材料, ゼロ屈折率材料, 負の屈折率材料でそれぞれ $24 \mu\text{m}$, $16 \mu\text{m}$, $46 \mu\text{m}$ 入射光源側に, 盛り上がっていると見積もっている. 図5で, 実験誤差により電力保存則が成り立たない範囲は水色で示している.

3. 極限屈折率材料の平面アンテナへの応用

第2章で実現した超高屈折率・低反射な極限屈折率材料の応用例の1つとして, 平面アンテナを紹介する. 図6のように, 連続発振(Continuous Wave: CW)光源から発生するテラヘルツ波を, コリメートレンズを用いることなく平面構造で平面波に変換できる¹¹⁾. アンテナの設計では, アンテナの端部から中央部に向けて, 屈折率が高くなるように高屈折率・

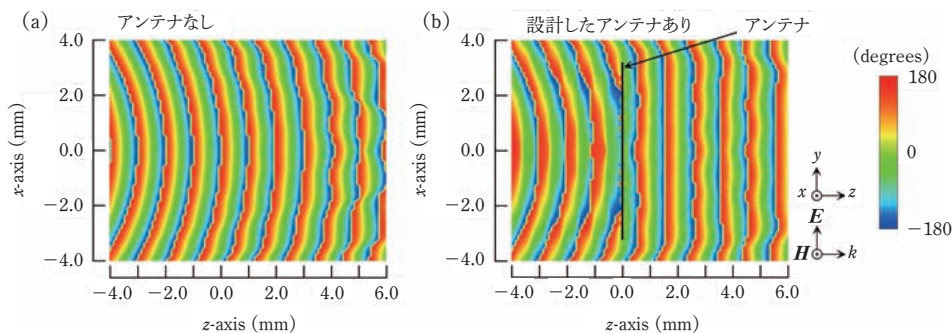


図7 電界の位相分布の計算結果¹¹⁾. (a)アンテナなし, (b)アンテナあり.

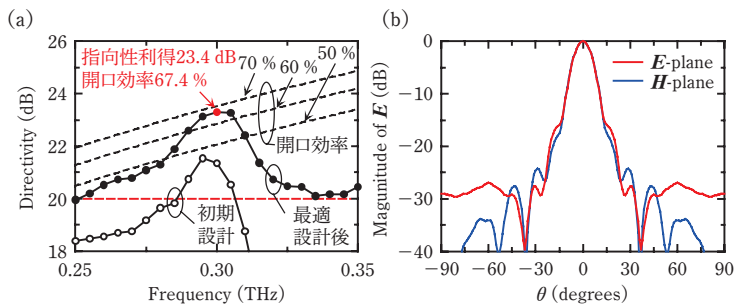


図8 アンテナ特性の計算結果¹¹⁾. (a)指向性利得, (b)遠方界指向性.

低反射材料を配置する。これは、分布屈折率レンズの動作原理と同様である。屈折率の実部の最大値が17.4（反射電力3.6%）、最小値が2.8（反射電力12.7%）の範囲で屈折率を制御している。図7に、アンテナがない場合とある場合の電界の位相分布の計算結果を示す。光源には0.3 THzのCW光源を用いている。設計したアンテナによりテラヘルツ波が平面波に変換されていることがわかる。図8(a)と(b)に、アンテナの指向性利得の周波数特性と0.3 THzでの電界の指向性の計算結果を示す。初期設計の提案¹²⁾では、屈折率をアンテナ上で方形に分布させていた。そのため、テラヘルツ光源の放射を指向性の強い平面波に変換できる20 dB（100倍）以上の指向性利得となる帯域は0.27~0.31 THzであり、比帯域13.3%と狭帯域特性でもあった。そこで、理想的な同心円状に屈折率を変化させた設計法¹¹⁾を提案した。この設計指針により、図8で示すように、中心周波数0.3 THzで指向性利得23.4 dB、開口効率67.4%を有する平面アンテナを設計している。20 dB（100倍）以上の指向性利得となる帯域は0.25~0.35 THzであり、比帯域33.3%の広帯域特性も有する設計である。ミリ波など、ほかの周波数帯への応用はもちろんのこと、高周波数化し続けるCWテラヘルツ波光源にも応用できる。

4. 超高感度テラヘルツ波帯偏光子の開発

テラヘルツ波を活用した計測により、新たな物理現象の発見や観測が可能である^{22,23)}。筆者らはメタマテリアルの発想

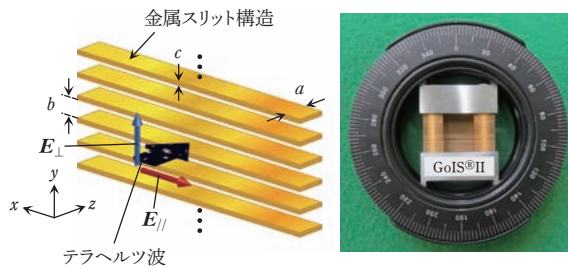


図9 超高感度テラヘルツ波帯偏光子¹³⁾.

に基づき、-50 dBの高消光比と80%の高透過特性を有する非常に高感度なテラヘルツ波帯偏光子 GoIS^{®13,14)}を実現した。可視光領域の偏光子の性能に迫る感度である。また、従来のワイヤグリッドではワイヤを太くすると、消光比は高くなるが、透過電力は低くなる。ワイヤを細くすると、消光比は低くなるが、透過電力は高くなる。さらに、従来のワイヤグリッド構造は非常に壊れやすい。

図9の開発したGoIS[®]では高消光比を実現するため、カットオフ状態の金属平行平板導波路が有する負の誘電率を利用している。そのため、金属板に平行な方向に電界を有するテラヘルツ波は、金属平行平板導波路のカットオフ周波数以下では伝搬しない。一方で、金属板に垂直な方向に電界を有するテラヘルツ波は透過する。この際、多重反射を極力抑圧できるように設計している。構造は金属板の積層構造のため、非常に頑丈で壊れにくい。

設計では、 x 軸方向に無限構造で、 y 軸方向に無限周期構造と見なせる。周期境界条件を有する導波路1本分を抜き出し、この2次元モデルを解析すればよい。解析には商用の電磁界シミュレータを用いても設計できるが、繰り返し補正に耐えられる高速かつ精密な設計のため、モードマッチング法²⁴⁾を用いた。図10に、透過電力と消光比の実験結果と解析結果を示す。

製品化にあたっては、(国研)科学技術振興機構(JST)の支援を受けた。現在、特許ライセンス企業において製品化のめどが立ち、サンプルを貸し出し中²⁵⁾である。日本産業がアジアと世界で存在感を発揮していくために、研究室をご支援く

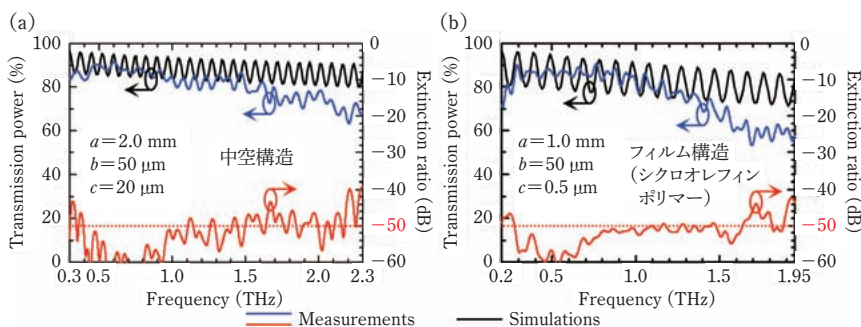


図10 (a)中空構造¹³⁾, (b)フィルム構造¹⁴⁾. 消光比(赤線)と透過電力(青線)の実験結果. 透過電力のモードマッチング法による解析結果(黒線).

ださる方々から“三方よし”の社会貢献の姿勢を学んでいる道中である。

5. むすび

本稿では、筆者の研究室で独自に生み出した超高屈折率・極低反射材料などの極限屈折率材料の探索について紹介した。また、極限屈折率材料の応用例の1つとして、テラヘルツ波帯での平面アンテナへの応用を紹介した。これは、テラヘルツ波帯の各種光源に導入できる。さらに、メタマテリアルの発想に基づき実現した超高感度テラヘルツ波帯偏光子GoIS[®]について紹介した。これは現在、サンプル提供中である。今後、生まれたての極限屈折率材料の探索を進めるとともに、応用研究を展開していく。

謝辞

本研究の一部は、文部科学省科学研究費若手研究(A)(26706017)、文部科学省科学研究費挑戦的萌芽研究(26600108)の助成を受けたものである。共同研究者の皆様へ深く感謝申し上げます。第4章の実験結果は大阪大学永井正也准教授との共同研究による成果です。平井精密工業(株)からの温かいご支援に心より感謝申し上げます。研究室をご支援くださる方々に深く感謝申し上げます。研究を推進してくれている研究室の学生、卒業生、スタッフの皆様へ深く感謝いたします。第2章は石原功基君、渡井和央君、竹林佑記君、木村辰也君、佐藤竜也君、近藤諭君、司城誠君、安田淳一君、第3章は大内隆嗣君、富樫隆久君、第4章は岸湧大君が大きく推進してくれました。

文献

- 1) M. Sasaki, T.T. Lin, and H. Hirayama: Phys. Status Solidi C 10, 1448 (2013).
- 2) T. Maekawa, H. Kanaya, S. Suzuki, and M. Asada: Appl. Phys. Express 9, 024101 (2016).
- 3) 藤田和上, 伊藤昭生, 日高正洋, 枝村忠孝: 第64回応用物理学会春季学術講演会予稿集, 14p-211-5 (2017).
- 4) N. Oda, S. Kurashina, M. Miyoshi, K. Doi, T. Ishi, T. Sudou, T. Morimoto, H. Goto, and T. Sasaki: J. Infrared Millim. Te. 36, 947 (2015).

- 5) D. Suzuki, S. Oda, and Y. Kawano: Nat. Photonics 10, 809 (2016).
- 6) T. Nagatsuma, S. Horiguchi, Y. Minamikata, Y. Yoshimizu, S. Hisatake, S. Kuwano, N. Yoshimoto, J. Terada, and H. Takahashi: Opt. Express 21, 23736 (2013).
- 7) T. Miyamoto, A. Yamaguchi, and T. Mukai: Jpn. J. Appl. Phys. 55, 032201 (2016).
- 8) J.B. Pendry: Nat. Mater. 5, 763 (2006).
- 9) 鈴木健仁, 石原功基, 大内隆嗣: 電子情報通信学会誌 99, 159 (2016).
- 10) K. Ishihara and T. Suzuki: J. Infrared Millim. Te. 38, 1130 (2017).
- 11) 大内隆嗣, 石原功基, 佐藤竜也, 富樫隆久, 鈴木健仁: 電子情報通信学会論文誌 B J100-B, 235 (2017).
- 12) 鈴木健仁, 大内隆嗣, 石原功基, 佐藤竜也, 富樫隆久, 古謝望: レーザ研究 44, 116 (2016).
- 13) T. Suzuki, M. Nagai, and Y. Kishi: Opt. Lett. 41, 325 (2016).
- 14) Y. Kishi, M. Nagai, J.C. Young, K. Takano, M. Hangyo, and T. Suzuki: Appl. Phys. Express 8, 032201 (2015).
- 15) 渡井和央, 石原功基, 近藤諭, 佐藤竜也, 司城誠, 鈴木健仁: 第64回応用物理学会春季学術講演会予稿集, 14a-211-4 (2017).
- 16) K. Watai, K. Ishihara, S. Kondoh, T. Sato, M. Shijo, and T. Suzuki: Proc. IEEE AP-S Symposium on Antennas and Propagation and USNC-URSI Radio Science Meeting, TH-A5.1A.10 (2017).
- 17) X. Chen, T.M. Grzegorzczak, B.-I. Wu, J. Pacheco, Jr., and J.A. Kong: Phys. Rev. E 70, 016608 (2004).
- 18) M. Choi, S.H. Lee, Y. Kim, S.B. Kang, J. Shin, M.H. Kwak, K.-Y. Kang, Y.-H. Lee, N. Park, and B. Min: Nature 470, 369 (2011).
- 19) B. Kanté, S.N. Burokur, A. Sellier, A. de Lustrac, and J.-M. Lourtioz: Phys. Rev. B 79, 075121 (2009).
- 20) P. Weis, O. Paul, C. Imhof, R. Beigang, and M. Rahm: Appl. Phys. Lett. 95, 171104 (2009).
- 21) H. Kubo, T. Yoshida, A. Sanada, and T. Yamamoto: IEICE T. Electron. E95-C, 1658 (2012).
- 22) R. Shimano, G. Yumoto, J.Y. Yoo, R. Matsunaga, S. Tanabe, H. Hibino, T. Morimoto, and H. Aoki: Nat. Commun. 4, 1841 (2013).
- 23) R. Matsunaga, N. Tsuji, H. Fujita, A. Sugioka, K. Makise, Y. Uzawa, H. Terai, Z. Wang, H. Aoki, and R. Shimano: Science 345, 1145 (2014).
- 24) T. Suzuki, J. Hirokawa, and M. Ando: IEICE T. Commun. E92-B, 150 (2009).
- 25) http://web.tuat.ac.jp/~suzuki-lab/material_distribution.html

(2017年5月29日 受理)

Profile



鈴木 健仁 (すずき たけひと)

2004年3月東京工業大学卒。09年3月同大博士課程修了。博士(工学)。06年4月~09年3月独立行政法人日本学術振興会特別研究員。09年4月より茨城大学助教。15年4月より同大講師。17年4月文部科学大臣表彰若手科学者賞。17年6月より東京農工大学准教授。