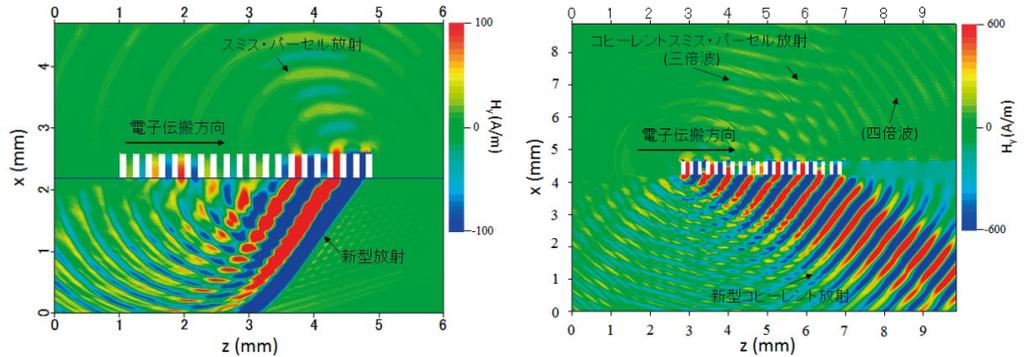


CONTENTS

- 複合構造体を用いた
新型テラヘルツ放射源の研究
- ロボットフォトンクス産業の創出を目指して
- 李研究員が電気材料技術懇談会
「優秀論文賞」を受賞
- 主な学会等報告予定



【表紙図】(左) シングル電子バンチ、(右) 繰り返し電子バンチによる放射電磁波の空間分布

複合構造体を用いた 新型テラヘルツ放射源の研究

レーザーエネルギー研究チーム 李 大治

■はじめに

電波と可視光・赤外光の間にあたる領域の電磁波はテラヘルツ波と呼ばれ、工業、医療、バイオ、セキュリティ、超高速信号処理などさまざまな分野への応用が期待されている。そのため近年のテラヘルツ波工学の発展はめざましく、中でも応用に重要な役割を担うテラヘルツ光源の研究開発は積極的に展開されている。分子ガスレーザーや半導体レーザー、ジャイロトロン、後進波管、共鳴トンネルダイオードなど従来法によるテラヘルツ波帯の開拓が活発化しているほか、新たなテラヘルツ放射物理の探索研究も精力的に進められている¹⁾。これに関し、当研究所では最近、金属周期構造に誘電体を結合した複合構造体を用いた新しいタイプの電磁放射現象を見いだした。この電磁放射効果を十分に利用できれば、高効率で単一の周波数を持つコヒーレントなテラヘルツ光源の開発に期待できる。本稿では、新型テラヘルツ放射の物理を紹介するとともに、コヒーレント光源への可能性を検討する。

■構造複合体の電磁放射

複合放射構造体を図1に示す。誘電体基板の表面に金属スリットを周期的に配列する構造(スリットアレ

イ)である。Lをスリットアレイの周期長、Wを溝幅、Hを溝の深さ、 ϵ_r を誘電率とし、構造体における伝搬電磁波の角周波数 ω とz方向の波数成分 k_z との関係を表す分散方程式を導出すると、式(1)のようになる²⁾。

$$\sum_{p=-\infty}^{\infty} \frac{j\omega\epsilon_r \left(\sin\left(\frac{\omega}{c}H\right)\xi + \cos\left(\frac{\omega}{c}H\right)\zeta \right) \zeta^2}{c\alpha_{III,p}L} = W \left(\cos\left(\frac{\omega}{c}H\right)\xi - \sin\left(\frac{\omega}{c}H\right)\zeta \right) \quad (1)$$

ここで、 $\xi = \sum_{p=-\infty}^{\infty} -\frac{j\omega\zeta^2}{cW\alpha_{I,p}}$ 、 $\zeta = \frac{2}{k_p} \sin\left(\frac{k_p W}{2}\right)$ 、 $\alpha_{III,p} = \sqrt{\epsilon_r\omega^2/c^2 - k_p^2}$ 、 $\alpha_{I,p} = \sqrt{\omega^2/c^2 - k_p^2}$ 、 $\alpha_{II,p} = \sqrt{\epsilon_r\omega^2/c^2 - k_p^2}$ 、 $k_p = k_z + 2\pi p/L$ である。

分散方程式(1)の解は構造体に存在可能な固有電磁モードを表しており、構造体のスケールと誘電率がある条件を満足していれば、従来にはない新たな電磁モードが生じる。例として、L=0.2 mm、W=0.1 mm、H=0.4 mm、 $\epsilon_r=11.9$ と設定した場合の分散方程式の解を図2に示す。2種の電磁モードが得られ、それぞれmode1とmode2と標記する。mode1は単純な金属スリットアレイにも存在する従来の電磁モードであり、表面電磁波と呼ばれる。図中に示した光円錐の領域には入っていないため、放射現象は起こさない。一方、mode2は真空光円錐には入っていないが、誘電体の光円錐内には存在する。このことからmode2は、真空中では放射はないが、誘電体中では放射現象が起こると

いう、特異な電磁気学的特徴を持つことがわかる。

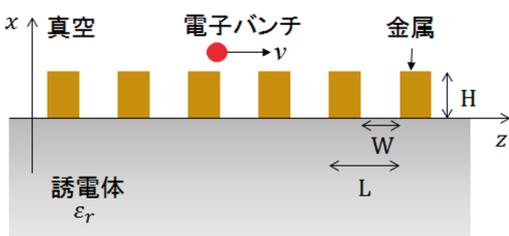
図1に示すように、特定の速度 v を持つ電子バンチ(電子の集団)が構造体の表面を通過すると、mode2を誘起することが可能になる。図2に運動エネルギー 35keVの電子速度を表す線(beam line)を示す。この線はmode2の分散曲線と交差しており、電子がmode2と共鳴することを示している。電磁共鳴によりmode2が誘起され、誘電体中のある方向に放射される。

■シミュレーションによる検証

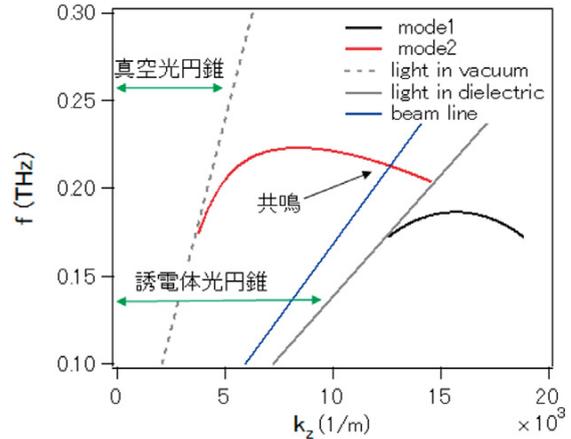
理論予測した新たな電磁モード、およびその放射を検証するためシミュレーションを行った。誘電体基板の表面に金属スリット20個を周期的に配列した構造をシミュレーションモデルとし、構造のスケール、誘電率などのパラメータは前項で示した値を用いた。また、ガウシアン状の電子バンチは構造体の表面から10 μm 離れて通過するものとし、バンチ幅と電荷量はそれぞれ0.2 ps、0.2 pCとした。二次元シミュレーションにより得られた電磁放射の y 方向の磁場成分 H_y の空間分布を表紙図(左)に示す。真空側へ放射される従来のスミス・パーセル放射³⁾とは別に、誘電体内部方向への新たな電磁放射が見られる。スミス・パーセル放射は金属周期構造の回折効果に起因するもので、周波数が放射角度に依存する広帯域の放射であるが、新たに見出された電磁放射は、スミス・パーセル放射の数百倍に増強された放射強度を持つ指向性のよい単一波長の放射である。放射周波数は0.19THz、放射角度は電子の伝搬方向から約34°であり、前項で示した理論値と一致することがわかった。

■新しいテラヘルツ光源の開発へ

コヒーレントなテラヘルツ放射は、放射周波数と同じ繰り返し周波数を持つ周期的な電子バンチを構造複合体と相互作用させることにより得られる。周期的な電子バンチは、連続的な電子ビームを変調することにより得ることが可能である⁴⁾。ここでは、0.19THzの繰り返し周波数を持つ電子バンチを前提としたシミュレーションを行い、コヒーレントな電磁放射の特性について検討した。結果を



【図1】複合放射構造体モデル



【図2】複合放射構造体の分散関係図

表紙図(右)に示す。誘電体中約34°の方向に、新型放射メカニズムによるコヒーレントな電磁波(周波数0.19THz)が現れている。この電磁放射自体は真空中に放射されないが、その第三、第四高調波はコヒーレント光として真空中に放射できることがわかった²⁾。この結果は、複合構造体を用いることにより、多色のテラヘルツ光を同時に得ることが可能であることを示している。

■まとめ

当研究所では、新しいタイプの電磁波放射物理の探索研究を進めている。本報告では、理論解析により複合放射構造体の電磁放射特性を予測したうえ、シミュレーションによる検証を行い、コヒーレントなテラヘルツ光発生の可能性を示した。この放射原理を十分に活用すれば、高性能の新型テラヘルツ光源の開発に期待できる。

■謝辞

本研究の一部は、科学研究費補助金(JP16K04987)、大阪大学レーザー科学研究所共同研究(2017B1-LI)、遠赤外領域開発研究センター国内共同研究(H29FIRDM016B)の支援を受けて行われた。

参考文献

- 1) S. Liu, C. Zhang, M. Hu, *et al.*, *Appl. Phys. Lett.*, 104, 201104 (2014).
- 2) D. Li, Y. Wang, M. Nakajima, *et al.*, *Appl. Phys. Lett.*, 110, 151108 (2017).
- 3) K. Kan, A. Ogata, *J. Plasma Fusion Res.*, 88, 603 (2012).
- 4) Yifan Liang, Yingchao Du, Xiaolu Su, *et al.*, *Appl. Phys. Lett.*, 112, 053501 (2018).

ロボットフォトニクス産業の創出を目指して

主席研究員 藤田雅之

◆地域中核企業創出・支援事業

昨年5月、近畿経済産業局の「地域中核企業創出・支援事業」に申請した「ロボットビジョン用フォトニクス産業(ロボットフォトニクス産業)の創出」が採択された。プロジェクトマネージャー1名、コーディネーター2名と共に4名の委員で構成されるロボットフォトニクス産業創出委員会を立ち上げ、日本フォトニクス協会関西支部(JPC関西)の全面的な協力を得て、ロボットフォトニクス産業の創出を目指した事業を進めている。事務局はレーザー総研・総務部が担当している。

事業の目的は、ロボット技術やフォトニクス技術を有する関西地区の事業者をネットワーク化し、両技術を融合させた新たな産業の創出を「関西連携モデル」として確立することである。将来的に、当該モデルで培ったノウハウをさまざまな分野(例えば、農業、ものづくり、介護・福祉分野等)へ展開し、関西地区におけるロボットフォトニクス産業の創出につなげていくことを考えている。

◆ロボットの眼に着目

少子高齢化社会においては、ヒトの作業を代わりにこなす自律型ロボットが重要となる。ヒトは外界からの情報の90%以上を眼から得ているといわれており、ヒトに置き換わる自律型ロボットの眼となるロボットビジョンはキーテクノロジーのひとつである。一方で、フォトニクスは光センシング、カメラなどの画像デバイスだけでなく検出用の照明も含めビジョンの中核を担う。関西はフォトニクス技術が強く、ロボットの眼に着目した新たなビジネスとしてロボットフォトニクスを位置付けている。

◆まずはレーザー打音によるインフラ点検ロボット

事業を進めるにあたり、ロボットフォトニクスの具体例としてインフラ点検ロボットを取り上げることにした。レーザー技術総合研究所は15年前からJR西日本と連携して新幹線トンネルのレーザー打音検査技術を開発してきており、実用化の域に達している。5年程

前からはトンネル付帯物や高架橋、水中コンクリートへと同技術を展開している。現状では検査箇所を作業員が目視で設定しており、このヒトの眼(と脳)が担う部分を自動化できれば、自律型検査ロボットが実現することとなる。そこで新たに、ビル壁面を対象としたレーザー打音検査ロボットの実用化に向けた事業者ネットワークを構築する活動を進めている。

◆ロボットフォトニクス産業創出委員会

事業の運営方針を決めるのが有識者から構成されるロボットフォトニクス産業創出委員会であり、事業の進捗状況を評価すると共に今後の事業展開について議論を行っている。以下に今年度の活動概要を紹介する。

まず、ロボットフォトニクス産業創出の方向性を見いだすために、社会インフラ老朽化の現状、ロボット産業の市場動向と将来予測、ロボットビジョンの市場動向と将来予測、国の各種施策に関する調査を行い報告書としてまとめた。

また、企業ネットワーク構築のために、ロボットフォトニクスの技術ニーズやシーズに関する基調講演、該当する具体的事例などを紹介する講演会やセミナーを開催した。10月24日に講演会「ロボットフォトニクス産業の創出を目指して」を開催し(参加者86名)、2月1日には特別セミナー「ロボットフォトニクス産業創出への期待」を開催し(参加者85名)、参加者アンケート



【写真】セミナー会場風景

トの結果を事業活動にフィードバックしている。

前記活動と並行してコーディネーターを中心に、市場調査やアンケートにより抽出された中核企業候補を訪問して、製品開発状況の確認等のヒアリングを実施した。事業化検討に必要な方策に関して協議等を行いつつ、関西地区事業者のネットワーク化を進めている。また、ビル壁面検査現場の見学やビル壁面タイル模擬サンプルを用いた室内実験を実施している。

◆ロボットフォトンクス共創プラットフォーム

一方で、大阪大学において「ロボットフォトンクス共創プラットフォーム」が立ち上がった。レーザー打音の可能性を実感してもらうために、打音用レーザーやレーザー干渉計などの実験装置一式を産学共同研究のために準備中である。現場のニーズを取り入れた実

用的なロボットフォトンクスシステムを産学共創の下で構築していくことを目指している。

◆今後の展開

次年度に向けて、大阪のアイローボネットワーク(i-RooBo Network Forum)との連携や2025年開催に向けて誘致活動が進められている大阪万博への協力を視野に入れた活動計画を策定しているところである。

4月からはレーザー学会において、ロボットフォトンクス技術専門委員会がスタートする。ロボットフォトンクス共創プラットフォームも本格的に稼働し始める。ロボットフォトンクス産業の創出に向けた産学官の協力体制が整いつつある。

TOPICS

李研究員が電気材料技術懇談会 「優秀論文賞」を受賞

レーザーエネルギー研究チーム李大治研究員が、平成29年度電気材料技術懇談会表彰において優秀論文賞を受賞し、1月19日に中央電気倶楽部で表彰式が行われました。「電気材料技術懇談会」は、電気材料全般に関する技術の向上を目指し、関西を中心とする大学・企業などの電気材料技術に関わる研究者・技術者が集まり、研究発表や意見交換を行う場であり、前身を含め50年以上の歴史があります。本表彰は、懇談会例会での発表や、電気材料技術雑誌への投稿論文の中から特に優秀なものを選定し、表彰する制度です。今回は当研究所が関西電力(株)からの受託により行った研究「テラヘルツ波による電力設備の劣化・欠陥検出」(Laser Cross No.350, 1027. May他を参照)が高く評価されての受賞となりました。今後も同研究員の活躍にご期待いただきたく思います。



【写真】表彰式にて(左から李研究員、吉野勝美電気材料技術懇談会会長)

主な学会報告

4月23日(月)～27日(金) The 7th Advanced Lasers and Photon Sources (ALPS' 18) (パシフィコ横浜)
ハイク コスロービアン 「Polarization and laser properties of resonators with corner-cube and axicon retro-reflectors」

Laser Cross No.360 2018, Mar.

<http://www.ilt.or.jp>

発行/公益財団法人レーザー技術総合研究所 編集者代表/谷口誠治 〒550-0004 大阪市西区靉本町1-8-4 大阪科学技術センタービル4F TEL(06)6443-6311 FAX(06)6443-6313

掲載記事の内容に関するお問い合わせは、編集者代表・谷口誠治(E-mail:taniguchi@ilt.or.jp)までお願いいたします。