

極限屈折率材料の発見とテラヘルツ波帯と赤外域での応用

鈴木 健仁*

東京農工大学 大学院工学研究院

Email: takehito@go.tuat.ac.jp

独自に生み出してきた高屈折率・低反射なメタサーフェスやゼロ屈折率・低反射なメタサーフェスなどの極限屈折率材料[1]は、これまでに応用物理学会のシンポジウム講演[2,3]や招待講演[4]の原稿で縦櫛の形で、発表してきたジャーナル論文、国際会議原稿、国内学会原稿を整理しながら紹介している。また、電子情報通信学会アンテナ伝搬研究会のチュートリアル講演の原稿[5]ではそれらの内容を横櫛の形で、発表してきたジャーナル論文、国際会議原稿、国内学会原稿を整理しながら紹介している。本稿では、それらの原稿内ではあまり書ききれていなかった特許と製品化の動向について主に記載する。

まず偏光子の発明について説明する。当時、テラヘルツ波帯では高い消光比で堅牢な偏光子が存在しなかった。並行して研究室ではシクロインボリマーフィルムの表裏両面への銅の成膜を模索していた。もともとこの成膜は負の屈折率メタサーフェスを実現するために進めていたが、成膜の過程でシクロオレフィンポリマーフィルムが歪んで失敗してしまうことが起きていた。この失敗した成膜フィルムを見る中で、偏光子への応用へつながった。早速、モードマッチング法で手計算し、プログラムを作成して、特性を計算したところ、非常に高い消光比と高い透過率を出せることが分かった。試作して実験をしたところ、非常に高い-50 dB 以下の消光比を実現できた。ジャーナル論文[6,7]とともに特許[8]が成立し、ライセンス企業で製品化した。

偏光子の発明と並行してテラヘルツ波帯の低損失な負の屈折率メタサーフェス[9]を実現した。低損失な負の屈折率メタサーフェスの実現での試行錯誤が、高屈折率・低反射なメタサーフェス[10-12]の発見につながり、特許[13]も成立している。合わせて高屈折率・低反射なメタサーフェスだけではなく、ゼロ屈折率・低反射なメタサーフェスも実現し、ジャーナル論文[14]とともに特許[15]が成立している。高屈折率・低反射なメタサーフェスやゼロ屈折率・低反射なメタサーフェスなど、屈折率が極限値を取る材料は極限屈折率材料として応用物理学会や電子情報通信学会などで知られている。

高屈折率・低反射なメタサーフェスを 6G 通信用の光源の指向性を高めるコリメートメタレンズに応用し、共鳴トンネルダイオード(RTD)を用いて実験した[16]。コリメートメタレンズは、中央部が屈折が高く、端部に向かって屈折が低くなるようになっている。さらに高屈折率な特長を利用して、屈折率の分布を急勾配に設計できるため、光源との距離 1 mm(1 波長)の世界で最も短い極単焦点なコリメートメタレンズを実現した[17]。積層することで 360 度までの位相制御ができる。フレネルレンズの原理も用いて光源からの 360 度以上の放射位相も制御することで非常に大開口径のコリメートメタレンズも実現した。アンテナの指向性利得は面積に比例するため、開口面積を大きくすれば利得を上げられる。以上は偏光ありの高屈折率・低反射なメタサーフェスを用いている。

無偏光な高屈折率・低反射なメタサーフェスも 0.3THz 帯で生み出した[18]。現在、JST 創発により、極限屈折率材料を 6G 通信用光源への搭載を目指して研究を進めている。極限屈折率材料は赤外域での実現も進んでおり、特許[19]も成立している。プランクの法則より、例えば 500K や 2000K の熱源からの熱放射は、50THz 帯と 200THz 帯に

最大値を有する。JST さきがけ(熱制御)では 50THz 帯の無偏光な高屈折率・低反射メタサーフェスを生み出した。50THz 帯の高屈折率・低反射なメタサーフェスはフーリエ変換赤外分光法で実証した。エネルギーハーベストなどでの熱放射制御に応用できる可能性がある。また、赤外域での作製方法を活用して、100 nm の非常に薄い赤外域の吸収メタサーフェス[20]も実現した。

参考文献

- [1] 鈴木 健仁, “極限屈折率材料の探索とテラヘルツ波帯への応用,” 応用物理, vol.86, no.10, pp.897-902, Oct. 2017.
- [2] 鈴木 健仁, 2022 年第 69 回応用物理学春季学術講演会, 24p-E201-5, Mar. 2022. (オンライン時代の機能性マテリアル ~beyond5G/6G に向けて~ 招待講演)
- [3] 鈴木 健仁, 2022 年第 83 回応用物理学秋季学術講演会, 20p-C200-8, Sep.2022. (次世代テラヘルツ通信に向けた無線・光融合のデバイス・材料技術 招待講演)
- [4] 鈴木 健仁, “高屈折率低反射メタサーフェスの開拓と応用,” 2024 年第 85 回応用物理学会秋季学術講演会, 20p-A34-1, 朱鷺メッセ, Sep. 2024. (第 45 回応用物理学会優秀論文賞記念講演 招待講演)
- [5] 鈴木 健仁, “メタサーフェスによる平面アンテナとテラヘルツ光源の融合に向けて,” 信学技報, vol.125, no.23, pp.70-74, May 2025. (チュートリアル講演)
- [6] Y. Kishi, M. Nagai, J. C. Young, K. Takano, M. Hangyo, and T. Suzuki, App. Phys. Express, vol.8, no.3, pp.032201-1-4, Feb. 2015.
- [7] T. Suzuki, M. Nagai, and Y. Kishi, Opt. Lett., vol.41, no.2, pp.325-328, Jan. 2016.
- [8] 日本特許第 5626740 号, 日本特許第 6590194 号.
- [9] T. Suzuki, M. Sekiya, T. Sato, and Y. Takebayashi, Optics Express, vol.26, no.7, pp.8314-8324, Apr. 2018.
- [10] K. Ishihara and T. Suzuki, J. Infrared, Millimeter, Terahertz Waves, vol.38, no.9, pp.1130–1139, Sep. 2017.
- [11] H. Asada, K. Endo, and T. Suzuki, Opt. Express 29(10), 14513–14524 (2021).
- [12] K. Sato, K. Watai, K. Ishihara, R. Ohuchi, S. Kondoh, T. Sato, and T. Suzuki, Applied Physics A, vol.130, no.428, pp.1-14, May 2024.
- [13] 日本特許 6596748 号.
- [14] T. Suzuki and H. Asada, Optics Express, vol.28, no.15, pp.21509-21521, July 2020.
- [15] 日本特許 6676238 号
- [16] T. Suzuki, K. Endo, J. Kim, K. Tsuruda, and M. Sekiya, Opt. Express, vol.29, no.12, pp.18988-19000, Jun. 2021.
- [17] K. Endo, M. Sekiya, J. Kim, K. Sato, and T. Suzuki, Appl. Phys. Express vol.14, no.8, pp.082001, July, 2021.
- [18] K. Sato and T. Suzuki. Nanophotonics, vol.12, no.13, pp.2537-2544, May 2023.
- [19] 日本特許 7315983 号.
- [20] H. Asada and T. Suzuki, Opt. Letters, vol.49, no.6, pp.1409-1412, Mar. 2024.

謝辞

本研究の一部は、JST 創発的研究(JPMJFR222I)、JSPS 科研費基盤研究(B)(24K01376)、JSPS 科研費挑戦的研究(萌芽)(24K21617)の助成を受けたものである。本研究の一部は、ローム株式会社との共同研究として実施されました。