

# テラヘルツ電磁メタマテリアルによる光学素子の開発

鈴木 健仁

茨城大学 工学部 電気電子工学科 〒316-8511

茨城県日立市中成沢町 4-12-1 E6-404

E-mail: takehito@mx.ibaraki.ac.jp

## Optical Device by Metamaterial in Terahertz Wave Band

Takehito Suzuki

Dept. of Electrical and Electronic Engineering, College of Engineering, Ibaraki University

E6-404, 4-12-1 Nakanarusawa-cho, Hitachi-shi, Ibaraki 316-8511

### 1. まえがき

現在、図1の通り従来の物理の枠を超えた屈折率領域を探索することを1つの目標に、テラヘルツメタマテリアルによる光学素子、アンテナの研究開発を進めている。そこで本稿では、マイクロ波、ミリ波帯まで含めた様々な研究グループの先行研究の参考文献とともに、研究費をご支援いただいた2011年から現在までに当研究室で進めているメタマテリアルによる光学素子、アンテナの研究開発の最新動向について報告する。

メタマテリアル分野の研究では、負の屈折率(2009年トムソン・ロイターノーベル賞有力候補者 Prof. D. R. Smith、Prof. Sir John B. Pendry)、回折限界を超えた解像度、キラリティの発現、高屈折率無反射現象など、日夜、世界中で激しい研究競争が起きている。原子より大きい電磁波の波長に対しては微小なサイズで、図1の金属ワイヤーや分割リング共振器[1]などの構造体を、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)を持つスーパー物質(メタは“超”の意味)を設計できる概念である。メタマテリアルによる屈折率制御の動作は[2]で分かりやすく解説されている。

テラヘルツ分野の研究では、グラフェンでの光学量子ホール効果[3]や超伝導体中のヒッグス・モード[4]が観測されるなど、近年、テラヘルツ波を活用した計測によりサイエンスの新しい扉が開かれ、テクノロジーが大きく進展する可能性に注目が集まっている[5]。さらに、X線に代わる安全、安心かつ高精度

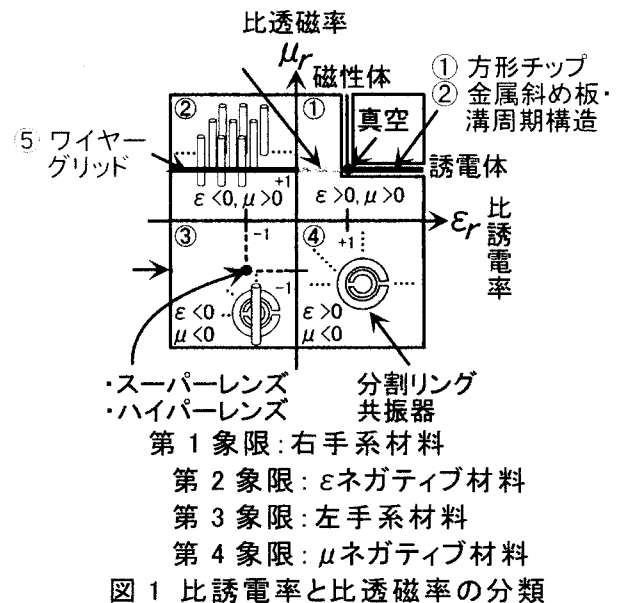


図1 比誘電率と比透磁率の分類

な可視化技術の1つとして、回折限界を突破した近接場によるテラヘルツナノイメージング[6]に関する魅力的な報告もされ、最近では1.4 THzで分解能400 nm ( $\lambda/540$ )が実現されている[7]。また、共鳴トンネルダイオードによる超高速無線通信の研究なども積極的に推進されている[8, 9]。

そのような中、テラヘルツメタマテリアルにより高屈折率無反射構造、ゼロ近傍屈折率構造、負の屈折率構造など自然界の材料では実現できない屈折率領域を実現できる。これらの構造は高利得レンズアンテナ(図2①②)、テラヘルツ波面制御(図2③)、テラヘルツナノ

イメージング(図 2④)、超高感度偏光計測(図 4)などとして応用でき、テラヘルツ計測素子の拡張構造の要求に応えられる魅力を秘める。

## 2. テラヘルツメタマテリアル

### ① 金属方形チップ周期構造 ( $n>1$ )

図 2①は金属方形チップが巨視的に電気双極子として振舞うことを利用した屈折率  $n>1$  のテラヘルツ波帯レンズアンテナである。現状では誘電率のみ制御している。テラヘルツイメージャー[10]を用い、テラヘルツ波の集光を確認した[11]。高周波数帯では、金属の厚みは表皮の厚さの 2~3 倍が望ましく、0.5 THz で 0.3  $\mu\text{m}$  程度と非常に厚い成膜が望ましい。使用する金属も導体損を防ぐため導電率の高い、金、銀、銅が望ましい。現在、高屈折率無反射構造、負の屈折率構造[12]への応用を進めている。

### ② 金属斜め板・金属溝周期構造 ( $n>1$ )

図 2②は TM 波の位相を金属斜めスリット構造の遅波効果で制御した  $n>1$  のレンズアンテナである。金属斜め板構造や金属溝周期構造はマイクロ波帯でのパスレングスレンズやコルゲーション構造のように、人工誘電体としてよく使用されている。TM 波で金属平行平板が電磁波の電界成分と垂直である場合には、実効屈折率が 1 とみなせる。電磁波の進

行方向に角度  $\theta$  を持たせると実効屈折率  $n=1/\cos\theta$  とみなせ、位相を制御できる。そこで、図 2②の通りテラヘルツ波帯パスレングスレンズを設計、作製し、テラヘルツイメージャーにより集光を確認した[13]。

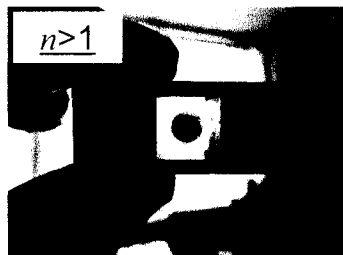
### ③ 金属スリット構造 ( $0<n<1$ )

図 2③は TE モードの位相を金属スリット内での速波効果で制御した  $0<n<1$  のレンズアンテナ[14, 15]である。また屈折率  $n=0$  では構造中の位相が一様となるため、出力部の端面形状により波面制御[16]が可能で、空間中を伝搬する湾曲したテラヘルツ波の波面を垂直に整形できる。また最近になり、屈折率  $0<n<1$  を有する肉厚な 2 次元スリット構造[17]でテラヘルツ波の集光が確認された。当研究室では光学素子への応用を意識し、薄い金属板を用いた 3 次元のテラヘルツ波帯凹レンズを屈折率  $n=0.5$  となるように設計、作製し、テラヘルツイメージャーで集光を確認した[18]。

### ④ リング+金属スリット構造 ( $n<0$ )

図 2④は金属スリットのカットオフ時の負の誘電率とマイクロコイルでの LC 共振による負の透磁率を利用し、負の屈折率  $n<0$  を実現する構造[19]である。負の領域の屈折率を実現する構造として、まずは分割リング共振器と金属細線を用いた構造によるマイクロ波

① 金属方形チップ周期構造  $n>1$

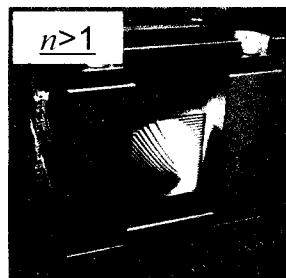


③ 金属スリット構造



3次元バルクメタマテリアル→積層構造(ミルフィーユ構造)

② 金属斜め板・金属溝周期構造  $n>1$



④ リング+金属スリット構造

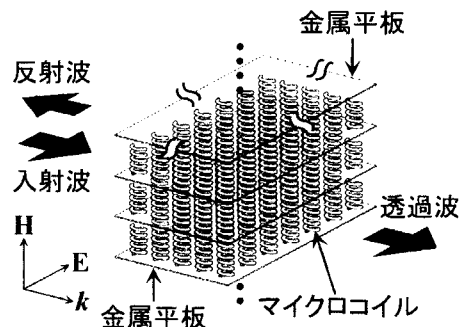


図 2 テラヘルツメタマテリアル

帯の研究が挙げられる[20, 21]。またマイクロ波帯で、導波管に分割リング共振器を装加した構造[22]や金属平行平板に円盤状の誘電体共振器を装加した構造[23]により、負の屈折率を実現し、カットオフ周波数以下で TE モードが伝搬することも報告されている。

現在、当研究室では図 2①～③でのテラヘルツ波帯の積層構造(ミルフィーユ構造)の作製ノウハウを活かし、図 3 の通り、マイクロコイルを装加した金属スリットアレーモデルで負の屈折率の設計を進めている。

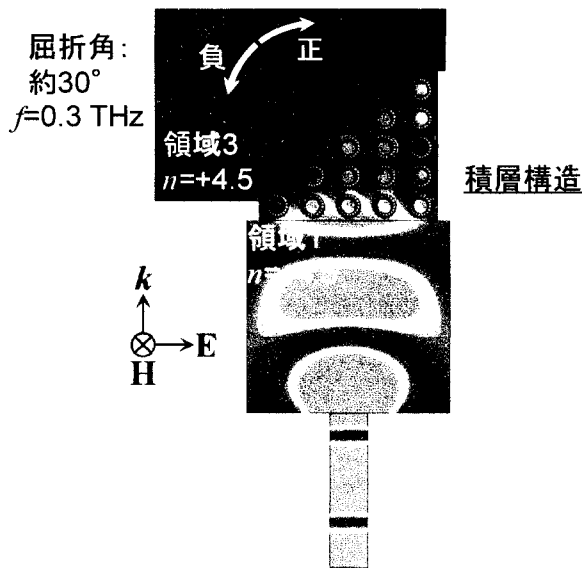


図 3 負の屈折率構造(図 2 の④)

### 3. テラヘルツワイヤーグリッド GoIS

図 4 は超高感度偏光計測のための、高消光比(-50 dB)・高透過電力(80%)・極めて高堅牢・低コスト、4 つの特長全てを両立したテラヘルツ波帯偏光子である[24, 25]。従来のテラヘルツ波帯ワイヤーグリッドは、消光比が-30 dB 程度で、素手の接触、落下、経年劣化により、張り巡らせたワイヤーが簡単に切れ、特性が著しく悪化する。

設計にはアンテナ解析手法の 1 種であるモードマッチング法[26]を用いた。電磁界シミュレータでの全構造解析は非常に時間が掛かるが、本設計手法では 1 分以内で解析できる。図 4(a)、(b)ともに積層構造により偏光子を構成している。高周波数帯では、金属の厚みは表皮の厚さの 2~3 倍が望ましいため、0.5 THz

で 0.3  $\mu\text{m}$  程度以上が望ましい。また、導体損を防ぐため導電率の高い、金、銀、銅が望ましい。そこで、図 4(a)はテラヘルツ波帯で低損失なシクロオレフィンポリマー( $n=1.53 + j0.0011$ )の 50  $\mu\text{m}$  のフィルム上へ、0.5  $\mu\text{m}$  の厚い銅層を成膜している。図 4(b)では誘電体損を完全に除去するために、中空構造となっている。また導体損の低減のため、20  $\mu\text{m}$  の薄い金属板の両面に 0.5  $\mu\text{m}$  の金層をめっきしている。

透過電力と消光比の実験結果は図 4 の通りである。表 1 に性能の比較をまとめる。従来製品と比べると、非常に広帯域で安定した高消光比を実現できている。現在、JST の協力により、本偏光子 GoIS(特許第 5626740 号)の製品化を進めている。

表 1 透過電力と消光比の比

		図4(a) フィルム構造 (複数回測定)	図4(b) 中空構造 (1回測定)	従来製品 (ワイヤーの 直径:10 $\mu\text{m}$ 間隔:25 $\mu\text{m}$ )
帯域	<-50 dB	0.28~1.09 THz (帯域幅:0.81 THz)	0.34~2.16 THz (帯域幅: )	実現不可
	<-40 dB	0.14~1.98 THz (帯域幅:1.84 THz)	0.15~2.34 THz (帯域幅: )	~1.0 THz
透過電力		76% (電場:87%)	83% (電場:91%)	99% (電場:100%)
堅牢性		高	高	構造的に振動に弱く壊れやすい
コスト		サンプルレベルのコストは低い	量産時に大幅な低コスト化が可能	高

### 4. テラヘルツ波帯アンテナ

光伝導アンテナ[27, 28]は、2 波長レーザー光やマルチモードレーザーダイオード光からなる光ビートにより、フォトミキサーとしても動作し、単色テラヘルツ波の光源ともなる[29, 30]。フォトミキサーとしての使用の際、光伝導基板上の 2 次元平面内でアレー化を行い、アンテナの入力インピーダンスを高くするなど報告されている[31, 32]。当研究室では、積層構造八木・宇田型光伝導アレーアンテナを提案[33]し、フォトミキサーへの応用の検討を進めている[34]。

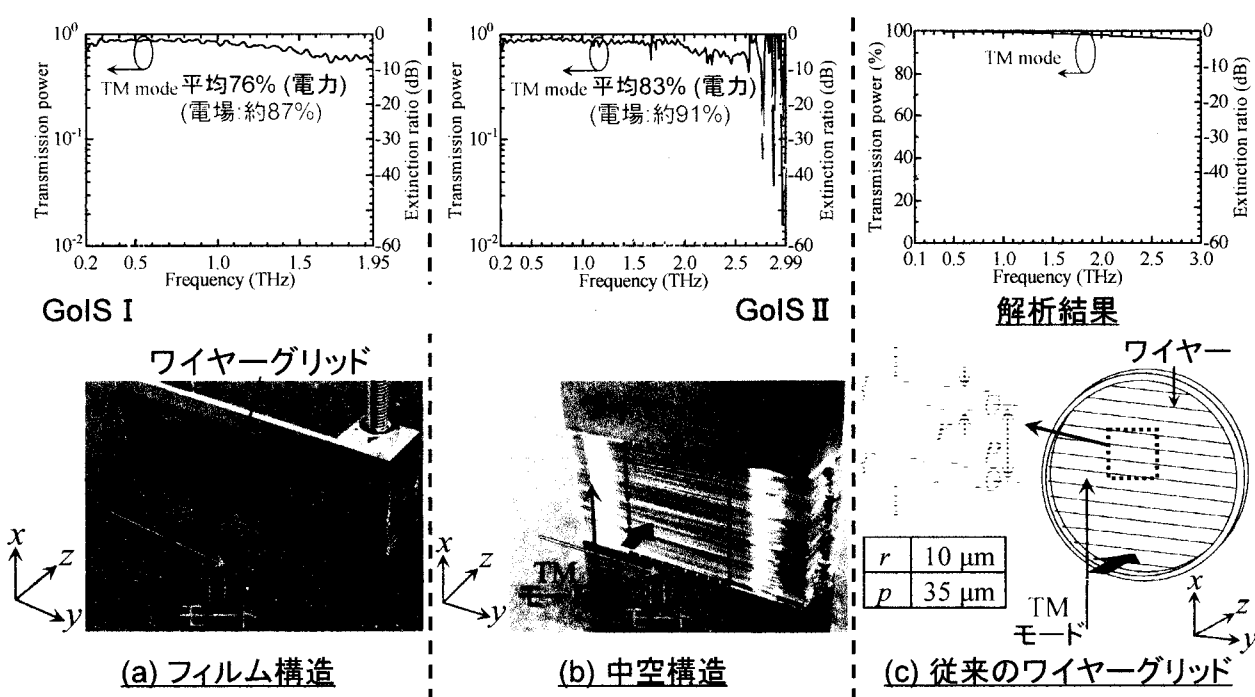


図4 -50 dB 高消光比・80%高透過電力・高堅牢性・低コスト、4つの特長全てを両立するテラヘルツワイヤーグリッド GoIS

5. テラヘルツ波伝送線路

テラヘルツ波帯の光学素子では、レンズ、偏光子、放射器、検出器と同様に、伝送線路の更なる充実も求められている。サブ波長金属構造による伝送線路は、擬似表面プラズモンポラリトン(表面波)を伝搬できる。現在、当研究室ではダイポールアレー[35]や数 10 μm オーダーの準3次元構造体の作製が可能な超微細インクジェット工法[36]の特長を活かしたポストアレー[37]の研究を進めている。

6. まとめ

マイクロ波、ミリ波帯まで含めた様々な研究グループの参考文献とともに、現在、当研究室で進めているメタマテリアルによる光学素子・アンテナの最新の研究進展について報告を行った。より詳細なスライド資料は研究室ホームページ[38]にて公開している。今後、テラヘルツ分野が産業応用に向かう道中、様々な英知が結集され大きな荒波を乗り越える際、ミリ波アンテナが長年を掛け乗り越えてきた「損失との闘い」[39](“ミリ波方形導波管スロットアレーアンテナ-損失との闘い-”)が1つ大きな鍵となる。その際、電気特性だけではなく、材料特性、試作法、試作実現性

の注意深い検討がマイクロ波、ミリ波帯以上に一層重要となると考えている。

謝辞

本研究を大きく推進してくれている研究室の学生、スタッフの方々に深く感謝いたします。

また以下の共同研究者の皆様、日頃より貴重なアドバイスを頂いている皆様に深く感謝申し上げます。

萩行正憲教授(大阪大)、高野恵介助教(大阪大)、北原英明博士、谷正彦教授(福井大)、山本晃司准教授(福井大)、永井正也准教授(大阪大)、Withawat Withayachumnankul 博士(アデレード大)、御田護博士(株式会社 M&M 研究所)、John C. Young 博士(ケンタッキー大)、広川二郎准教授(東工大)、安藤真教授(東工大)

参考文献

[1] J. B. Pendry et al., IEEE Trans. Microw. Theory Tech. 47, 2075 (1999).  
 [2] 萩行 正憲, テラヘルツテクノロジーフォーラム通信 7, 3 (2010).  
 [3] R. Shimano et al., Nature Commun. 4, 1 (2013).  
 [4] R. Matsunaga et al., Science 345, 1145 (2014).

- [5] M. Tonouchi, *Nature Photon.* **1**, 97 (2007).
- [6] Y. Kawano and K. Ishibashi, *Nature Photon.* **2**, 618 (2008).
- [7] 河野 行雄, 電子情報通信学会 テラヘルツ応用システム研究会, 講演 8 (2013).
- [8] H. Kanaya et al., *Appl. Phys. Express* **5**, 124101 (2012).
- [9] Y. Koyama et al., *Appl. Phys. Express* **6**, 064102 (2013).
- [10] H. Kitahara et al., FIT 2012 Pos2.9 (2012).
- [11] Y. Takebayashi et al., *Applied Physics A* **115**, 501 (2013).
- [12] H. Kubo et al., *IEICE Trans. Electron.* **E95-C**, 1658 (2012).
- [13] T. Togashi et al., META 2014, 1A11 (2014).
- [14] W. E. Kock, *Proc. Inst. Radio Eng.* **34**, 828 (1946).
- [15] W. E. Kock, *Bell Syst. Tech. J.* **27**, 58 (1948).
- [16] A. Alù et al., *Phys. Rev. B* **75**, 155410 (2007).
- [17] R. Menndis et al., *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.* **58**, 1993 (2010).
- [18] 木村 辰也 他, 2014 年春季 第 61 回 応用物理学関係連合講演会, 18p-E17-7 (2014).
- [19] 石原 功基 他, 2014 年秋季 第 75 回 応用物理学関係連合講演会, 19p-C6-12 (2014).
- [20] D. R. Smith et al., *Phys. Rev. Lett.* **84**, 4184 (2000).
- [21] D. R. Smith et al., *Science* **292**, 77 (2001).
- [22] R. Marqués et al., *Phys. Rev. Lett.* **90**, 183901 (2002).
- [23] T. Ueda et al., *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.* **55**, 1280 (2007).
- [24] 岸 湧大 他, 2014 年秋季 第 75 回 応用物理学関係連合講演会, 19p-C6-10 (2014).
- [25] Y. Kishi et al., IRMMW-THz 2013, Th7-3 (2013).
- [26] H. J. Eom, *Electromagnetic Wave Theory for Boundary-Value Problems.* (Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2004).
- [27] D. H. Auston et al., *Appl. Phys. Lett.*, **45**, 284 (1984).
- [28] P. U. Jepsen et al., *J. Opt. Soc. Am. B* **13**, 2424 (1996).
- [29] M. Tani et al., *IEEE Microw. Guided Wave Lett.* **7**, 282 (1997).
- [30] M. Tani et al., *Sci. Technol.* **20**, S151 (2005).
- [31] K. Han et al., *J. Infrared Milli. Terahz Waves*, **31**, 441 (2010).
- [32] I. Woo et al., *Opt. Express*, **18**, 18532 (2010).
- [33] 入江 克成 他, 2012 年春季 第 59 回 応用物理学関係連合講演会, 17p-E8-10 (2012).
- [34] 大内 隆嗣 他, 2014 年春季 第 61 回 応用物理学関係連合講演会, 17p-E17-15 (2014).
- [35] M. Yashiro et al., IRMMW-THz 2013, We P2-62 (2013).
- [36] K. Takano et al., *Appl. Phys. Lett.* **99**, 161114 (2011).
- [37] N. Koja et al., META 2014, 2P1, P16 (2014).
- [38] <http://suzuki-lab.ee.ibaraki.ac.jp/>
- [39] 広川 二郎, 電子情報通信学会総合大会講演論文集, B-1-5 (2008).