

一般セッション(口頭講演) | 3 光・フォトンクス：3.8 テラヘルツ全般

📅 2024年9月19日(木) 13:30 ~ 18:15 📍 A34 (朱鷺メッセ3F)

[19p-A34-1~17] 3.8 テラヘルツ全般

時実 悠(徳島大)、林 伸一郎(情通機構)、村手 宏輔(名大)

13:30 ~ 13:45

[19p-A34-1]

THz波発生用波長可変2 μ m帯2波長光源の構築○石月 秀貴^{1,2}、平等 拓範^{1,2} (1.理研、2.分子研)

13:45 ~ 14:00

[19p-A34-2]

LiTaO₃を用いたテラヘルツパラメトリック検出○嶺 颯太¹、田中 志貴¹、川瀬 晃道¹、村手 宏輔¹ (1.名大院工)

14:00 ~ 14:15

[19p-A34-3]

高次ストークス光を用いた多波長テラヘルツ波パラメトリック発生

○鈴木 亮介¹、嶺 颯太¹、川瀬 晃道¹、村手 宏輔¹ (1.名古屋大学)

◆ 奨励賞エントリー

14:15 ~ 14:30

[19p-A34-4]

パルストレーン励起光を用いたテラヘルツパラメトリック検出

○木下 知紀¹、嶺 颯太¹、林 伸一郎²、川瀬 晃道¹、村手 宏輔¹ (1.名大院工、2.情報通信研究機構)

14:30 ~ 14:45

[19p-A34-5]

スペクトルドリル共振器による周波数安定化サブテラヘルツ光発生

○林 伸一郎¹、大野 誠吾²、宮本 克彦³、縄田 耕二⁴、浦田 佳治⁵、関根 徳彦¹ (1.情通機構、2.東北大、3.千葉大、4.東北工大、5.フラクシ)

◆ 奨励賞エントリー

14:45 ~ 15:00

[19p-A34-6]

周波数可変テラヘルツ高次光渦の発生

○足立 瑞季¹、酒井 悠連¹、藤代 隼人¹、宮本 克彦^{1,2} (1.千葉大学、2.千葉大学分子キラリティセンター)

15:15 ~ 15:30

[19p-A34-7]

非線形分極の縦成分を利用したテラヘルツ波の発生とビームステアリング技術への応用

○(M2)岩瀬 弘明¹、白坂 啓陽¹、大野 誠吾^{1,2} (1.東北大理、2.東北大高等研究機構)

◆ 奨励賞エントリー

15:30 ~ 15:45

[19p-A34-8]

微弱偏光イメージングシステムを用いた0.1 THz電気光学イメージング

○(D)岡田 竜馬¹、水野 麻弥²、竹原 浩成¹、春田 牧人^{1,3}、田代 洋行^{1,4}、太田 淳¹、笹川 清隆¹ (1.奈良先端大、2.情報通信機構、3.千歳科学技術大、4.九州大)

◆ 奨励賞エントリー

15:45 ~ 16:00

[19p-A34-9]

マイケルソン干渉計を用いた反射型テラヘルツ波位相CT

○(M2)椿谷 久翔¹、佐々木 芳彰²、湯浅 哲也¹、大谷 知行² (1.山形大院理工、2.理研)

◆ 奨励賞エントリー

16:00 ~ 16:15

[19p-A34-10]

遮蔽物越しのテラヘルツ波シングルピクセル分光イメージング

○種谷 知樹¹、嶺 颯太¹、川瀬 晃道¹、村手 宏輔¹ (1.名大院工)

16:15 ~ 16:30

[19p-A34-11]

共鳴トンネルダイオードテラヘルツ発振器を用いたサブキャリア FMCW レーダーによる 3D イメージング

○八重樫 暁¹、ドブロユ アドリアン¹、鈴木 左文¹ (1.東工大)

◆ 奨励賞エントリー

16:45 ~ 17:00

[19p-A34-12]

テラヘルツ時間領域分光法による歯の齲蝕部と正常部の識別

○小橋 遙人¹、趙 王軒¹、Verdad Agulto¹、加藤 康作¹、三浦 滉毅²、白男川 卓彦²、西谷 佳浩²、倉橋 直也³、坂之上 悦典³、堤 定美⁴、猿倉 信彦¹、中嶋 誠¹ (1.阪大レーザー研、2.鹿児島院医歯、3.京都府中小企業技術セ、4.金沢工大先端電子技術応用研)

◆ 奨励賞エントリー

17:00 ~ 17:15

[19p-A34-13]

フィードバック制御を用いた高速・高分解能周波数掃引型テラヘルツ分光法の開発

○(D)小路 悠斗¹、大道 英二¹、高橋 英幸²、太田 仁² (1.神戸大院理、2.神戸大分子フォトセ)

17:15 ~ 17:30

[19p-A34-14]

サブテラヘルツ波を用いた実用的なガソリン中の水分含有量計測

○樋口 裕治¹、仁科 孝之¹、戸辺 光浩¹、照元 幸次²、峯下 健太郎²、鶴田 一魁² (1.トキコ、2.ローム)

◆ 奨励賞エントリー

17:30 ~ 17:45

[19p-A34-15]

シクロオレフィンポリマーファイバーを用いたテラヘルツ通信

○市川 大暉¹、Weijie Gao¹、Nguyen Ngo¹、芳我 基治²、八甫谷 明彦²、伊藤 弘³、富士田 誠之¹、永妻 忠夫^{3,4} (1.阪大基礎工、2.ダイセル、3.東大理、4.阪大産研)

◆ 英語発表

17:45 ~ 18:00

[19p-A34-16]

Design and fabrication of transmissive metasurface for 300-GHz-band beamforming in Beyond 5G wireless networks

○Adam Pander¹, Daisuke Kitayama¹, Hibiki Kagami¹, Hiroyuki Takahashi¹ (1.NTT Device Technology Labs , NTT Corporation)

◆ 英語発表

18:00 ~ 18:15

[19p-A34-17]

Design and fabrication of metasurface collimating lens at 300 GHz band

○Adam Pander¹, Daisuke Kitayama¹, Hibiki Kagami¹, Toshiaki Watanabe², Hiroyuki Takahashi¹
(1.NTT Device Technology Labs , NTT Corporation, 2.Toyota Central R&D Labs, Inc.)

THz波発生用波長可変2 μm 帯2波長光源の構築Wavelength-tunable, dual 2 μm -range light source for THz-wave generation理化学研究所¹ 分子科学研究所²○石月秀貴^{1,2} 平等拓範^{1,2}RIKEN SPring-8 Center¹, Inst. Molecular Science² ○Hideki Ishizuki^{1,2}, Takunori Taira^{1,2}

E-mail: ishizuki@spring8.or.jp

【テラヘルツ波発生】粒子加速応用などを目的に、10mJ級の狭線幅高輝度テラヘルツ(THz)波発生を検討している[1,2]。高輝度パルス固体レーザーと非線形光学波長変換の組み合わせはその有力手法として近年発展が著しい。今回我々は、差周波発生(DFG)を介したTHz波発生を最終目的[3]に、波長可変性を有する2ミクロン帯2波長光源の検討を行ったので報告する。

【2 μm 帯2波長光源の構成】高輝度パルス固体レーザーと非線形光学波長変換の組み合わせによるTHz波発生の最終構成を図1に示す。波長1.064 μm マイクロチップレーザー(MCL)[4]を元励起源とし、光パラメトリック波長変換による2 μm 帯2波長光発生部(NLO1)と、2波長光の差周波発生によるTHz波発生部(NLO2)から構成する。最終的にはジュール級パルス光での強励起に対応可能とするため、NLO1およびNLO2では大口径周期分極反転LiNbO₃素子(LA-PPMgLN)[5]の利用を前提としている。今回はNLO1までの構成を検討した。

図2にNLO1の基本構成を示す。サブナノ秒動作MCL (1064nm, 0.7ns, 30Hz, 4.5mJ) を励起源とし、KTiOPO₄(KTP, 20mmLx4)を用いたType-II光パラメトリック発振(OPO) [6]による縮退点近傍2 μm 帯2波長光発生を行う。KTP-OPOは共振器長10cm、波長可変性はKTPの回転で実現した。

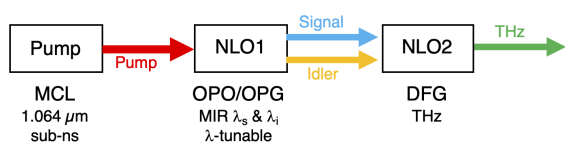
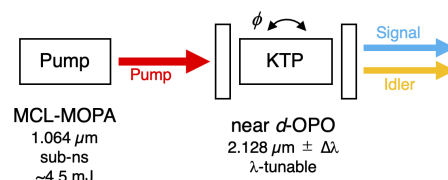


図1 THz波発生全体構成

図2 2 μm 帯2波長光発生

【出力特性と検討】図3にOPO出力特性を示す。KTPは従来のPPMgLNと比較して非線形定数で劣るため若干高いOPO発振閾値(約1.5mJ)となったが、4.09mJ励起時で約0.80mJのOPO出力(シグナル+アイドラ合計)が、スロープ効率 $\eta = 44\%$ で確認できた。図4にはOPO出力2波長およびその差周波数 Δf のKTP回転依存性を示す。KTP-OPO出力波長は結晶回転角 ϕ に敏感であり、波長可変性は5nm/0.1°程度であった。このことから、0.2°程度のKTP回転で差周波数 Δf の変調範囲1THzを実現可能となることが確認できた。

一方でこの高感度性はOPO出力スペクトル幅の拡大に繋がっており、現段階で出力シグナルおよびアイドラ光のスペクトル幅は1nmを越えている。KTP配置およびMCL励起条件最適化により、スペクトル狭帯域化を進めると共に、PPMgLNを利用したNLO1の出力向上を進める予定である。

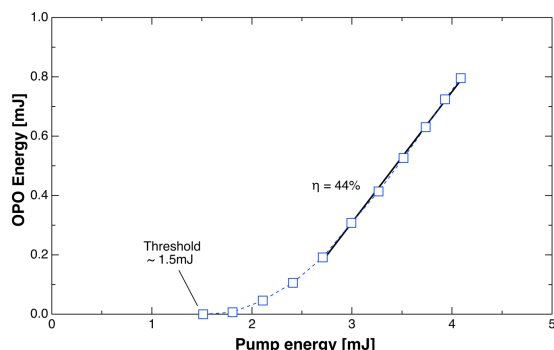


図3 KTP-OPO 出力特性

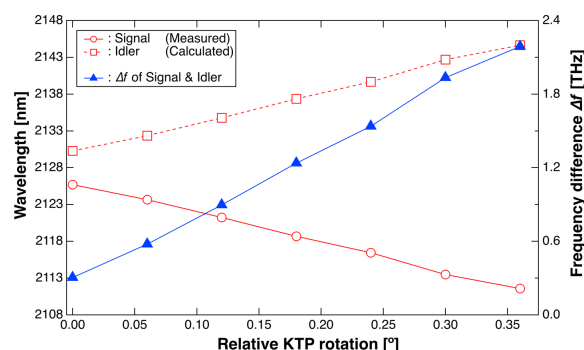


図4 波長可変性および2波長間差周波数

【謝辞】本研究の一部は、防衛装備庁実施の安全保障技術研究推進制度JPJ004596の支援を受けている。

[1] S. W. Jolly, et. al., Nature Commun. **10** 2591 (2019).[2] 吉田他, レーザー研究 **50** (7), 354 (2022).

[3] K. Takeya, et. al., LIC1-03, TILA-LIC2024 (2024).

[4] 平等, 応用物理 **90** (3), 155 (2021).[5] H. Ishizuki, et. al., Opt. Express **20**, 20002 (2012).

[6] 石月他, 第69回春季応物講演会 25a-D515-3 (2022).

LiTaO₃ を用いたテラヘルツパラメトリック検出

Terahertz parametric detection using a lithium tantalate

名大院工¹ °嶺 颯太¹, 田中 志貴¹, 川瀬 晃道¹, 村手 宏輔¹

Nagoya Univ.¹, °Sota Mine¹, Shiki Tanaka¹, Kodo Kawase¹, Kosuke Murate¹

E-mail: mine.sota.v5@a.mail.nagoya-u.ac.jp

テラヘルツ (THz) パラメトリック検出は非線形光学効果により THz 波を可視光や近赤外光などにアップコンバージョンすることで、THz 波の高感度検出が可能である [1]。THz パラメトリック検出の帯域や感度を向上するためには、高い非線形光学定数、高い損傷閾値、低い吸収係数を有する非線形光学結晶の選択が重要である。これまで、LiNbO₃ (LN) はこれらの条件を満たす優れた非線形光学結晶として広く用いられてきた。しかし、LN のパラメトリック利得が低くなる 0.8 THz 以下や 3 THz 以上の高感度検出には別の非線形光学結晶の検討が必要であり、KTP 結晶など他の非線形光学結晶の利用も報告されている [2]。そこで本研究では、低周波領域の感度向上を目指して LN よりも低周波領域において高いパラメトリック利得を有する LiTaO₃ (LT) の THz パラメトリック検出への導入を試みた。

Fig. 1 に示すように、THz 波は LN を用いた光注入型 THz パラメトリック発生器で発生させ、周波数毎の出力を焦電検出器で校正した。THz 波は校正済み THz 波用アッテネータを用いて徐々に減衰させた後、LN または LT を用いた THz パラメトリック検出により検出した。

Fig. 2 に LN または LT を用いた THz パラメトリック検出の最小検出感度の周波数依存性を示す。赤点で示す LN を用いた THz パラメトリック検出は 0.8 から 1.4 THz 付近で最小検出感度が数十 aJ、1.7 THz で 0.5 aJ 程度であった。その一方で、LT を用いた THz パラメトリック検出は 0.8 - 1.4 THz の範囲で最小検出感度が数 aJ と LN よりも高感度な検出が可能であることを確認した。特に 0.8 THz では LN と比べて約 15 dB 程度の最小検出感度の向上が見られた。

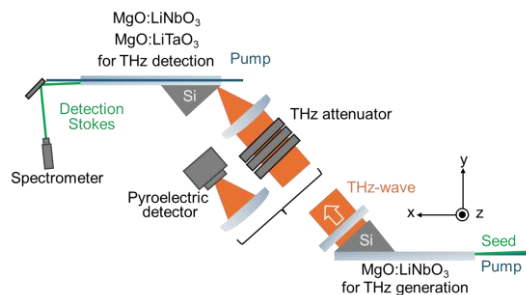


Fig. 1 Experimental setup for measuring the sensitivity of THz parametric detection using a LiNbO₃ and LiTaO₃.

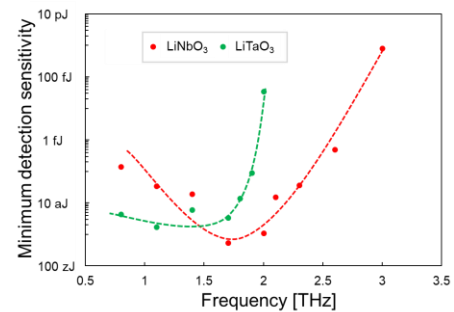


Fig. 2 Frequency dependence of minimum detection sensitivity in THz parametric detection using a LiNbO₃ and LiTaO₃.

参考文献

本研究は JST 創発的研究支援事業 JPMJFR212J、科研費 22H00212, 22KJ1596 の助成を受けたものです。

参考文献

- [1] K. Murate, S. Mine, and K. Kawase, IEEE J. Quantum Electron. 29, 1–13 (2023).
- [2] Y. Wang, C. Hu, C. Yan, K. Chen, Y. Takida, H. Minamide, D. Xu and J. Yao, Opt. Lett. 47, 5853–6 (2022).

高次ストークス光を用いた多波長テラヘルツ波パラメトリック発生

Multi-wavelength terahertz parametric generation using higher-order Stokes beams

名大院工¹ ○(M1) 鈴木 亮介¹, 嶺 颯太¹, 川瀬 晃道¹, 村手 宏輔¹

Nagoya Univ.¹ Ryosuke Suzuki¹, Sota Mine¹, Kodo Kawase¹, Kosuke Murate¹

E-mail: vw.66f.1079@s.thers.ac.jp

テラヘルツ波に期待される応用として、遮蔽物越しの非破壊検査があるが、この実用化にはおよそ 1~2 THz の周波数範囲で 10 波長程度の強力な多波長発生が必要である。ここで、1~2 THz に周波数範囲を限定する理由は、2 THz 以下において種々の遮蔽物に透過性があることと、殆どの試薬類は 1 THz 以上に指紋スペクトルを有することによる。また、10 波長程度の多波長発生で試薬分光が可能な理由は、テラヘルツ帯の試薬類の吸収線幅は 100 GHz と幅広く、多波長発生の周波数間隔が 50~100 GHz あれば指紋スペクトルを計測可能であるためである。

この多波長テラヘルツ波を用いたリアルタイム分光実現に向けて、光注入型テラヘルツ波パラメトリック発生器(is-TPG)に複数波長の近赤外光を光注入することによる多波長テラヘルツ波同時発生の研究が進められている[1, 2]。しかし、テラヘルツ波の波長数は注入光の波長数と対応するため波長数と同数の注入光源を用意する必要があり、コストや制御性、システムの大型化といった課題があった。そこで本研究では、非線形光学結晶である LiNbO₃ 結晶を高強度励起した際に、カスケード的に複数波長発生するストークス光[3]を注入光として用いることで、2 台の注入光源のみで 1~2 THz の領域で 10 波長以上の同時発生を目指した。

実験系を Fig.1 に示す。外部共振器型半導体レーザーから出力された光を、一段目の LiNbO₃ 結晶で高強度パルス化した後、二段目の LiNbO₃ 結晶に入射することで 1~4 次の高次ストークス光を発生させた。この高次ストークス光光源を 2 つ用意し（それぞれ異なる波長を発生）、レンズによるリレー光学系を通した後、ハーフミラーで合わせ LiNbO₃ 結晶に入射した。これらの入射光の組み合わせにより、それぞれの波長間の差周波に相当する多波長のテラヘルツ波をパラメトリック波長変換により発生する。発生した多波長テラヘルツ波をテラヘルツパラメトリック検出[2]で近赤外光のストークス光にアップコンバージョンし、カメラで検出したところ、12 波長の同時発生を確認できた。

本システムを用いてマルトースとグルコースを分光した結果を Fig. 2 に示す。各試薬の吸収に合わせた検出ストークス光の変化が観測できており、12 波長によりリアルタイムで分光できたといえる。

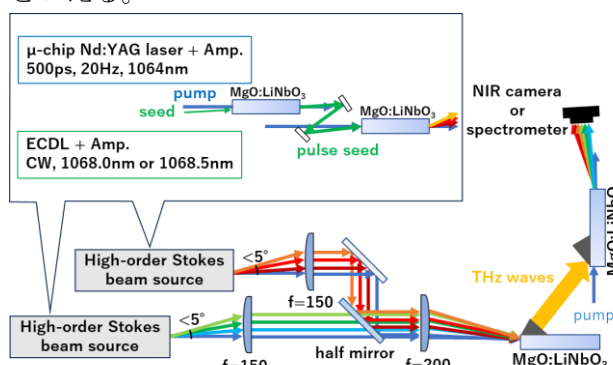


Fig.1 Experimental setup of multi-wavelength terahertz parametric generation using higher-order Stokes beams

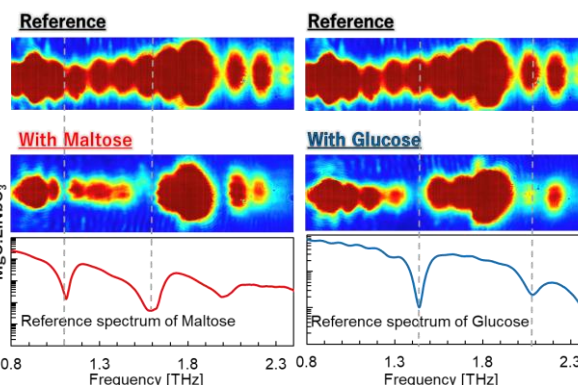


Fig.2 Measurements of up-converted NIR beams of multi-wavelength terahertz wave by NIR camera

謝辞

本研究は JST 創発的研究支援事業 JPMJFR212J、科研費 22H00212 の助成を受けたものです。

参考文献

- [1] K. Murate, S. Mine, Y. Torii, H. Inoue, and K. Kawase, Sci. Rep. 13, Art. No. 12743 (2023).
- [2] K. Murate, S. Mine, and K. Kawase, IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron., 29, pp. 1-13 (2023).
- [3] S. Mine, K. Kawase, and K. Murate, J. Infrared Milli. Terahz Waves, 45, pp. 116-123 (2024).

パルストレーン励起光を用いたテラヘルツパラメトリック検出

Terahertz parametric detection using pulse train pump beam

名大院工¹, 情報通信研究機構² ○木下 知紀¹, 嶺颯太¹, 林伸一郎^{1,2}, 川瀬晃道¹, 村手宏輔¹

Nagoya Univ.¹, National Institute of Information and Communications Technology.²

○Toshiki Kinoshita¹, Sota Mine¹, Shin'ichiro Hayashi^{1,2}, Kodo Kawase¹, Kosuke Murate¹

E-mail: kinoshita.toshiki.v8@s.mail.nagoya-u.ac.jp

我々は、光注入型テラヘルツ (THz) 波パラメトリック発生器(is-TPG)の原理を応用した THz パラメトリック検出の研究開発を行ってきた[1]。本手法では、THz 波を近赤外光にアップコンバートすることにより、THz 波を直接検出するよりも高感度な検出が可能である。しかし、THz 波と励起光を結晶に入射するタイミングを合わせる必要があることから、測定対象までの距離が変わる場合の反射測定には不向きである。そこで本研究では、THz パラメトリック検出における励起光をパルストレーン化することで、THz 波の光路長が変化する場合でも連続的に検出可能なシステム実現を目指した。

まずパルストレーン励起光による連続的な THz 波検出を目指すうえで、パルス間隔をできる限り短くすることが求められる。既に、パルストレーン励起光を用いた THz パラメトリック発生では、パルス間隔が 20 ns 程度以下になると先行パルスの影響により後続パルスの出力が低下する現象が確認されている[2]。これに対しパラメトリック検出では Fig. 1 に示すようにパルス間隔が 2 ns 程度であっても先行パルスの影響を受けず、赤線で示す 1 パルス時と変わらない安定性を示すという興味深い現象が見られた。一方、2ns よりもパルス間隔を短くすると安定性が低下した。

次に、パラメトリック検出における THz 波の入射タイミングのトレランスを調査した。Fig. 2 は、励起光と THz 波のパルスピークが重なるタイミングを 0 とし、-1 ns から +1.5 ns 程度まで変化させた際の検出光出力を示す。励起光パルス幅は約 500 ps、THz 波パルス幅は約 200 ps であるが、トレランスは 2 ns 程度あることが分かった。

以上を踏まえ、1.5 ns 間隔で 4 パルスのパルストレーン励起光を作製し、THz 波光路長を変化させて検出光強度を測定した結果を Fig. 3 に示す。強度に変動はあるものの、THz 波の光路長を 180 cm 程度変えても連続的に THz 波の検出が可能であることを確認した。

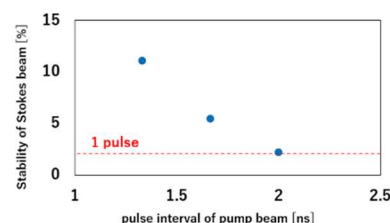


Fig.1 Dependence of stokes beam stability on pulse interval in THz parametric detection

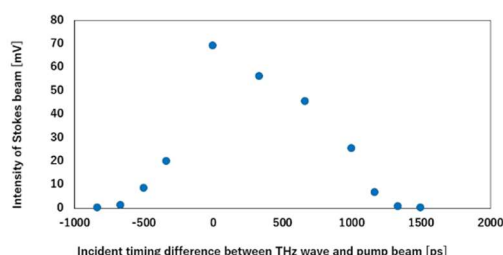


Fig.2 Tolerance of THz wave incidence timing in THz parametric detection

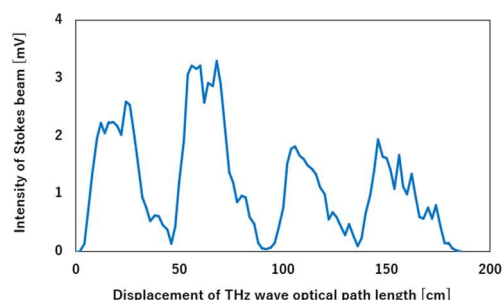


Fig.3 Stokes beam intensity as a function of THz optical path length when using pulse train pump beam (4 pulses)

謝辞

本研究を進めるにあたりご協力頂いた(株)フラクシ浦田佳治博士に感謝申し上げます。本研究は JST 創発的研究支援事業 JPMJFR212J、科研費 22H00212 の助成を受けたものです。

参考文献 [1] K. Murate, S. Mine, K. Kawase, IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron. **29**, 8500813 (2023).

[2] K. Murate, R. Kawaguchi, S. Hayashi, K. Kawase, IEEE Trans. Terahertz Sci Technol. **13**, 561 (2023)

スペクトルドリル共振器による周波数安定化サブテラヘルツ光発生

Frequency Stabilized sub-Terahertz wave Parametric Generation by Spectral Drill Cavity

情通機構¹, 東北大², 千葉大³, 東北工大⁴, フラクシ⁵

○林 伸一郎¹, 大野 誠吾², 宮本 克彦³, 縄田 耕二⁴, 浦田 佳治⁵, 関根 徳彦¹

NICT¹, Tohoku Univ.², Chiba Univ.³, TOHTECH⁴, FHLUXi Inc.⁵

E-mail: hayashi@nict.go.jp

近年、次世代型高速無線通信キャリアやリモートセンシング等としての利活用が期待されるサブテラヘルツ帯域において、周波数制御技術は必要不可欠である。本研究では、サブテラヘルツ光発生時における周波数制御のため、先進的な周波数制御および計測技術、長距離伝送技術の確立している光通信波長帯との波長変換を利用したサブテラヘルツ光発生・周波数制御手法について報告する。通信波長帯において波長固定の励起光および波長可変の注入光を用意し、ニオブ酸リチウム結晶を用いたパラメトリック波長変換により、それらの差周波数に相当するサブテラヘルツ光を発生させた。サブテラヘルツ光の周波数は、幾何学的位相を用いた光学共振器 (spectral drill cavity) を用いて波長可変光の周波数制御を行うことによって安定化した。

図 1 に、発生させたサブテラヘルツ光強度の周波数依存性を示す。波長固定の励起光エネルギーが 23 mJ/pulse (パルス幅: 0.6 ns)、波長可変の注入光パワーが 4 W (CW) のとき、位相整合条件を満たしながら注入光の波長を変化させることによって、0.29 – 1.0 THz の範囲でサブテラヘルツ光の発生が観測された。最高出力は、周波数 0.85 THz 付近で尖頭値出力約 5 kW であった。サブテラヘルツ光の周波数は、スペクトルドリル共振器を用いた波長可変光源の周波数安定化により制御した。詳細は当日報告する。本研究の一部は、科研費 JP22K18979, JP22K04940, JP23K0462, 東北大学-NICT マッチング, NICT TRIAL の支援を受けて行われた。

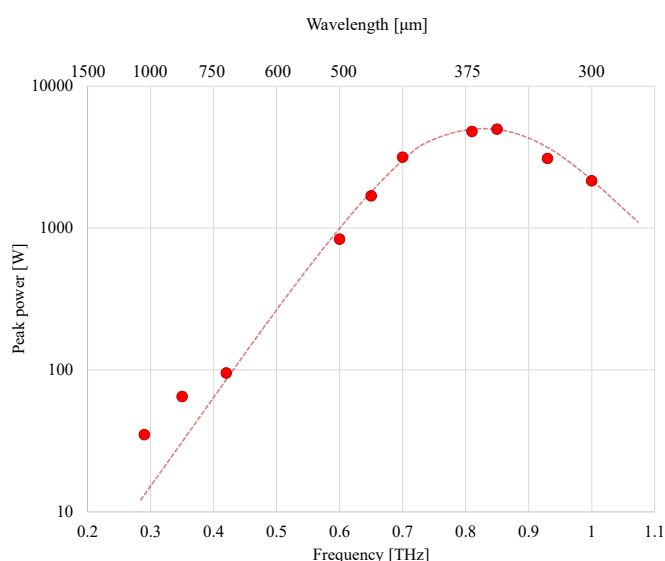


図 1 サブテラヘルツ光出力の周波数依存性。

周波数可変テラヘルツ高次光渦の発生

Frequency-tunable high order terahertz vortex generation based on the soft-aperture difference frequency generation

千葉大学¹, 千葉大学分子キラリティー研究センター²

○(M1) 足立瑞季¹, (B) 酒井悠連¹, (B) 藤代隼人¹, 宮本克彦^{1,2}

Chiba University¹, Chiba University Molecular Chirality Research Center²

○Mizuki Adachi¹, Yuzuru Sakai¹, Hayato Fujishiro¹, Katsuhiko Miyamoto^{1,2}

E-mail: k-miyamoto@faculty.chiba-u.jp

われわれは、テラヘルツ領域の物性研究において光渦は重要な役割を果たすと考え、軌道角運動量を主成分とした新たなテラヘルツ分光法の確立を目指している。そのためには、周波数可変なテラヘルツ光渦の発生技術の確立が必須である。これまでにソフトアパーチャー差周波発生法を提案し、2-6 THz において1次(トポロジカルチャージ $\ell=1$)の光渦発生に成功している[1]。本研究では、本発生法を拡張し $\ell=2$ 以上のテラヘルツ高次光渦の発生を行った。

有機非線形光学結晶 4-N, N-dimethylamino-4'-N'-methylstilbazolium tosylate (DAST)を用いた1.5 μm 帯励起による差周波テラヘルツ光発生を行う。励起光源の短波長光 λ_1 を位相板により光渦($\ell=1,2,3,4 \dots$)に変換し、ガウシアンビームである長波長光 λ_2 を DAST 結晶に同軸に入射する。この際、長波長光 λ_2 が短波長光に対するソフトアパーチャーとして機能するため、差周波光であるテラヘルツ光から不要な動径高次モード(p)がテラヘルツ光に変換されず抑制される。このためモード変換効率の高いテラヘルツ光渦の発生が可能となる。

周波数 4 THz におけるテラヘルツ高次光渦の一例を Fig.1(a)に示す。光渦の特徴である位相特異点に起因した円環状の強度分布を確認した。集光レンズを傾けることで光渦の円筒対称性を崩す非点収差集光法を用いて光渦の次数を計測し、発生したテラヘルツ高次光渦が4次であることを確認した。4次のテラヘルツ高次光渦の同調曲線を Fig. 1(b)に示す。長波長 λ_2 を1.51~1.64 μm の範囲で掃引する事で、軌道角運動量を保持したまま2-6 THzの範囲で $\ell=\pm 4$ のテラヘルツ光渦発生に成功した。今後は軌道角運動量分解テラヘルツ分光へと展開する予定である。

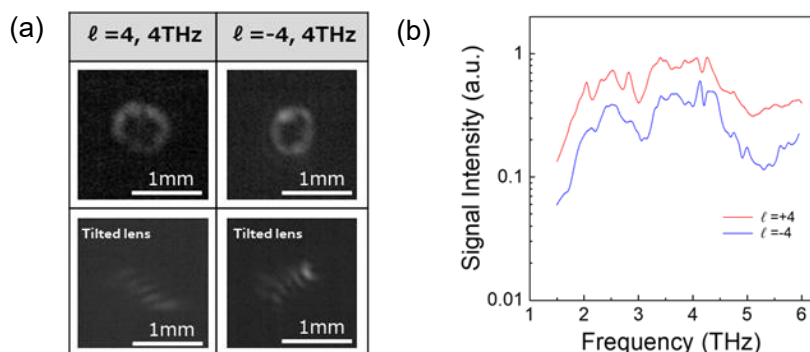


Fig. 1. (a) Experimental intensity distribution at 4 THz vortex beam at $\ell = \pm 4$. (b) Frequency tunability of the THz vortex output.

謝辞 JSPS 科研費(JP22H01980, JP23K17885)の支援を受けた。

[1] K. Miyamoto, K. Sano, T. Miyakawa, H. Niinomi, K. Toyoda, A. Vallés, T. Omatsu, Opt. Express, 27, 31840-31849 (2019).

非線形分極の縦成分を利用したテラヘルツ波の発生と ビームステアリング技術への応用

Terahertz wave radiation using longitudinal component of nonlinear polarization
and its application for beam steering

東北大理¹, 東北大高等研究機構²

°(M2)岩瀬 弘明¹, (B)白坂 啓陽¹, 大野 誠吾^{1,2}

Dept. Physics, Tohoku Univ.¹, Org. for Advanced Studies, Tohoku Univ.²

°(M2) Hiroaki Iwase¹, (B) Hiroaki Shirasaka¹, Seigo Ohno^{1,2}

E-mail: hiroaki.iwase.p3@dc.tohoku.ac.jp

ZnTe 結晶は、近赤外領域とテラヘルツ(THz)帯の屈折率が近く、光整流効果を介した THz 波発生過程において同軸位相整合条件を満たすことから、近赤外の超短パルスレーザーにより励起できる非線形光学結晶として広く利用されてきた。同軸位相整合条件下では、励起光の伝搬方向と平行な非線形分極成分(縦成分)からのテラヘルツ波放射は、遠方場に寄与しないことから通常考慮しないものの、その大きさは横成分と比べても有限の値を持つ。実際、励起光の伝搬方向と直交した方向に、テラヘルツ波検出器を置いたとき、縦分極から放射された THz 波は、結晶界面における臨界角屈折を通して空間に放射され、検出できることを前回報告した[1]。この手法において励起光の集光スポットに誘起された非線形分極を点光源として、テラヘルツ波は球面波状に放射される。回折理論に基づくと、点光源の重ね合わせから任意の波面を形成することが可能である。本研究では、そのデモンストレーションとして、励起光のビーム形状を直線状にすることで平面波状の THz 波発生と、さらにその波面方向を操作するビームステアリングを試みた。

実験では、(111)カットの ZnTe 結晶のエッジ部分に対して、波長 800 nm のフェムト秒パルスを円偏光にして入射した。励起光はシリンダリカルレンズ(CL)によって焦点面において直線状になるように集光した。発生した THz 波に対し時間領域分光イメージング計測を行った(Fig. 1)[2]。検出器は y 軸方向にスキャンすることで波面分布の計測が可能である。Fig. 2 に CL の傾きを変えたときの励起光の強度分布と THz 時間波形の水平偏光成分(x 成分)を示す。CL を回転させることで THz 波の平面波の方向が変化することが確認できた。また、検出器に取り付けられたレンズの視野角内において、CL の回転角と平面波の波数ベクトルの方向は良い一致を示し、THz 波のビームステアリングに成功したと言える。今後通信やセンシングなどの応用技術への利用が望まれる。

謝辞 本研究は JST 創発的研究支援事業 (JPMJFR2036)、JSPS 科研費 (JP23K04567, JP23K17885, JP22K04940, JP22H01980, JP22H01253, JP21H01018)の支援を受けた。

[1] 岩瀬弘明, 大野誠吾, “非線形分極の縦成分を利用したテラヘルツ波発生の検討”, 第 71 回応用物理学会春季学術講演会, 23a-P03-6 (2024).

[2] H. Iwase, S. Ohno, “Direct generation of a terahertz vector beam from a ZnTe crystal excited by a focused circular polarized pulse.” Optics Express **31**, 26923-26934 (2023).

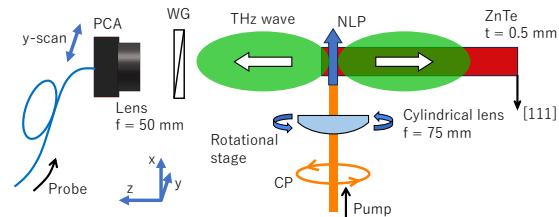


Fig. 1. Experimental setup to measure the THz wave from nonlinear polarization with longitudinal component in ZnTe (111) crystal. PCA: photoconductive antenna, WG: wire grid polarizer, CP: circular polarization, NLP: nonlinear polarization.

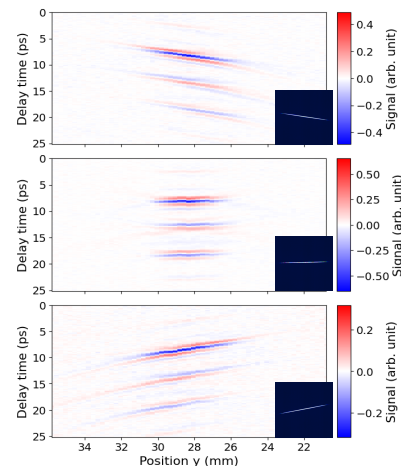


Fig. 2. THz time domain waveforms, and corresponding beam profiles on the focusing plane (insets).

微弱偏光イメージングシステムを用いた 0.1 THz 電気光学イメージング

0.1 THz electro-optic imaging using a highly sensitive polarization imaging system

奈良先端科学技術大学院大学¹, 情報通信研究機構², 公立千歳科学技術大学³, 九州大学⁴
 ○岡田 竜馬¹, 水野 麻弥², 竹原 浩成¹, 春田 牧人^{1,3}, 田代 洋行^{1,4}, 太田 淳¹, 笹川 清隆¹
 Nara Institute of Science and Technology¹, National Institute of Information and Communications Technology²,
 Chitose Institute of Science and Technology³, Kyushu University⁴
 Ryoma Okada¹ Maya Mizuno², Hironari Takehara¹, Makito Haruta^{1,3},
 Hiroyuki Tashiro^{1,4}, Jun Ohta¹, Kiyotaka Sasagawa¹
 E-mail: okada.ryoma.on9@ms.naist.jp

1. 緒論

電気光学(EO)プローブは、一次電気光学効果による電界に応じたEO結晶の複屈折変化を計測する。一般的なアンテナ等と異なり金属を用いないため、THz帯までの高周波電界に感度を持ち、侵襲性も低い。これまでに我々は、EO結晶とイメージセンサを組み合わせ、高周波電界を一括して撮像するシステムを構築し、ミリ波帯までの高周波電界の可視化を実証した[1]。

本研究では、EO結晶と微弱偏光イメージングシステム、光コム合成手法を用いた局部発振変調光生成システムを用いることで、測定周波数を0.1 THz帯まで拡張し、0.105 THz電界分布の可視化を行った。

2. 微弱偏光撮像システム

THz電界によってEO結晶で発生する複屈折率変化は非常に微弱であるため、高い信号対雑音比(SNR)での撮像が必要となる。しかしながら、イメージセンサ画素のフォトダイオードは非常に小型のため、飽和しやすく、入射光量上限が低くなってしまう。そこで、我々は各画素上に金属配線層によるワイヤグリッド偏光子を搭載した偏光イメージセンサに様な偏光子を重ねた二重偏光子構成とすることで、非常に高い感度で偏光変化を撮像する手法を提案した[2-4]。本手法では、イメージセンサ画素への入射光量を低減して画素飽和を回避しつつ、偏光変調度を増大することが可能となる。その結果、大きな光量をEO結晶に入射可能となり、SNRが飛躍的に改善される。

3. THz電界撮像システムおよび測定結果

図1(a)に作製したTHz電界撮像システムの模式図を示す。観察対象の波源として、6通倍器を用いて0.105 THz生成し、図1(b)に示されるWR-10導波管端にEO結晶を配置して撮像を実施した。EO結晶は厚さ0.1 mmの(110) ZnTeを利用した。観察対象のTHz電界はイメージセンサのフレームレートに対して非常に高いため、EO結晶と偏光子をミキサとして光ヘテロダイン法により、周波数変換を行った。このとき、EO結晶に入射する変調光の周波数とTHz電界の差周波成分が電界強度にほぼ比例した信号として偏光イ

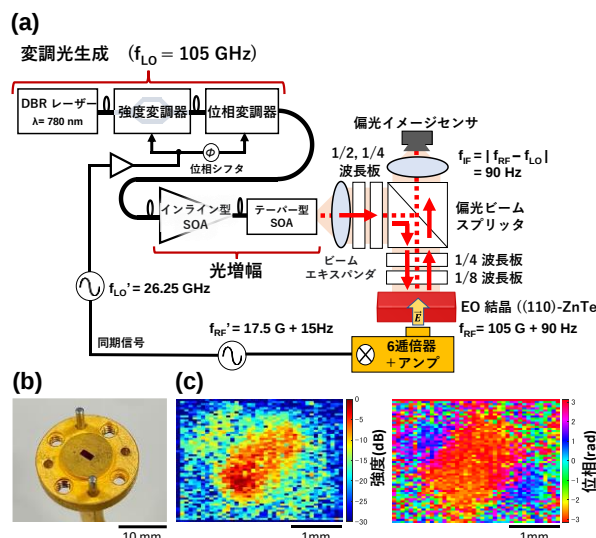


図1 (a)0.1THz電界撮像システム模式図、
(b)撮像対象WR-10導波管端、(c)電界撮像結果

メージセンサで計測される。この変調光生成には、波長780 nmの単一周波数レーザーに強度変調器と位相変調器を直列に接続した光コム生成手法を用いており、0.105 THzの通倍周波数成分を含む。さらに、インライン型SOAとテーパー型SOAの2段階増幅によって光増幅を行い、微弱偏光撮像システムに入射し、撮像を実施した。イメージセンサを360 FPSで動作させ、10000フレームからFFTにより差周波成分の90 Hzを抽出することによって、図1(c)に示される電界強度分布と位相分布を得た。

光コム合成手法では、0.1 THzよりも高い通倍波が存在するため、これを利用することで、さらに高周波の電界撮像も可能であると見込まれる。

【謝辞】

本研究開発は総務省SCOPE(JP225007001)の委託を受けたものである。LSI設計は東京大学VDEC活動を通し、ケイデンス株式会社およびシーメンスEDAジャパン株式会社の協力で行われた。

【参考文献】

- [1] K. Sasagawa *et al.*, IEEE T-MTT, **55**, pp. 2782-2791 (2007).
- [2] K. Sasagawa *et al.*, IEEE T-ED, **69**, pp. 2924-2931 (2022).
- [3] R. Okada *et al.*, Jpn. J. Appl. Phys., **62**, SC1052 (2023).
- [4] K. Sasagawa *et al.*, Opt. Continuum, **2**, pp. 758-768 (2023).

マイケルソン干渉計を用いた反射型テラヘルツ波位相 CT

Reflection-Mode Terahertz-Wave Phase-Contrast Computed Tomography

Based on Michelson Interferometer

山形大院理工¹, 理研² ^{O(M2)}椿谷久翔¹, 佐々木芳彰², 湯浅哲也¹, 大谷知行²

Yamagata Univ.¹, RIKEN² ^{O(M2)}Hisato Tsubakiya¹, Yoshiaki Sasaki², Tetsuya Yuasa¹, Chiko Otani²

E-mail: t233031m@st.yamagata-u.ac.jp

テラヘルツ波は、0.1-10 THz の遠赤外から電波にわたる帯域の電磁波を指し、光の直進性と多くの物質に対する電波的な透過性とを併せ持つ。この特性を生かし、これまでにさまざまな THz-CT が提案されているが、そのほとんどは X 線 CT のように透過信号強度を投影とする。しかし、強度コントラスト CT では、試料輪郭部分での強度の散逸に起因するアーチファクトが再構成画像に出現する問題があった[1]。これに対して本研究グループでは、位相情報を投影とする THz-CT を提案し、アーチファクトフリーで定量的な画像再構成を実現した[2]。しかしこの手法では、位相情報を取得するためには、最低 3 回の機械的走査を繰り返して取得した後に、それらに位相アンラップ処理を適用する必要がある。計測に時間がかかるだけでなく、決定的なアルゴリズムのない位相アンラップ処理では求解が不安定である。本研究では、1 回の機械的走査で投影を取得でき、位相アンラップを必要としない反射型位相 CT を提案する。一般に、試料を設置した場合としない場合の光路長差は、試料内屈折率分布の伝搬光路上の線積分になる。したがって、光路長差を投影とすれば、試料内部の屈折率分布を再構成できる。光路長を得るため、周波数可変光源とマイケルソン干渉計によるテラヘルツ波波長掃引型光干渉断層計 (THz Swept-Source Optical Coherence Tomography : THz-SS-OCT) の原理を用いた[3]。信号光は、試料を透過した後、試料下流に設置したミラーで反射されふたたび試料を透過し、参照光と干渉する。OCT 信号から取得される光路長差を投影として、FBP (Filtered Back Projection) 法により再構成する。

Fig.1 は、構築した反射型 THz-CT システムの模式図である。光源からのテラヘルツ波は、平行ビームにして、シリコンビームスプリッタ (Si-BS) で信号光と参照光に二分する。信号光は、平凸レンズ (L2) によって集光 (ビーム径: 2.0 mm) され、試料を設置するステージ上を通過後、ステージ後方のミラー (M3) に反射する。Si-BS に入射した信号・参照光は合波され、検出器で検出される。また、試料を固定するステージは、CT 撮影のため、並進・回転方向に移動する自動ステージである。実験では、Fig.2 に示す直径 20 mm の市販の発泡樹脂を試料として、CT 撮影した。光源では、600-660 GHz の範囲を 0.107 GHz 間隔で掃引したテラヘルツ波を出射する。ステージに固定した試料は、等間隔でそれぞれ並進・回転方向に移動させる。波長掃引とステージ移動を繰り返して得られた投影を、FBP 法で内部の様子を再構成した。得られた再構成画像 (Fig.3) より、試料内部の様子が再構成できていることが確認できる。しかし、試料周辺や試料の輪郭にアーチファクトがあり、穴の位置や形も不正確な部分がある。今後は、撮影条件や画像再構成プロセスの見直し、光学系の改良等を行い、より高精度な再構成画像の出力を目指す。

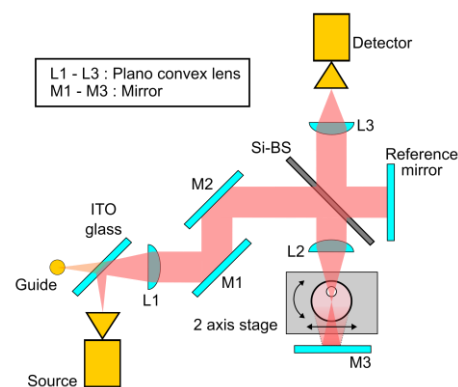


Fig.1 Reflection-mode THz-CT system



Fig.2 Sample

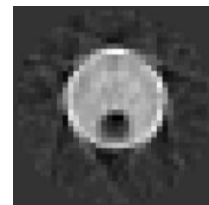


Fig.3 CT image

参考文献

- [1] B. Recur, A. Younus, et. al., *Opt. Express* **19**, 5105 (2011).
- [2] M. Suga, Y. Sasaki, et. al., *Opt. Express* **21**, 25389 (2013).
- [3] H. Momiyama, Y. Sasaki, et. al., *Opt. Express* **28**, 12279 (2020).

遮蔽物越しのテラヘルツ波シングルピクセル分光イメージング

Terahertz single-pixel spectroscopic imaging through packaging materials

名大院工, [○]種谷 知樹, 嶺 颯太, 川瀬 晃道, 村手 宏輔

Nagoya Univ., [○]Tomoki Tanetani, Sota Mine, Kodo Kawase, Kosuke Murate

E-mail: tanetani.tomoki.a3@s.mail.nagoya-u.ac.jp

テラヘルツ(THz)波を用いたイメージング応用が期待されるが、安価で高感度なカメラがない、ラスタースキャンでは測定時間が長いといった課題がある。そこで近年、1画素のディテクタで画像取得が可能なシングルピクセルイメージング(SPI)と呼ばれる画像構成法を THz 波帯で利用することが提案されている。SPI は THz 波に空間変調をかけ、変調パターンと単一検出器の強度の組み合わせから画像を構成する手法である。単一検出器を用いることから高価な二次元センサが不要となり、さらに入射光量を充分に取ることができるため SN 比の向上につながると期待されている。また、SPI では圧縮センシング [1]と呼ばれる画像構成手法を用いることで、測定時間の短縮が可能である。THz 帯の SPI は様々な報告がなされているが [2], ダイナミックレンジが狭いことやサンプルによる散乱効果・回折の影響が排除できず、これまで遮蔽物越しのイメージングは難しかった。また、THz 波帯の SPI 手法を用いた分光イメージングもほとんど報告されていない。そこで本研究では、高い出力と広帯域周波数可変性を有する光注入型テラヘルツパラメトリック発生器(is-TPG) [3]を用いて、遮蔽物越しのシングルピクセル分光イメージングを行った。

Fig. 1 に is-TPG を用いた SPI システムの実験系を示す。THz 波をサンプルに入射し、その後マスクで空間変調をかけた。サンプル透過後の THz 波は (a)TES ボロメーター (6 K) と is-TPG の逆過程を利用する (b)テラヘルツ波パラメトリック検出器 [3]を用いて計測された。マスクは、それぞれのパターンで空間周波数が同程度の Cyclic Hadamard S-masks [4] (ピクセルサイズ 0.3 mm) を用いた。高い変調率を得るために銀ナノ粒子インクで PET フィルムにマスクを印刷し、二次元ステージでマスクパターンを掃引した。イメージング領域は 12.3 mm×12.9 mm (41×43 ピクセル) に設定した。

本システムを用いて試薬の分光イメージングを行った。THz 波帯に試薬類が特徴的な吸収スペクトルを有することを利用し、周波数ごとの試薬の THz 波透過量の空間分布を得た。図 2 に分光イメージング結果を示す。用いた試薬は水酸化アルミニウム、ラクトース、グルコース、マルトースであり、それぞれ 1.39 THz, 1.42 THz, 1.48 THz, 1.62 THz において THz 波を吸収する。試薬をペレット状にし、タイル状につなぎ合わせた Fig. 2(a)に示すサンプルを Fig. 2(b)に示す厚紙封筒 2 枚、気泡緩衝材 2 枚からなる 25 dB 減衰(1.48 THz において)の遮蔽物越しで測定した。Fig. 2(c)-(f)にイメージング結果を示す。試薬分布に応じた吸収が確認でき、遮蔽物越しでの分光イメージングが可能であることが示された。

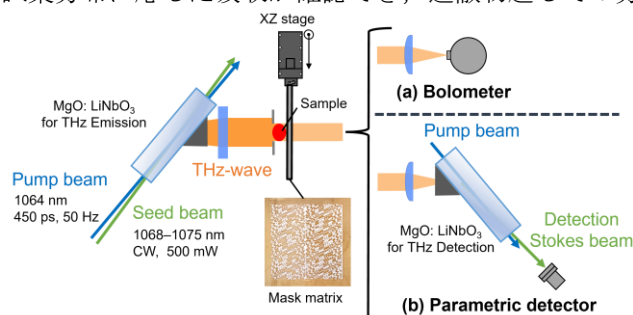


Fig. 1 Experimental setup for SPI with is-TPG. Two types of detectors were used: (a) a bolometer and (b) a THz parametric detector.

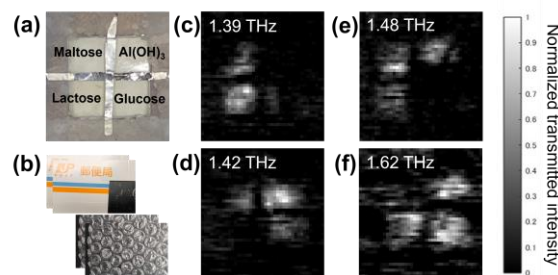


Fig. 2 (a) Sample (b) Packaging materials (c)-(f) Spectral imaging through packaging materials

謝辞

本研究は科研費 19H02627, 22H00212, JST 創発的研究支援事業 JPMJFR212J の助成を受けたものです。

参考文献

- [1] M. F. Duarte et al., IEEE Signal Process. Mag., vol. 25, pp. 83–91, 2008.
- [2] P. Duan et al., Appl. Opt., vol. 55, pp. 3670–3675, 2016.
- [3] K. Murate, S. Mine, and K. Kawase, IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron., vol. 29, pp. 1-13, 2023.
- [4] P. Kilcullen, T. Ozaki, and J. Liang, Nat. Commun., vol. 13, p. 7879, 2022.

共鳴トンネルダイオードテラヘルツ発振器を用いた サブキャリア FMCW レーダーによる 3D イメージング

3D imaging with subcarrier FMCW radar using a resonant tunneling diode terahertz oscillator

東工大 ○八重樫 暁, ドブロユ アドリアン, 鈴木 左文

Tokyo Tech. ○Satoru Yaegashi, Adrian Dobroiu, Safumi Suzuki

E-mail: safumi@ee.e.titech.ac.jp

テラヘルツ波はその高い分解能と透過性からイメージングやセンシングの応用研究が行われている。共鳴トンネルダイオード (RTD) 発振器は小型かつ室温動作が可能で高周波・高出力の特性を持つデバイスとして注目を集めており、それら応用研究に用いるのに適している。我々は、RTD を用いたサブキャリア周波数掃引連続波 (FMCW) による 1 次元的な距離測定システムを構築し、標準偏差 0.61 mm の精密測定[1]と最短で 1 点あたり約 4 ms のリアルタイム測定[2]を達成した。本研究では、ガルバノミラーを用いた 2D ラスタースキャンを組み合わせた 3D イメージングシステムについて報告する。

Fig. 1 に測定系を示す。使用した RTD 発振器の発振周波数は 680 GHz で出力は約 10 μ W である。FMCW の変調信号 (チャープ信号) は任意波形発生装置 (AWG) より発生させ、RTD とミキサーの双方に入力される。ターゲットで反射されて得られる RF 信号と LO 信号はミキシングされ、この際、RF 信号と LO 信号には伝搬時間の分だけ時間遅延が発生するため、ミキシングで出力される IF 信号はターゲット位置に応じた周波数を持つビート信号となる。この IF 信号をオシロスコープでフーリエ変換した後に PC で距離計算を行った。この際、正確な信号のピーク抽出のため最小二乗近似法によるパラボラフィッティングを適用した。次に、Fig. 2 に示すように、X スキャンと Z スキャン用の 2 つの回転ミラーを用意し、ピラミッド型に配置した 5 つのコーナーキューブに対しラスタースキャンを行った。オシロスコープにおける受信信号は最大で -50 dBm 程度であった。ノイズからピークを分離する閾値は -60 dBm に、回転ミラーの走査間隔は光学的に 1° に設定した。3D スキャンを行った結果を Fig. 3 に示す。実際の位置からの測定結果の誤差は全ターゲットで 2.8 mm (標準偏差) であり、誤差の大部分は走査間隔が大きいことに起因していると考えられる。

本研究は科研費 (24H00031)、JST-CREST (JPMJCR21C4)、文科省 X-NICS (JPJ011438)、文科省 ARIM (JPMXP1224IT0018, JPMXP1224IT0019)、および、ロームの支援を受けた。

[1] A. Dobroiu *et al.*, Sensors 20, 6848, 2020. [2] J. Ito *et al.*, IRMMW-THz 2021, China, We-AM-4-2.5101692.

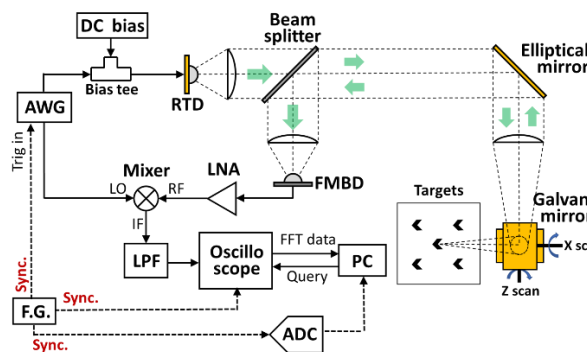


Fig. 1. Schematic of the measurement system.

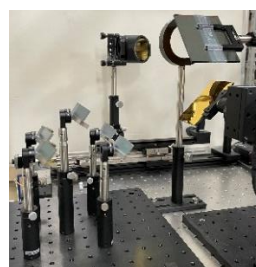


Fig. 2. Optical setup.

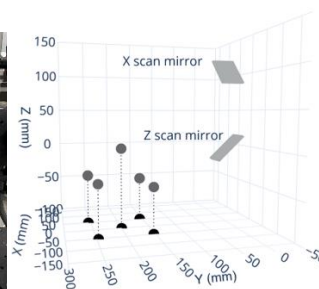


Fig. 3. 3D scan results.

テラヘルツ時間領域分光法による歯の齲蝕部と正常部の識別

Distinguishing carious and normal areas of teeth using terahertz time-domain spectroscopy

阪大レーザー研¹, 鹿児島院医歯², 京都府中小企業技術セ³,

金沢工大先端電子技術応用研⁴

○(M1)小橋 遥人¹, 趙 王軒¹, Verdad C. Agulto¹, 加藤 康作¹,

三浦 滉毅², 白男川 卓彦², 西谷 佳浩², 倉橋 直也³, 坂之上 悦典³, 堤 定美⁴,

猿倉 信彦¹, 中嶋 誠¹

ILE, Osaka Univ.¹, Grad. Sch. of Med. and Dent. Sci., Kagoshima Univ.²,

Kyoto Prefectural Technology Ctr. for Small and Medium Enterprises³,

Applied Electronics Lab., KIT⁴

○(M1) Haruto Kobashi¹, Wangxuan Zhao¹, Verdad C. Agulto¹, Kosaku Kato¹,

Koki Miura², Takahiko Shiraogawa², Yoshihiro Nishitani²,

Naoya Kurahashi³, Yoshinori Sakanoue³, Sadami Tsutsumi⁴,

Nobuhiko Sarukura¹, Makoto Nakajima¹

E-mail: nakajima.makoto.ile@osaka-u.ac.jp

1. 背景

テラヘルツ(THz)波は歯の主成分である水酸化アパタイト($\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_2$)を透過し、また X 線と異なり電離作用を有さないことから、歯科医療における検査技術への応用が期待されている。歯は外側からエナメル質、象牙質、歯髄(神経)で構成されている。エナメル質と象牙質中の水酸化アパタイトは質量比でそれぞれおよそ 95%と 68%を占め、残りの成分は有機物や水である。エナメル質や象牙質は歯表面のバイオフィルム細菌が生成する有機酸によって脱灰され、その結果齲蝕となる[1]。ゆえに齲蝕部は正常部と比べ水酸化アパタイトの比率が小さく、結晶性も低下している。従って、テラヘルツ波分光によってエナメル質、象牙質とその齲蝕部を識別できると推測される[2]。本研究ではテラヘルツ時間領域分光法(THz-TDS)によりエナメル質、象牙質と脱灰象牙質のテラヘルツ帯光学特性を測定し、その比較を行った。

2. 実験

牛の歯のエナメル質、象牙質、脱灰象牙質の切片を試料として用いた。厚さはそれぞれ 237 μm 、158 μm 、92 μm であった。本研究において脱灰象牙質は齲蝕部を模したのものとして用いられ、正常な象牙質を 5%の EDTA 溶液に 7 日間浸漬することにより得られた[2]。測定時を除き、試料は乾燥による劣化を防ぐため、保存液中に保管されている。

測定はフェムト秒レーザーと光伝導アンテナで構成された THz-TDS 装置(TOPTICA, TeraFlash Pro)を用いて透過配置で行った。空気中の水分によるテラヘルツ波の吸収を抑えるため、光路が湿度 1.5%以下になるように乾燥空気で置換した。試料は保存液から取り出し 20 分間乾燥空気中で乾燥させた後で測定を行った。

3. 結果

Fig. 1 に測定された各試料の吸収係数スペクトルを示す。緑色がエナメル質、赤色が象牙質、青色が脱灰象牙質の結果である。エナメル質と

象牙質の吸収係数は周波数の増加とともに大きくなった。両者は 1.5 THz 以上で差が広がり、2.3 THz では象牙質の吸収係数がエナメル質の 0.55 倍であった。脱灰象牙質の吸収係数も周波数とともに増加したが、エナメル質、象牙質と比べ増加量は小さく、2.3 THz においてはエナメル質の 0.16 倍、象牙質の 0.29 倍であった。

以上のように、2.3 THz における吸収係数はエナメル質>象牙質>脱灰象牙質の順であった。これは試料に含まれる水酸化アパタイトの割合がこの順に小さくなるためと推測される。

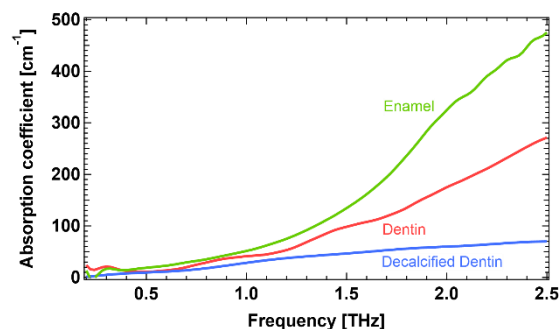


Fig. 1. Absorption coefficient spectra of enamel, dentin, and decalcified dentin of bovine from 0.2 THz to 2.5 THz.

4. 結論

牛の歯のエナメル質、象牙質、脱灰象牙質の THz-TDS 測定を行った。脱灰象牙質のテラヘルツ帯吸収係数はエナメル質と象牙質の吸収係数よりも有意に小さく、特に 1.5 THz 以上の高周波側において違いが顕著になった。この結果は THz-TDS[3,4]を用いた齲蝕診断技術を開発する上で有用であると言える。

参考文献

- [1] N. B. Pitts *et al.*, Nat. Rev. Dis. Prim. **3**, 17030 (2017).
- [2] Y. Nishitani *et al.*, J. Oral Tissue Eng. **19**, 15 (2021).
- [3] V. C. Agulto *et al.*, Sci. Rep. **11**, 18129 (2021).
- [4] J. Wang *et al.*, Nature (2024). doi.org/ 10.1038/s41586-024-07513-x.

フィードバック制御を用いた高速・高分解能周波数掃引型 テラヘルツ分光法の開発

Rapid-scan High-Resolution Frequency-Domain

Terahertz Spectroscopy via Dynamic Optical Phase Control

神戸大院理¹, 神戸大分子フォトセ²,

○(D3)小路 悠斗¹, 大道 英二¹, 高橋英幸², 太田仁^{1,2}

Grad. School of Sci., Kobe Univ.¹, Molecular Photoscience Res. Center, Kobe Univ.²

○Yuto Shoji¹, Eiji Ohmichi¹, Hideyuki Takahashi², Hitoshi Ohta^{1,2}

E-mail: 202s111s@gsuite.kobe-u.ac.jp

フォトミキシングデバイスを用いたテラヘルツ領域周波数掃引型分光法は、その高い周波数分解能から近年注目を集めている。我々はこれまでに、1 対のファイバーストレッチャーを用いて各周波数で光路差を変調し、その振幅からテラヘルツ波信号の強度を逐次的に決定する方法を開発した[1]。この方法では、1 MHz という高い周波数分解能が得られる一方で、測定に多くの時間がかかるという課題があった。そこで本研究では、動的に光路差を変調することにより高速かつ高分解能な周波数掃引テラヘルツ領域分光法を開発したので報告する。また、本装置を用いてテラヘルツ帯におけるアセトニトリルのガス分光測定を行い、分子の遠心歪みに由来する微細構造の観測に成功したので報告する。

フォトミキシングによる連続波長可変テラヘルツ光源ではエミッターから照射されたテラヘルツ波（振幅： E_{THz} ）が試料を透過してレシーバーにより光電流として検出される。この時、光電流の大きさは(I_{ph})は $I_{\text{ph}} \propto E_{\text{THz}} \cos(\Delta\phi)$ という式によって与えられる。ここで、 $\Delta\phi$ はエミッターとレシーバーの間の光位相差である。本研究では、 $\Delta\phi$ が常に $2n\pi$ となるようファイバーストレッチャーを用いて動的に光路差を変調し、 I_{ph} が常に極値となるように Feedback 制御を行った。その結果、18 points/s というデータ取得速度を達成し、以前報告した値に比べて約 100 倍の掃引速度を達成した。

希薄アセトニトリルガスに対する高速高分解能テラヘルツ分光測定の結果を Fig. 1 に示す。周波数ステップは 1 MHz であり、測定に要した時間は約 1 分である。図からアセトニトリル希薄ガスの遠心歪みに由来する微細構造が見て取れる。フィッティングによって得られた各吸収の相対周波数と吸収強度はデータベース [2]の結果と良い一致を示した。

[1] E. Ohmichi *et al.*, Appl. Phys. Lett., **119**, 162404/1-5 (2021).

[2] Jet Propulsion Laboratory database, <https://spec.jpl.nasa.gov/ftp/pub/catalog/catform.html>

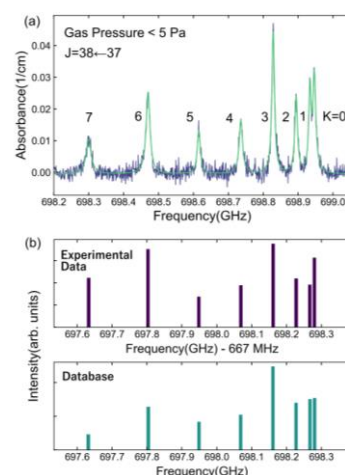


Fig. 1 (a) Gas-phase spectroscopy of dilute acetonitrile in the THz range and (b) comparison of the result with the database [2].

サブテラヘルツ波を用いた実用的なガソリン中の水分含有量計測

Practical measurement of water content in gasoline using sub-terahertz waves

トキコシステムソリューションズ株式会社¹, ローム株式会社²

〇樋口 裕治¹, 仁科 孝之¹, 戸辺 光浩¹, 照元 幸次², 峯下 健太郎², 鶴田 一魁²

Tokico System Solutions, Ltd.¹, ROHM Co., Ltd.², 〇Yuji Higuchi¹, Takayuki.Nishina¹,

Mitsuhiro.Tobe¹, Koji Terumoto², Kentaro Mineshita², Kazuisao Tsuruda²

E-mail: yuji.higuchi.mt@tokicosys.com

ガソリンに水分が混入した事により自動車エンジンが停止する不具合が発生している。これを防ぐために、これまでは計量機（給油機）に静電容量式の水分検知センサーを搭載して、水分の混入検知を行って来た。しかしながら、静電容量方式のセンサーでは微量な水分量を精度よく計測する事が難しく、水分混入の有無を二値判定するに留まっており高精度で定量的な水分含有量計測は実現できていない。そこで、僅かな水分量にも吸収される特性のテラヘルツ波を用いることを検討した。テラヘルツ波は、ガソリンと水による吸収率が大きく異なり、微量な水分の混入があるだけで、大きな透過率変化が期待できる[1]。これにより高感度な水分混入検知が実現できると考えた。しかしながら、テラヘルツ波を発生・検出する装置は、非常に大がかりで高価であったため量産製品への実装に適した実用的な手法の開発が必要であった。そこで我々は、小型な電子デバイスである共鳴トンネルダイオードを用いたサブテラヘルツ波発振器と受信器にて、高感度な水分含有量計測システムを構築した。共鳴トンネルダイオードは、小型なテラヘルツ波発生器・検出器として注目されている[2]。また実用的な小型パッケージの開発例も報告されている[3]。消費電力も10~15mW程度であり実用的なデバイスであると言える。

実際のガソリン計量機を模した給油ポンプ内に、共鳴トンネルダイオードを用いた水分含有量計測システムを構築して実験を行った。図1はガソリン中の水分含有量に対する320GHzの透過強度の変化を示している。ガソリン中の水分含有量に対して、サブテラヘルツ波の透過量が線形に変化している事が分かる。静電容量型センサーで計測が困難であった微量な水分含有量に対しても、定量的に水分含有量を計測できる事が示唆されている。濃度分解能としては、1%程度を達成できている。

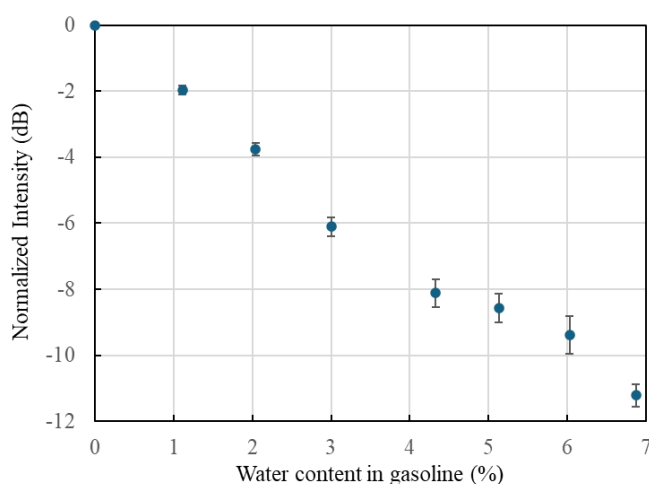


図1. サブテラヘルツ波（320GHz）のガソリン中の水分含有量による透過量の変化。

[1] Enis. Arik *et. al.*, *JIMTW* 35, 759-769 (2014)

[2] M. Asada *et. al.*, *sensors* 21, 1384 (2021)

[3] K.Tsuruda, *et. al.*, *IEEE RFIT*, pp.193-195 (2020)

シクロオレフィンポリマーファイバーを用いたテラヘルツ通信

Terahertz Communications Using Cycloolefin Polymer Fiber

阪大基礎工¹, ダイセル², 東大理³, 阪大産研⁴, [○]市川 大暉¹, Weijie Gao¹, Nguyen H. Ngo¹,芳我 基治², 八甫谷 明彦², 伊藤 弘³, 富士田 誠之¹, 永妻 忠夫^{3,4}Osaka Univ.¹, Daicel Corp.², Tokyo Univ.³, SANKEN⁴[○]Daiki Ichikawa¹, Weijie Gao¹, Nguyen H. Ngo¹,Motoharu Haga², Akihiko Happonya², Hiroshi Ito³, Masayuki Fujita¹, Tadao Nagatsuma^{3,4}

E-mail: u883832e@ecs.osaka-u.ac.jp

次世代の通信システム 6G では、従来のマイクロ波・ミリ波と比較して、広い帯域が利用可能なテラヘルツ帯の電磁波の利活用が期待されている。特に柔軟なシステム構成の実現に向けて、フレキシブルなテラヘルツ伝送路の実現が期待されている。これまでに我々は、多孔質ポリテトラフルオロエチレン [1] や石英ガラス [2] を用いた中空ファイバーによるテラヘルツ通信実験の結果を報告してきた。本研究では、マイクロ波・ミリ波帯での低損失性が報告されているシクロオレフィンポリマー [3] (Cycloolefin Polymer: COP) を用いたファイバーを伝送路としたテラヘルツ通信を実施したので、報告する。

直径 1.75 mm, 全長 50 mm の COP ファイバーを用い、3D プリンターにより作製した固定治具によって COP の断面を WR-3.4 導波管に直接突合させ、評価を実施した。ここで、送信器には単一走行キャリアフォトダイオード (Uni-travelling Carrier Photodiode: UTC-PD) [4] を、受信器にはフェルミレベル制御バリアダイオード検出器 (Fermi-level Managed Barrier Diode: FMBD) [5] を用い、キャリア周波数を 310 GHz として、16 QAM の多値変調方式を採用した。Fig. 2 に示すように、12 Gbit/s の通信速度において、誤り訂正可能な条件を満たす伝送結果が得られた。以上のように、本実験で用いた簡易的な突合型固定治具を用いる場合でも、10 Gbit/s を超える通信が可能であるという結果が得られた。一方で、別途行った COP ファイバーの透過スペクトルの評価から、単位長さ当たりの損失は約 0.12 dB/cm と比較的小さいにも関わらず、全体の挿入損失は約 -12 dB と大きいため、突合部での結合損失が通信性能の限界を決める要因となっていると考えられる。今後は、導波管とポリマー間での損失を低減可能な入出力機構を備える治具の開発を進めることで、さらなるデータレートの向上を目指す。

本研究の一部は、NEDO ポスト 5G 情報通信システム基盤強化研究開発事業 (ポスト 5G 半導体のための高速通信対応高密度 3D 実装技術の研究開発) (JPNP20017), 国立研究開発法人情報通信研究機構 (NICT) 委託研究 (00901), JST CREST (JPMJCR21C4), 科研費基盤 (S) (24H00031), 特別研究員奨励費 (24KJ1666) の支援を受けた。

参考文献

- [1]. X. Yu *et al.*, *Electron. Lett.*, **55**, 398 (2019).
- [2]. R. Koala *et al.*, *Opt. Express*, **31**, 7351 (2023).
- [3]. 和田山他, エレクトロニクス実装学術講演大会講演論文集, **24**, 130 (2010).
- [4]. T. Ishibashi *et al.*, *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, **20**, 79 (2014).
- [5]. H. Ito *et al.*, *2023 Asia-Pacific Microwave Conference (APMC)*, 89 (2023).

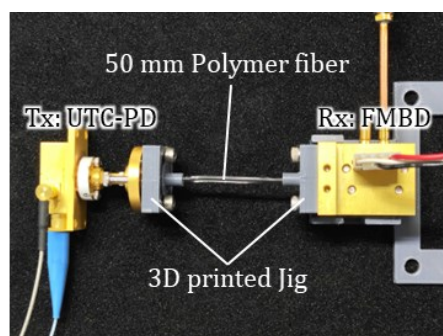


Fig. 1 Photo of a part of the experiment.

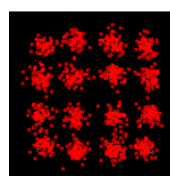
16-QAM 3 Gbaud
(12 Gbit/s)BER = 1.64×10^{-3}
EVM = 11.70%

Fig. 2 Measured constellation diagram for 16-QAM at the baud rate of 3 Gbaud (12 Gbit/s) for using UTC-PD to FMBD via COP fiber.

Design and fabrication of transmissive metasurface for 300-GHz-band beamforming in Beyond 5G wireless networks

NTT Device Technology Labs, NTT Corp.¹, [○]Adam Pander¹, Daisuke Kitayama¹, Hibiki Kagami¹,
Hiroyuki Takahashi¹

E-mail: adam.pander@ntt.com

In recent years, sub-terahertz frequency bands (30 ~ 500 GHz) have brought major attention due to their high potential for higher transmission data rates and larger bandwidths in wireless transmission. Especially, millimeter waves from 30 GHz to 300 GHz became a major development target for high-capacity networks with data rates over 100 Gb/s [1]. However, with increased operating frequencies, the degradation of SNR and data rates occurs due to increased atmospheric attenuation, non-line-of-sight propagation, and free space path losses. To address these challenges, high-directivity and high-gain antennas with reconfigurable radiation characteristics are needed. Among the beamforming techniques, metamaterial-based designs, both passive and active, are intensively studied as alternatives to more complex designs, like phased arrays [2].

In this study, to cope with various demands for the radio coverage extension in Beyond5G wireless communication, passive multilayer metasurfaces with radius size-controllable transmission phase variation are experimentally realized. Fig. 1(a) shows a general schematic of the phase gradient of metamaterial cells that results in the beam steering of the incident wave during the transmission through the metasurface. Different-sized metamaterial cells were combined in a way that the metasurface exhibits a desired transmission phase gradient across its surface, allowing for beamforming of the incident wave into a predefined direction (0 ~ 38° in this work). Fig. 1(b) shows an example of a fabricated metasurface device with gradient metamaterial cells. Except for the beamforming characteristic, the device also shows good flexibility and optical transparency, making it a promising candidate for application to various surfaces, including curved geometries or windows. The inset of Fig. 1(b) shows simulation and experimental results of the near-*E*-field distribution maps, that were in good agreement, confirming the correctness of the design and high precision of fabrication. Fig. 1(c) shows far-field results obtained for various beamforming angles at 300 GHz. The main lobes showed as-designed beam steering angles for all metasurface devices.

In addition to the *E*-field distributions of the presented devices, the data transmission rate measurements were also carried out. For the link distance of 25 cm and without a Tx power amplifier, the achieved data rates of above 70 Gb/s for different metasurfaces were larger than previously presented beamformers, including phased arrays at 300 GHz band. These results can be used for the coverage extension of the indoor-to-outdoor transmission at sub-THz frequency bands in future Beyond5G networks.

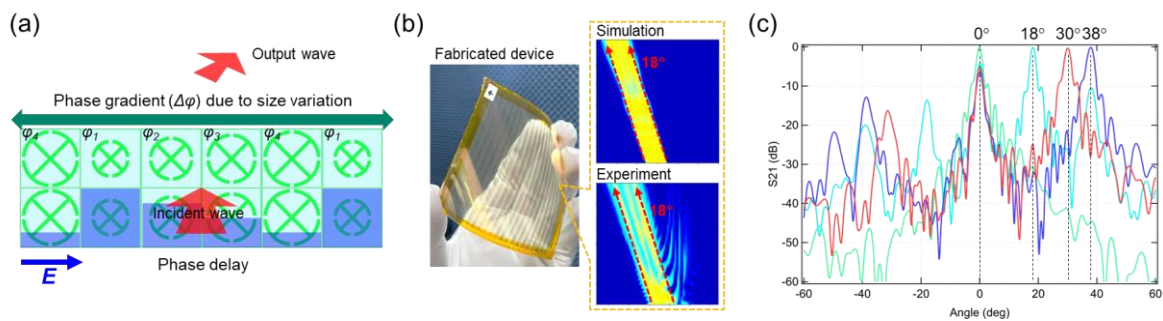


Fig. 1. (a) Schematic of transmission phase gradient in beamforming metasurfaces. (b) Fabricated device and simulation and experimental results of near-*E*-field distributions. (c) Far-field measurement data.

Reference

- [1] H. Hamada, *et al.*, 300-GHz-band 120-Gb/s wireless front-end based on InP-HEMT PAs and mixers, *IEEE J. Solid-State Circuits* **55**(9), 2316-2335, 2020.
- [2] D. Kitayama, *et al.*, Alignment-free twisted-split-ring metasurface on single substrate with 2π phase range for linearly polarized sub-terahertz wave, *Opt. Express* **31**(13), 20769-20786, 2023.

Design and fabrication of metasurface collimating lens at 300-GHz-band

NTT Device Technology Labs, NTT Corp.¹, Toyota Central R&D Labs., Inc.²,

◦Adam Pander¹, Daisuke Kitayama¹, Hibiki Kagami¹, Toshiaki Watanabe², and Hiroyuki Takahashi¹

E-mail: adam.pander@ntt.com

With the advancements in various semiconductor technologies that operate at millimeter-wave bands (30 ~ 500 GHz), numerous applications in radar, sensing, and imaging were developed. The development of radars in bands between 24 and 79 GHz was demonstrated in automotive applications [1]. These types of devices can perform low-resolution mapping and detection in relatively uncluttered scenes but do not allow for object recognition. Contrarily, the use of higher frequencies, e.g. 300 GHz, can notably improve the resolution of sensors for short-range applications, allowing also for object recognition [2].

Like in wireless communication, various beamforming techniques were developed in radar and sensing to allow for the formation of beam radiation patterns, beam scanning, or spectral selectivity, among which metasurface devices have been intensively studied as an enabling technology for millimeter-wave radar and sensing. While phase gradient metasurface designs allow to achieve beamforming of the incident beam, the output power is often lower than the input antenna signal. To increase the output power that is necessary for radar and sensing applications, the side lobe power need to be guided towards the main lobe direction. Subsequently, multiple types of lenses and collimators were developed at lower frequencies.

In this work, we have designed and fabricated a set of collimating lenses that can precisely focus the incident beam into the desired direction at the 300 GHz. Fig.1(a) shows a continuous 2π phase controllable multilayer metamaterial cell used in this work. The small cell size of 0.25 mm ($\lambda/4$ @300 GHz) allowed for a higher transmission efficiency design of a multi-bit metasurface lens, due to a smaller step size (higher quantization). The change of the phase was achieved by the variation of the radius, r , of the metamaterial cell in the range of 0.07 mm to 0.12 mm. Cells were organized into a 3-bit (8-phase step) lens pattern that was designed based on the calculated phase profile of the lens for given focal points f_1 and f_2 on both sides of the lens. In the schematic in Fig. 1(b), cells of different sizes are organized into radial patterns with a transmission phase step of $\Delta\varphi = 45^\circ$ between each zone. The inset shows an image of a fabricated device. Fig. 1(c) shows the simulation and experimental results of near- E -field obtained for the collimating lens in this work, at 300-GHz-band. A highly collimated beam was obtained in both simulation and experiment, validating the design, and accuracy of fabrication. To the extent of our knowledge, this is the first experimental work showing collimating lenses at 300-GHz-band for sensing and radar applications.

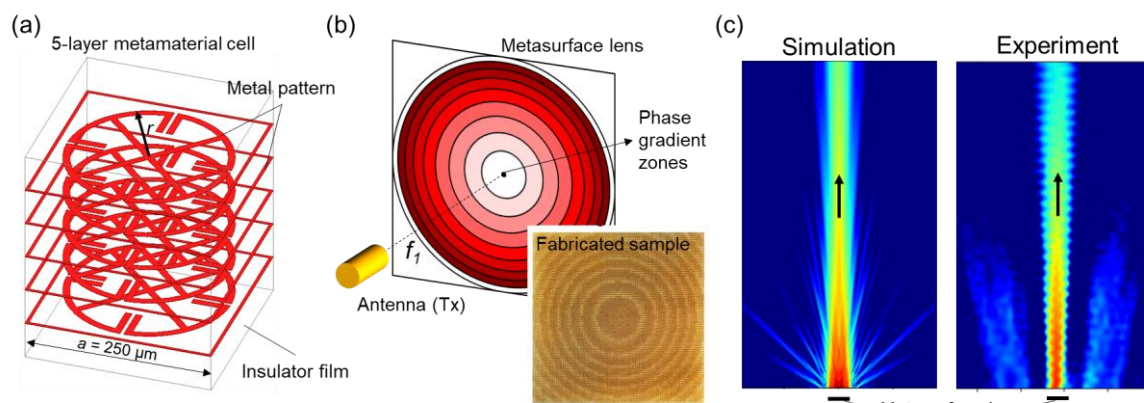


Fig. 1. (a) Schematic of multilayer metamaterial cell. (b) Schematic of multibit collimating lens patterns and fabricated device. (c) Simulation and experimental results of the near- E -field distribution.

Reference

- [1] C. Kohlberger, *et al.*, Metamaterial lenses for monostatic and bistatic 77 GHz radar systems, *Int. J. Micro. Wire. Tech.* **15**(6), 2023, 1021 – 1026.
- [2] L. Daniel, *et al.*, Sub-THz Radar Imagery for Automotive Application, in *Proceedings of the 19th European Radar Conference*, 2019.