

50THz 帯の両面構造正方形金属チップアレーアンテナの設計

Double-sided square metal chips array antenna in the 50-THz band

〇劉 久美子¹ 朝田 晴美² 鈴木 健仁^{3,4*} Kumiko Ryu¹ Harumi Asada² Takehito Suzuki^{3,4*}東京農工大学 工学部 電気電子工学科¹ 工学府 電気電子工学専攻² 工学研究院 先端電気電子部門³国立研究開発法人 科学技術振興機構 さきがけ⁴Department of Electrical and Electronic Engineering, Faculty of Engineering¹, Department of Electrical and Electronic Engineering, Graduate School of Engineering², Division of Advanced Electrical and Electronics Engineering, Institute of Engineering³, Tokyo University of Agriculture and Technology, Japan Science and Technology Agency, PRESTO⁴

1. まえがき

メタサーフェスはサブ波長の単位構造(メタアトム)により光学特性を設計できる人工構造材料である。テラヘルツ波帯の高屈折率・無反射なメタサーフェス[1]は、連続発振(CW)テラヘルツ波光源に搭載して指向性利得を向上可能な極薄で平面状のアンテナに応用できる[2]。しかしながら、[2]のアンテナは、偏光を持つ CW 光源を想定しており、偏光特性を有する。

熱輻射は熱源から放射される偏光と位相がランダムな電磁波である。熱輻射スペクトルは熱源の温度と関係しており、例えば 500 K の物体からの熱輻射スペクトルは赤外域の約 50 THz 帯に最大値を持つ。熱輻射の指向性は、熱源に直接、作製した微細構造により制御可能である[3,4]。また、熱輻射によるエネルギー・ハーベスティング[5,6]も報告されている。

[2]のアンテナを高周波化し、無偏光にもできれば、熱源から放射される熱輻射の指向性を後から制御できる可能性がある。まずは今回、50 THz 帯 CW 赤外光源の指向性利得を向上可能な無偏光なアンテナを設計し、解析により評価した。

2. 50 THz 帯両面構造正方形金属チップアレーアンテナの設計

図 1(a)に両面構造正方形金属チップアレーアンテナを示す。CW 赤外光源から放射された球面波に近い放射波を平面波に変換できる。アンテナ上の屈折率分布は、中心から端部に向けて離散的に減少するようメタアトムを配置している。アンテナの中心の屈折率は 6.83、端部の屈折率は 2.89 である。アンテナの半径は 6.25 μm 、焦点距離は 18 μm とした。図 1(b)にアンテナの設計に用いたメタアトムの周期構造モデルを示す。メタアトムは、誘電体基板の両面に正方形の金属チップを配置した構造である。金属チップの厚さ t は 50 nm、誘電体基板の厚さ d は 100 nm とした。金属にはドルーデモデルによる金(Au)の複素導電率、誘電体基板にはシリコンナイトライド(SiN_x)の誘電率[7]を用いた。正方形の金属チップの一边の長さ l と間隔 s を変化させ、屈折率、反射電力、透過電力などのメタサーフェスの光学特性を制御できる[8]。アンテナの設計の際、メタアトムの周期長 $l+s$ は 1.1 μm で固定した。

3. 解析結果

設計した両面構造正方形金属チップアレーアンテナを、球面波に近い波を放射する微小磁気ダイポールに載せて解析し、アンテナ通過後の電界位相分布、放射パターン、指向性利得の周波数特性を評価した。解析には有限要素法電磁界シミュレータ ANSYS 社 HFSS を用いた。図 3 にアンテナを置いた場合と光源単体の場合の yz 面での 2 次元電界位相分布を示す。アンテナを配置することで、光源から放射された放射波を平面波におよそ変換できている。図 4 に光源単体の場合とアンテナを配置した場合の放射パターンの解析結果を示す。放射パターンは、場合ごとの最大放射強度を 1 として規格化している。アンテナを配置することで、光源単体の放射パターンの半値幅を xz 面と yz 面の両方で 28 度まで鋭くできている。参考のため、図 4 には市販の CW 赤外光源である量子カスケードレーザ(QCL)単体の場合の放射パターンの実験結果も載せている[9]。QCL 単体の場合の放射パターンの xz 面と yz 面での半値幅はそれぞれ 36 度、62 度である。メタアトムのパラメータを周波数で規格化したアンテナを QCL に搭載できれば、現在の QCL よりも指向性利得を向上できる可能性がある。図 5 は周波数を 30 THz から 70 THz まで変化した場合の yz 面での指向性利得である。指向性利得は、50 THz の場合は 1.95 倍、60 THz の場合は 3.19 倍となった。今回のアンテナの設計では、[8]でのメタアトムのパラメータと光学特性を結び付けた材料情報を用いた。全てのパラメータにおける光学特性は完備できておらず、限られた材料情報をもとにしている。そのため、例えばアンテナの中央のメタアトムでは、最適なパラメータよりも小さい値を用いた。以上が、設計周波数の 50 THz ではなく、60 THz で指向性利得が高くなる要因の 1 つと考えられる。アンテナの中央に配置するメタアトムのパラメータを周波数で規格化すること、50 THz で指向性利得の最大値を有するアンテナの設計できる可能性がある。

4. まとめ

50 THz 帯の両面構造正方形金属チップアレーアンテナを設計した。アンテナを配置した場合の指向性利得は、光源単体の場合と比較して 1.95 倍向上した。電界位相分布より、アンテナを微小磁気ダイポールに搭載することで光源から放射された球面波を平面波に変換できることを解析で確認した。さらにメタアトムのパラメータの周波数での規格化により、50 THz で指向性利得の最大値を有するアンテナの設計ができる可能

性がある。今後、偏光がランダムなだけでなく、位相もランダムな熱輻射での制御も目指してアンテナの設計方針や実験方法の検討を進める。

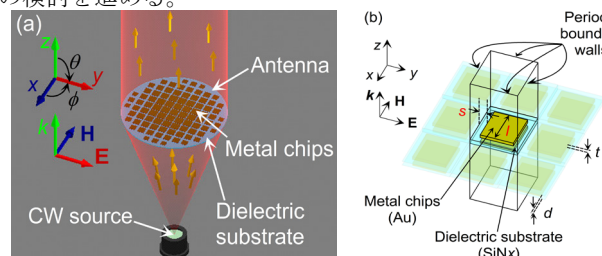


Fig. 1 (a) Double-sided square metal chip array antenna in the 50-THz band. (b) Unit-cell model of meta-atoms consisting of square metal chip on the dielectric substrate.

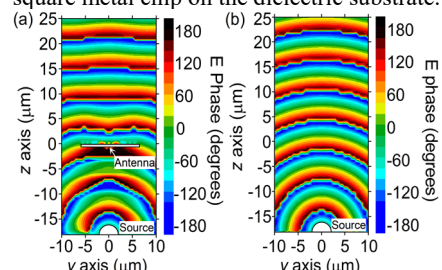


Fig.3 Two-dimensional phase distribution (a) with the antenna and (b) without the antenna in the yz -plane.

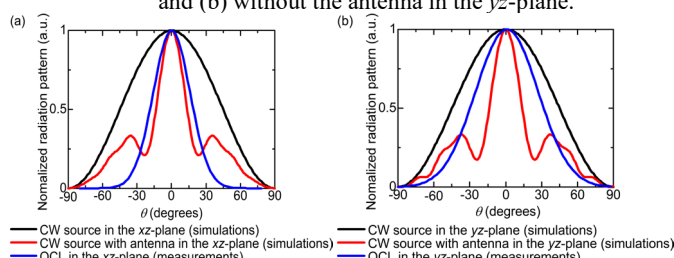


Fig.4 Simulated directivity with the antenna, without the antenna, and measured directivity of the quantum cascade laser [10] (a) in the xz -plane and (b) in the yz -plane.

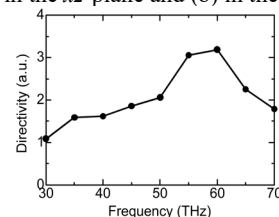


Fig.5 Frequency characteristics of the directivity for the antenna.

謝辞

本研究の一部は、国立研究開発法人科学技術振興機構さきがけ(JPMIPR1815)、日本学術振興会科学研究費基盤研究(C)(18K04970)、公益財団法人稲盛財団、公益財団法人加藤科学振興財団、公益財団法人池谷科学技術振興財団、公益財団法人東電記念財団、公益財団法人 GMO インターネット財団、公益財団法人野口研究所の助成を受けたものである。

参考文献

- [1] K. Ishihara et al., J. Infrared Millim. Terahertz Waves **38**(9), 1130–1139 (2017).
- [2] T. Suzuki et al., Opt. Express **28**(15), 22165–22178 (2020).
- [3] J. J. Greffet et al., Nature **416**(6876), 61–64 (2002).
- [4] W. Li and S. Fan, Opt. Express **26**(12), 15995–16021 (2018).
- [5] P. S. Davids et al., Science **367**(6484), 1341–1345 (2020).
- [6] J. Shank et al., Phys. Rev. Appl. **9**(5), 054040-1–054040-8 (2020).
- [7] G. Cataldo et al., Opt. Lett. **37**(20), 4200–4202 (2012).
- [8] 朝田, 鈴木, 日本熱物性学会 ふく射性質とその放射制御に関する研究会, オンライン (2020).
- [9] 浜松ホトニクス株式会社, <https://www.hamamatsu.com/jp/ja/product/type/L12006-1631H-C/.html>