0.3THz 帯積層構造メタサーフェスアンテナの接着シートを用いた設計

Design of laminated metasurface antenna with adhesive sheets in the 0.3-THz band

○宇野　晃生 [1]　　浦島　康平 [2]　　鈴木　健仁 [3]
○Koki Uno[1]　　Kohei Urashima[2]　　Takehito Suzuki[3]
東京農工大学 工学部 知能情報システム工学科 [1]　東京農工大学 工学府 電気電子工学専攻 [2]
東京農工大学 工学研究院 先端電気電子部門 [3]
Department of Electrical Engineering and Computer Science, Tokyo University of Agriculture and Technology [1]
Department of Electronic and Information Engineering, Graduate School of Engineering, Tokyo University of Agriculture and Technology [2]
Division of Advanced Electrical and Electronics Engineering, Institute of Engineering, Tokyo University of Agriculture and Technology [3]

1. まえがき

テラヘルツ波は次世代高速無線通信[1]やイメージング[2]への応用が期待されている。テラヘルツ波の産業応用に向けて、共鳴トンネルダイオード(RTD)[3]や量子カスケードレーザー(QCL)[4]などのテラヘルツ光源が報告されている。しかしながら、テラヘルツ光源から放射されるテラヘルツ波が放射状に広がる場合、指向性利得は低くなる。そこで、高屈折率・低反射なメタサーフェス[5,6]を用いて設計したメタサーフェスアンテナ[7–13]によるテラヘルツ波の波面制御が報告されている。[7,8]では、メタサーフェスアンテナを RTD に搭載して、RTD の指向性の向上を実験で確認している。また、メタサーフェスを複数枚積層することで、メタサーフェスアンテナの高指向性利得化も解析で見出されている[11–13]。

そこで本稿では、積層構造メタサーフェスアンテナの作製に向けて、メタサーフェスを接着シートで積層した積層構造メタサーフェスアンテナを設計し、解析した。設計したメタサーフェスアンテナを RTD に搭載し、RTD 単体の指向性利得を 12.4 dB(17.4 倍)を解析で確認した。

2. 構造

図 1(a)、(b)にそれぞれ設計した積層構造メタサーフェスアンテナの鳥瞰図と断面図を示す。積層構造メタサーフェスアンテナの設計周波数は 0.312 THz である。積層構造メタサーフェスアンテナの半径は 3 mm である。積層構造メタサーフェスアンテナと光源との距離は 3 mm である。光源には 0.312 THz で発振する共鳴トンネルダイオード(RTD)を用いた。メタサーフェスは誘電体基板の表裏にカット金属ワイヤーを配置して構成している。誘電体基板にはシクロオレフィンポリマー(COP、$n_{COP}=1.53+j0.0012$)、カット金属ワイヤーには銅(導電率: σ_{Cu} = 5.8×10^7 S/m)を用いた。積層構造メタサーフェスアンテナは、接着シートを用いて接着することで、メタサーフェスを 3 層積層している。積層構造メタサーフェスアンテナの厚さは d = 50 μm、p = 20 μm、t = 0.5 μm より、193 μm である。

カット金属ワイヤーの長さ l と間隔 g の値を変化させることで、0–360 度の透過位相遅れで低反射な光学特性を設計できる。0.312 THz で RTD からメタサーフェスアンテナの開口部までの全ての伝搬路が等しくなるようカット金属ワイヤーを誘電体基板の表裏に配置し、RTD から放射された放射状のテラヘルツ波を平面状のテラヘルツ波に変換している。

3. 解析結果

図 2(a)、(b)にそれぞれ xz 面と yz 面の RTD 単体と RTD に積層構造メタサーフェスアンテナを搭載した場合の指向性利得の解析結果を示す。図 2(a)、(b)より、RTD に積層構造メタサーフェスアンテナを搭載した場合の指向性利得は xz 面と yz 面ともに 22.4 dB(174 倍)となることを解析で確認した。積層構造メタサーフェスアンテナの搭載により、RTD 単体の指向性利得 10 dB(10 倍)を 12.4 dB(17.4 倍)向上している。積層構造メタサーフェスアンテナの開口効率 η は η = 45.5%である。開口効率 η は RTD 単体の指向性利得 10 dB(10 倍)を含めて計算している。

図 3(a)、(b)にそれぞれ xz 面と yz 面の RTD 単体と RTD に積層構造メタサーフェスアンテナを搭載した場合の位相分布を示す。積層構造メタサーフェスアンテナが制御している範囲は黄色の背景で示している。図 3(a)、(b)より RTD から放射されたテラヘルツ波が積層構造メタサーフェスアンテナを通過後、xz 面と yz 面ともに平面状の位相分布に変換されている。

4. 実験方法

RTD に積層構造メタサーフェスアンテナを搭載し、遠方界放射パターンを測定する。設計した積層構造メタサーフェスアンテナの遠方界距離は 75 mm である。受信機にはショットキーバリアダイオードを使用する。回転軸に積層構造メタサーフェスアンテナを設置し、ϕ = 0°でθ = -90~+90°、ϕ = 90°でθ = -90~+90°の場合で RTD とメタサーフェスアンテナを回転して xz 面と yz 面の遠方界放射パターンを測定する。

5. まとめ

積層構造メタサーフェスアンテナの作製に向けて、接着シートを用いた積層構造メタサーフェスアンテナを設計した。設計した積層構造メタサーフェスアンテナを RTD に搭載することで、RTD の指向性利得を 12.4 dB(17.4 倍)向上した。今後、設計した積層構造メタサーフェスアンテナの作製と実験評価を行う。

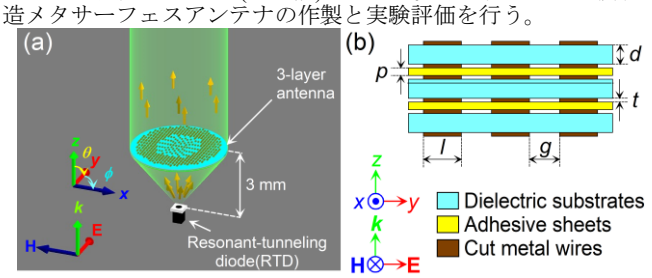

Fig. 1 (a) Bird's eye view and (b) cross-section enlarged view of a laminated metasurface antenna with adhesive sheets.

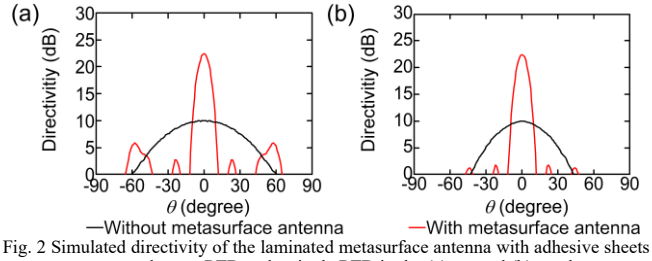

Fig. 2 Simulated directivity of the laminated metasurface antenna with adhesive sheets mounted on an RTD and a single RTD in the (a) xz- and (b) yz-planes.

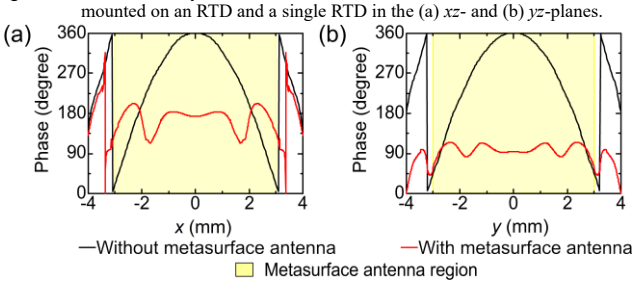

Fig. 3 Simulated phase distribution of terahertz waves passing through the laminated metasurface antenna with adhesive sheets and terahertz waves radiated from a single RTD in the (a) xz- and (b) yz-planes.

謝辞　本研究の一部は、JSPS 科研費基盤研究(B)(21H01839)、JSPS 科研費挑戦的研究(萌芽)(21K18712)、公益財団法人東電記念財団、公益財団法人中部電気利用基礎研究振興財団の助成を受けたものである。ローム株式会社より RTD のサンプル協力を受けました。

参考文献

[1] S. Dang et al., Nature Electronics **3**(1), 20–29 (2020).
[2] D. M. Mittleman, Opt. Express **26**(8), 9417–9431 (2018).
[3] M. Asada and S. Suzuki, J. Infrared Millim. Terahertz Waves **37**(6), 1185–1198 (2016).
[4] K. Fujita et al., Nanophotonics **8**(12), 2235–2241 (2019).
[5] K. Ishihara and T. Suzuki, J. Infrared Millim. Terahertz Waves **38**(9), 1130–1139 (2017).
[6] H. Asada et al., Opt. Express **29**(10), 14513–14524 (2021).
[7] T. Suzuki et al., Opt. Express **29**(12), 18988–19000 (2021).
[8] K. Endo et al., Appl. Phys. Express **14**(8), 082001 (2021).
[9] T. Suzuki et al., Opt. Express **28**(15), 22165–22178 (2020).
[10] 大内　他，電子情報通信学会論文誌　B **J100-B**(3), 235–244 (2017).
[11] H. Nakao and T. Suzuki, IRMMW-THz 2019, Paris (2019).
[12] 中田　他，テラヘルツ科学の最先端　VIII, Con-11, オンライン開催 (2021).
[13] 浦島　他，第 83 回応用物理学会秋季学術講演会, 22a-C201-8, 東北大学 川内北キャンパス+オンライン (2022).

© 2023年 応用物理学会