

Oral presentation 3 Optics and Photonics : 3.8 Terahertz technologies (formerly 3.9)
--

📅 Wed. Sep 20, 2023 1:30 PM - 4:30 PM JST | Wed. Sep 20, 2023 4:30 AM - 7:30 AM UTC | 🏢 B203 (Civic Auditorium)

[20p-B203-1~10] 3.8 Terahertz technologies (formerly 3.9)

Toshiki Yamada(NICT), Junichi Fujikata(Tokushima University)

◆ Presentation by Applicant for JSAP Young Scientists Presentation Award

1:30 PM - 1:45 PM JST | 4:30 AM - 4:45 AM UTC

[20p-B203-1] Research on detection of specific binding between biomolecules by THz SPR in topological insulator

○Mayuko Takahashi¹, Hinano Sugimoto¹, Hitoshi Tabata¹ (1.The Univ. of Tokyo)

◆ Presentation by Applicant for JSAP Young Scientists Presentation Award

1:45 PM - 2:00 PM JST | 4:45 AM - 5:00 AM UTC

[20p-B203-2] Investigation of phase modulation in terahertz communication using micro-optical comb

○Takumi Kikuhara¹, Norihiro Makimoto², Yuu Tokizane³, Naoya Kuse³, Yudai Matsumura¹, Hiroki Kishikawa³, Atsushi Kanno⁴, Shintaro Hisatake⁵, Yasuhiro Okamura⁶, Takeshi Yasui³ (1.Grad. Sch. Sci. Tech. Innov. Tokushima Univ., 2.Tokushima Pref. Ind. Tech. Center, 3.pLED, Tokushima Univ., 4.Nagoya Inst. Tech., 5.Gifu Univ., 6.Yamanashi Univ.)

2:00 PM - 2:15 PM JST | 5:00 AM - 5:15 AM UTC

[20p-B203-3] Determining the number of modes in an optical frequency comb by measuring the modulation depth

○Yuki Nakajima¹, Hajime Inaba¹ (1.NMIJ AIST)

2:15 PM - 2:30 PM JST | 5:15 AM - 5:30 AM UTC

[20p-B203-4] Fourier spectroscopy of nonlinear interferometry by using a THz-PMT/I.I.

○Hisanari Takahashi¹, Naoya Kawai¹, Kota Katsuyama¹, Ken Nagumo¹, Tobias O. Buchmann², Matej Matej², J. Lange Simon², Peter U. Jepsen², Takayuki Omura¹, Hiroshi Satozono¹ (1.Hamamatsu, 2.DTU)

2:30 PM - 2:45 PM JST | 5:30 AM - 5:45 AM UTC

[20p-B203-5] Terahertz nonlinear excitation of coherent phonons in layered semiconductor WSe₂

○Satoshi Kusaba^{1,2}, Haw Wei Lin³, Ryo Tamaki¹, Ikufumi Katayama¹, Geoffrey A. Blake^{2,3}, Jun Takeda¹ (1.Dept. of Phys., Yokohama Natl. Univ., 2.GPS, Caltech, 3.CCE, Caltech)

3:15 PM - 3:30 PM JST | 6:15 AM - 6:30 AM UTC

[20p-B203-6] Development of terahertz spectrometer for high-precision identification of powder reagents

○Kenta Shimizu¹, Sota Mine¹, Kodo Kawase¹, Kosuke Murate¹ (1.Nagoya Univ.)

3:30 PM - 3:45 PM JST | 6:30 AM - 6:45 AM UTC

[20p-B203-7] Pulse train terahertz wave generation from terahertz parametric source

○Toshiki Kinoshita¹, Mine Sota¹, Hayashi Shin'ichiro^{1,2}, Kawase Kodo¹, Murate Kosuke¹ (1.Nagoya Univ., 2.NICT)

3:45 PM - 4:00 PM JST | 6:45 AM - 7:00 AM UTC

[20p-B203-8] Terahertz parametric generation by edge reflection phase matching using sub-nanosecond pulse

○Naoya Yamamoto¹, Sota MIne¹, Kodo Kawase¹, Kosuke Murate¹ (1.Nagoya Univ.)

4:00 PM - 4:15 PM JST | 7:00 AM - 7:15 AM UTC

[20p-B203-9] Relationship between the direction of the electric field applied to electro-optic polymer and the Stark shift: Toward the ultrafast electric field detection utilizing the Strak effect of electro-optic polymer

○Toshiki Yamada¹, Takahiro Kaji¹, Akira Otomo¹ (1.NICT)

4:15 PM - 4:30 PM JST | 7:15 AM - 7:30 AM UTC

[20p-B203-10] Gapless detection of a broadband terahertz pulse using a metal surface in air based on field-induced second-harmonic generation

○Shunsuke Tanaka¹, Yuta Murotani¹, Shunsuke Sato^{2,3}, Tomohiro Fujimoto¹, Takuya Matsuda¹, Natsuki Kanda¹, Ryusuke Matsunaga¹, Jun Yoshinobu¹ (1.The Institute for Solid State Physics, The Univ. of Tokyo, 2.University of Tsukuba, 3.Max Planck Institute)

トポロジカル絶縁体を用いた THz SPR による生体分子間特異結合検出にむけた研究

Research on detection of specific binding between biomolecules by THz SPR in topological insulator

東大院工¹ ○高橋 茉由子¹, 杉本 雛乃¹, 田畑 仁¹

¹School of Engineering, University of Tokyo ○Mayuko Takahashi¹, Hinano Sugimoto¹, Hitoshi Tabata¹

E-mail: takahashi@bioxide.t.u-tokyo.ac.jp

1. 序論

テラヘルツ帯域(0.1~10 THz)には、分子間結合に起因する数多くの振動モードが存在し、分子間特異結合を蛍光分子修飾無しに直接観測出来るポテンシャルがある[1]。本研究では、近年観測が報告されている[2]トポロジカル絶縁体によるテラヘルツ帯域 SPR 法を用いて、生体関連分子の分子間特異結合の非標識検出を目的とする。従来の可視光域 SPR 法は、分子種や結合種の特定といった定性的な分析は難しかったが、トポロジカル絶縁体によるテラヘルツ帯域 SPR 法では、分子間振動共鳴と表面プラズモン共鳴の二つの共鳴の相乗効果により高感度・非標識センシングの実現が期待出来る。我々の以前の研究ではメンブレンを用いた非標識検出に成功したが[3]本発表では、よりトポロジカル絶縁体の表面感性を活用するため生体分子をトポロジカル絶縁体薄膜表面に直接修飾する方法として SAM 膜に着目した。トポロジカル絶縁体薄膜に SAM 膜を形成した例はなく、トポロジカル絶縁体固有の表面感性を確認する指標となると考えている。

2. 実験と結果

パルスレーザー堆積法を用いて、基板温度 280 °C、アルゴンガス雰囲気 23Pa の条件で、サファイア c 面基板上に Bi₂Se₃ 薄膜を作製した。XRD 測定より、シャープな(0 0 3n)ピークが見られ、不純物相のない単相の Bi₂Se₃ 薄膜が形成できた (Fig.1(a))。フォトリソグラフィーにより回折格子幅 64 μm の Bi₂Se₃ 回折格子構造を作製した。テラヘルツ直線偏光を回折格子に垂直に透過させると、0.6 THz 付近で透過率低下を示すディップが見られ、表面プラズモン共鳴の発生を確認した (Fig.1(b))。その後、作製した Bi₂Se₃ 薄膜を HS (CH₂)₁₀COOH 溶液に一晩浸漬しエタノール、純水で十分に洗浄後、XPS 測定により薄膜表面の構成元素を確認した。十分洗浄後もカルボキシル基に由来するピークが見られた事から Bi₂Se₃ 薄膜表面上に SAM 膜を形成出来たと考えられる (Fig.1(c))。SAM 膜を形成後、テラヘルツ直線偏光を回折格子に垂直に透過させると、SAM 膜をつける前より低周波数側で表面プラズモン共鳴の発生を確認した (Fig.1(b))。これは Bi₂Se₃ 薄膜表面に SAM 膜が形成された事で誘電率が増加し表面プラズモン共鳴が低周波数側で起きたと考えられる。

謝辞 本研究は Beyond AI 連携事業による共同研究費、JST CREST の課題番号 JPMJCR2202、AMED の課題番号 JP22zf0127006、JSPS 科研費 JP20H05651、JP22K18804、JP23H04099 の助成を受けたものです。

参考文献 [1] S. Kawabe, M. Seki, and H. Tabata, Appl. Phys. Lett., 108, 8, p. 081103, 2016. [2] P. Di Pietro et al., Nat. Nanotechnol., 8, 8, pp. 556–560, 2013. [3] H. Sugimoto, et al., Optics Letters 46, 16, pp. 3897-3900 (2021)

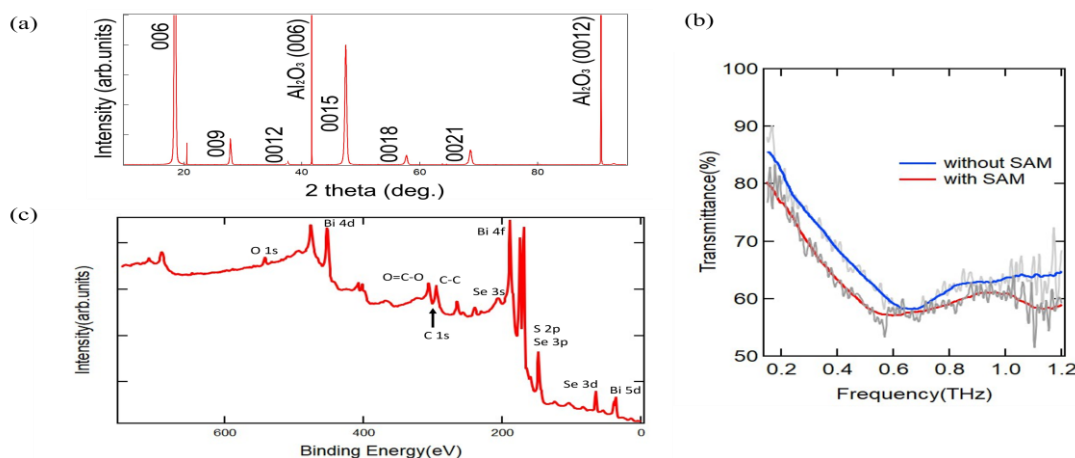


Fig.1(a) Bi₂Se₃ XRD (b) Bi₂Se₃ terahertz transmittance (c) Bi₂Se₃ with SAM XPS

マイクロ光コムを用いたテラヘルツ通信における位相変調方式の検討

Investigation of phase modulation in terahertz communication using micro-optical comb

徳島大院創成¹, 徳島県工技センター², 徳島大 pLED³, 名工大⁴, 岐阜大⁵, 山梨大⁶

○(M1) 菊原拓海¹, 牧本宣大², 時実悠³, 久世直也³, 松村雄大¹, 岸川博紀³, 菅野敦史⁴, 久武信太郎⁵, 岡村康弘⁶, 安井武史³

Grad. Sch. Sci. Tech. Innov. Tokushima Univ.¹, Tokushima Pref. Ind. Tech. Center², pLED, Tokushima Univ.³, Nagoya Inst. Tech⁴, Gifu Univ.⁵, Yamanashi Univ.⁶

°T. Kikuhara¹, N. Makimoto, Y. Tokizane, N. Kuse, Y. Matsumura, H. Kishikawa, A. Kanno, S. Hisatake, Y. Okamura and T. Yasui

E-mail: kikuhara@femto.me.tokushima-u.ac.jp

<https://femto.me.tokushima-u.ac.jp>

<https://www.youtube.com/@takeshiyasui2792/>

テラヘルツ波 (THz 波) は, 次世代移動通信 (Beyond 5G/6G) におけるキャリア波としての利用が期待されている. Beyond 5G における超高速・大容量な通信の実現には THz キャリア波の低位相ノイズ化が重要となる. 近赤外光の光ビート信号の光/THz 変換 (フォトミキシング) を用いることにより, 近赤外光と同等の位相ノイズを有する THz 波の発生が可能である. さらに, マイクロ光コムの内部光ビート (コムモード間隔 f_{rep}) を用いると, 電気的な THz 波発生手法よりも良好な低位相ノイズ特性を得られるため THz 通信に向けた有望な手法である[1]. これまで, 我々のグループではマイクロ光コムの光/THz 変換に基づいて THz 発生させ, 560 GHz 帯の THz 波を発生し, オン・オフキーイング (OOK) 変調による通信に成功している[2, 3]. そこで, 本研究では従来の変調方式を OOK から Binary Phase Shift Keying (BPSK) に変更し, マイクロ光コムの光/THz 変換を用いた THz 無線通信の検討を行った. BPSK は振幅変調方式に比べ, ノイズ耐性が強く, ビットエラーレートを低く抑えられる利点がある. 今回は LiNbO_3 (LN) 強度変調器を用いて近赤外光を位相変調し, 光/THz 変換による発生と二乗検波による検出器を用いることで THz 無線通信を行う.

Fig. 1 に THz 発生の実験系を示す. 560 GHz のコムモード間隔を有するマイクロ光コムから, 1 組の隣接コムモードを光周波数フィルタにより抜き出す. 各光モード周波数に近い周波数で発振する 2 組の DFB レーザーを光コムに注入同期し, 光出力を増幅させる. 一方の注入同期レーザー光を LN 変調器により BPSK 変調し, もう一方の注入同期レーザー光と合波し, エルビウム添加ファイバー増幅器 (EDFA) により光増幅する. 増幅光を単一走行キャリアフォトダイオード (UTC-PD) に入射し, THz 波を発生する. 今回は, その予備検討として, 1 本のコムモードに注入同期した近赤外光を BPSK 変調し, 光検出器によって光強度の時間変化を確認した (Fig. 2). 光強度が瞬間的に落ちる V 字状の時間波形を確認し, BPSK で予想される波形と矛盾しない結果が得られた. 今後は THz 波における検出波形の検討を行う予定である.

本研究の一部は, 総務省の「電波資源拡大のための研究開発」(JPJ000254) のうち「無線・光相互変換による超周波帯大容量通信技術に関する研究開発」によって実施した成果を含む。

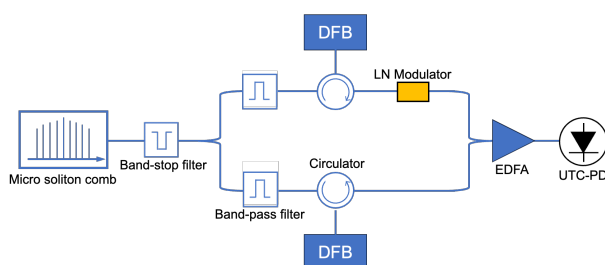


Fig.1. Experimental setup

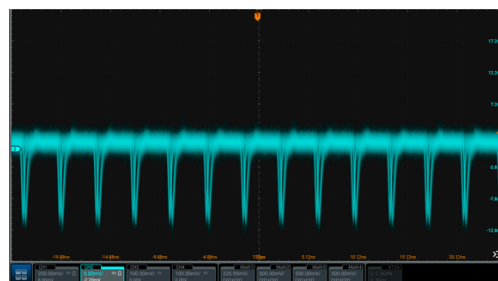


Fig. 2. Time variation of optical power

- [1] N. Kuse, et. al, Opt. Express 27, 3873-3883 (2019). [2] Y. Tokizane, et. al, Opt. Comm, 1267-1275 (2023). [3] 岡田他, 2021 年秋季応物学会, 13a-N105-11

変調深さ測定による光コムのモード次数決定

Determining the number of modes in an optical frequency comb by measuring the modulation depth

産総研 計量標準総合センター¹ °中島 悠来¹, 稲場 肇¹

NMIJ AIST¹, °Yuki Nakajima¹, Hajime Inaba¹

E-mail: nakajima-yuki@aist.go.jp

次世代の第6世代移動通信システム(6G)では 300 GHz 帯ミリ波の使用が検討されており、実用化のためには、5G でも既にそうであるように、協定世界時 UTC が比較・運用されている周波数 10 MHz に基づいてミリ波帯周波数を合成する必要がある。その有力な方法の一つとして、発振周波数がミリ波帯周波数だけ離れた2つの CW レーザーを光コムに位相同期し、その差周波としてミリ波帯周波数を取り出す手法が提案された[1]。そこでは CW レーザーと干渉している光コムのモード次数または次数差の決定が必要であり、高価な波長計を用いた補助測定が行われてきた[2]。

そこで本研究では、簡便かつ安価なモード次数差の決定法として変調深さの測定を利用した方法を試みる。図1に実験系を示す。まず繰り返し周波数 f_{rep} に変調深さ Δf_{rep} の周波数変調を加える。そして、光コムと2つのCWレーザーとのビート周波数を検出し、さらにそれらビートの差周波数を測定する。それぞれのレーザーと干渉しているコムモードの次数を N_1 , N_2 ($N_2 > N_1$)とすると、ビートの差周波数は変調深さ $(N_2 - N_1) \cdot \Delta f_{\text{rep}}$ で周波数変調する。よって、コムの繰り返し周波数に加わる変調深さ Δf_{rep} 、およびビートの差周波数の変調深さ $(N_2 - N_1) \cdot \Delta f_{\text{rep}}$ をそれぞれ測定することで、モード次数の決定が可能なのである。ここで変調深さの測定には Balling 法[3]を用いる。発表では、詳しい実験手順と結果について述べる。

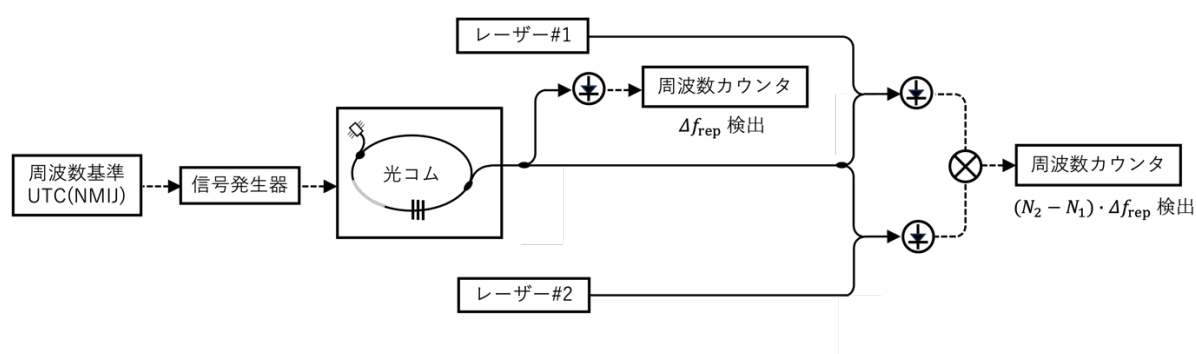


図1 変調深さの測定によるモード次数差決定の実験系

- [1] M. Musha *et al.*, Optics Communications, **240**, 201 (2004)
- [2] T. Yasui *et al.*, Optics Express, **19**, 4428 (2011)
- [3] P. Balling, Metrologia, **38**, 297 (2001)

THz-PMT/I.I. を用いた非線形干渉によるフーリエ分光計測

Fourier spectroscopy based on nonlinear interferometry by using a THz-PMT/I.I.

浜松ホトニクス株式会社¹, デンマーク工科大学²

○高橋 永斉¹, 河合 直弥¹, 勝山 広太¹, 南雲 健¹, Tobias O. Buchmann², Matej Sebek², Simon J. Lange², Peter U. Jepsen², 大村孝幸¹, 里園 浩¹

Hamamatsu Photonics K.K.¹, DTU Elektro, Technical University of Denmark²

○Hisanari Takahashi¹, Naoya Kawai¹, Kota Katsuyama¹, Ken Nagumo¹, Tobias O. Buchmann², Matej Sebek², Simon J. Lange², Peter U. Jepsen², Takayuki Omura¹, Hiroshi Satozono¹

E-mail: hisanari.takahashi@crl.hpk.co.jp

テラヘルツ(THz)波分光は物質同定などに活用できる有用なツールである。従来の時間領域分光法(THz-TDS)は、THz 波パルスの電界波形が得られるが複雑な系を必要とするため、簡便な手法が求められている。これまで我々は、真空管デバイス技術とメタサーフェスによるテラヘルツ波電界-電子変換 [1]を用いた THz-光電子増倍管 (PMT)/イメージインテンシファイア(I.I.)を開発してきた [2]。THz-PMT/I.I.と干渉系を組み合わせることで簡便に電界波形が得られ、THz-TDS と同様の THz 波分光が期待できる。Fig. 1 (a)に実験系を示す。2 mJ/pulse の再生増幅チタンサファイア fs レーザを ZnTe 結晶に入射して THz 波パルスが発生させ、Si ビームスプリッタと銀ミラーを用いて分割/合波し、一方の可動鏡を用いて干渉計測を試みた。まず THz-I.I.を用いて合波した THz 波パルスが空間的に重なっていること、および可動鏡に依存して THz 波ビームが明滅することを確認した。その後、THz-I.I.を THz-PMT に置き換え、干渉信号を評価した (Fig. 1 (b))。両方のアームを開放したときのみ可動鏡位置に依存した信号が得られており、THz 波パルス同士の干渉であると考えられる。特に干渉波形の信号は 3 桁以上変化しており、THz-PMT の非線形な応答を示している。干渉波形からフーリエ変換などの解析を経て 0.5, 0.8 THz にピークのある振幅スペクトル (Fig. 1 (c))を取得できており、これはダブルスプリットリング構造のメタサーフェスによる電界集中 [3]に依存した THz-PMT の応答関数を示唆している。当日は高速測定の実験結果やラクトースの分光計測についても議論する予定である。

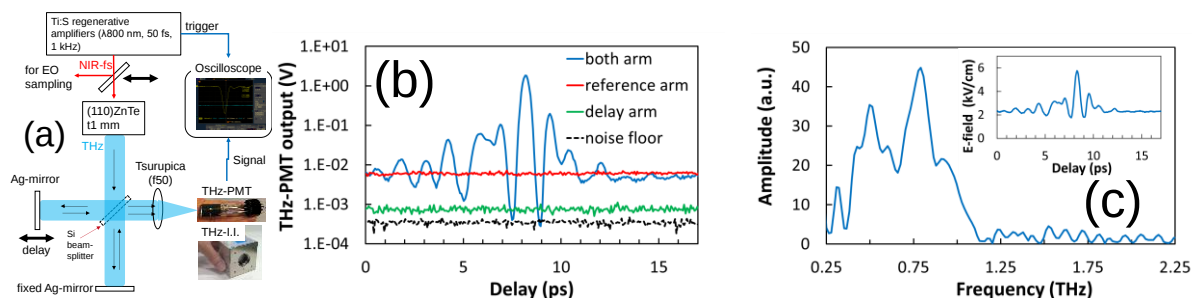


Fig. 1 (a): Experimental setup. (b): Obtained interferogram. (c): Amplitude spectrum (a response function of THz-PMT) calculation from a calibrated interferogram (inset). [1] Simon et al., J. Appl. Phys. **128**, 070901 (2020) [2] 河合他, 2022 春季応物 26p-E101-6J [3] Simon et al., APL Photon. **8**, 016105 (2023)

層状半導体 WSe₂ における THz 非線形励起コヒーレントフォノン

Terahertz nonlinear excitation of coherent phonons in layered semiconductor WSe₂

横国大院工¹, Caltech GPS², Caltech CCE³

○草場 哲^{1,2}, 林 瀬維³, 玉置 亮¹, 片山 郁文¹, G. A. Blake^{2,3}, 武田 淳¹

Dept. of Phys. Yokohama Natl. Univ¹, GPS Caltech², CCE Caltech³

°Satoshi Kusaba^{1,2}, Haw Wei Lin³, Ryo Tamaki¹, Ikufumi Katayama¹, G. A. Blake^{2,3}, Jun Takeda¹

E-mail: kusaba-satoshi-ys@ynu.ac.jp

層状半導体である遷移金属ダイカルコゲナイド (TMDs) は、光との強い相互作用を有し、またスピン-バレー結合といった性質から、新しい光電子デバイス材料の舞台として期待されている物質である。また格子振動 (フォノン) に着目すると、空間反転対称性の破れに伴うカイラルフォノン[1]や積層によるモアレフォノン[2]など、従来のバルク半導体では見られなかったフォノン物性が報告されており、注目を集めている。本物質群は 10 THz 近傍に複数の光学フォノンを有している。高強度なテラヘルツ光の照射下ではフォノンの共鳴的な強励起と、それに伴う格子・キャリアの非線形な相互作用が期待できる。しかし、本物質群ではもっぱら 1~数 THz 程度のテラヘルツ領域のキャリア応答が調べられており、テラヘルツパルス照射下におけるフォノン励起や格子-格子間、あるいは格子-キャリア間の非線形/非調和ダイナミクスは未だ解明されていない。

本研究では、TMDs の 1 種である WSe₂ において広帯域テラヘルツパルス照射下のフォノンダイナミクスを解明することを目的に、広帯域テラヘルツポンプ-光カー回転プローブ (TKE) 分光を行った。試料は機械剥離法によって得た free-standing なバルク WSe₂ を用いた。可視透過率測定から厚みは数百 nm と推定される。光源には Ti:Sapphire 再生増幅器を使用し、ポンプ光は OPA で 1300 nm へと波長変換した後、DSTMS 有機結晶へと照射して広帯域 (約 1~10 THz) な THz 光を発生させた。試料を透過したプローブ光はクロスニコル配置からわずかにずらした偏光子を用いて、偏光回転をヘテロダイン検出した。図 1 に測定結果を示す。電子応答由来と考えられる立ち上がりと減衰に加えて、光学フォノンモードに対応する 7~8 THz の振動成分が観測された (図 1 矢印)。テラヘルツ電場強度依存性の測定から、振動振幅の大きさはテラヘルツ電場強度の 2 乗に比例しており、テラヘルツ波の和周波励起 (2 光子吸収) [3]によってコヒーレント光学フォノンが励起されていることが明らかとなった。

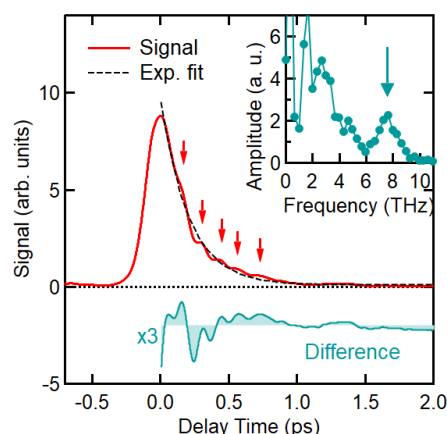


Fig. 1 Terahertz Kerr rotation waveform (red curve) and its oscillation component (blue curve) in bulk WSe₂. The frequency spectrum is shown in inset.

[1] H. Zhu *et al.*, Science 359, 579-582 (2018).

[2] Miao-Ling Lin *et al.*, ACS Nano 12, 8770-8780 (2018).

[3] Griffin Mead *et al.*, J. Phys. Chem. B 124, 8904-8908 (2020).

粉末試薬の高精度識別に向けたテラヘルツ分光器の開発

Development of terahertz spectrometer

for high-precision identification of powder reagents

名大院工¹, 清水 健太¹, 嶺 颯太¹, 川瀬 晃道¹, 村手 宏輔¹

Nagoya Univ.¹, °Shimizu Kenta¹, Sota Mine¹, Kodo Kawase¹, Kosuke Murate¹

E-mail: shimizu.kenta.c7@s.mail.nagoya-u.ac.jp

国内外において郵便による禁止薬物の流通が問題になっているが、非開披でそれらを識別する技術は確立されていない。近年、光注入型テラヘルツ(THz)波パラメトリック発生器(is-TPG)を用いた THz 分光システムのダイナミックレンジは 125dB に達しており[1]、機械学習と組み合わせることで比較的粒径の細かい試薬類であれば厚い遮蔽物越しでも高い識別精度を実証してきた[2]。しかし、禁止薬物の中には粒径が大きく、THz 波長と同程度の粒径を持つ試薬に対しては、散乱などの影響でスペクトルが乱れ、高い精度での識別が困難であるという課題があった。そこで本研究では、サンプルを透過する THz 波の光路に注目し、THz 波の結像位置で試薬を透過測定することにより、分光測定の実現性向上を目指した。

Fig. 1 に is-TPG の実験概略図を示す。サンプルを THz 波の集光位置または結像位置に設置し、透過した THz 波をテラヘルツ波パラメトリック検出[1]により近赤外光にアップコンバートし検出した。サンプルとして 212 μm 以上の粒径をもつグルコース粉末を用いた。

サンプルを THz 波の(a)集光位置、(b)結像位置に設置し、それぞれ異なる 5 点で測定を行った結果を Fig. 2 に示す。サンプルを THz 波の結像位置に設置することで、集光位置に設置した場合と比較し、ばらつきの少ないスペクトルが得られ、再現性の向上を確認した。is-TPG において、THz 波は各周波数で角度位相整合条件に従い異なる角度で射出される。したがって、THz 波の集光位置にサンプルを設置し分光測定を行うと、周波数変化に伴い THz 波がサンプルに照射される位置がわずかに変化する。一方で THz 波の結像位置であれば、どの周波数においても同じ位置に THz 波を照射することができる。また、結像位置での THz 波のビーム径は集光位置でのビーム径より大きく、散乱などの影響が平均化されるため測定の再現性向上に寄与すると考えられる。本システムにより、粉末試薬識別の高精度化が期待できる。

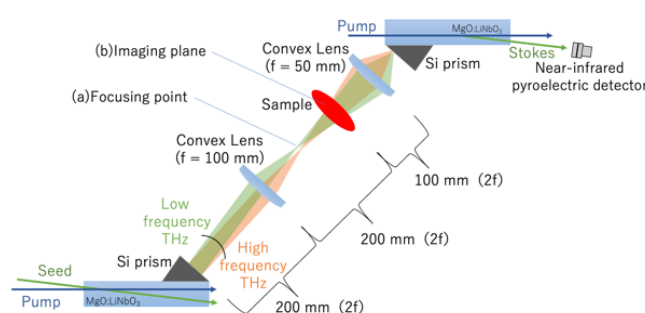


Fig.1 Experimental system of THz spectrometer

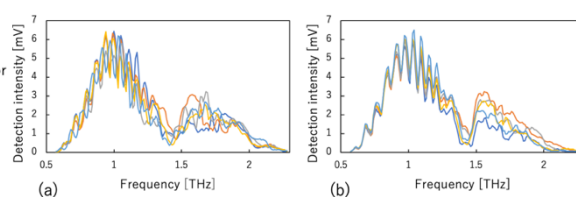


Fig.2 Spectra of glucose measured at 5 different points. (a) Sample placed at the THz wave focusing position; (b) Sample placed at the THz wave imaging plane.

謝辞：本研究は科研費 19H02627, 22H00212, JST 創発的研究支援事業 JPMJFR212J, 公益財団法人立松財団, 内藤科学技術振興財団の助成を受けたものです。

参考文献

[1] H.Sakai, K.Kawase, K.Murate, Opt. Lett. ,45 (2020) 3905-3908.

[2] K. Murate, H. Kanai, K. Kawase, IEEE Trans. Terahertz Sci. Technol. 11 (2021) 620-625

テラヘルツパラメトリック光源によるパルストレインテラヘルツ波発生

Pulse train terahertz wave generation from terahertz parametric source

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

広帯域波長可変かつコヒーレントな高出力テラヘルツ波光源として光注入型テラヘルツ波パラメトリック発生器(is-TPG)の開発が進められてきた [1-3]。is-TPGのテラヘルツ波出力は励起光エネルギーに依存し、高出力発生には高強度レーザーが必要とされる。しかし、入力できる励起光強度は、テラヘルツ波への波長変換に用いる非線形光学結晶のLiNbO₃の損傷閾値で制限される。そこで本研究では、マイクロチップレーザー出力を外部に設けたキャビティで複数パルスに分割、増幅を行う方式を考案し、励起光のパルストレイン化を行うことで結晶の損傷を回避し、テラヘルツ波の高平均パワー化を目指した。

実験系を図1に示す。励起光の光路中に増幅器を含むファブリペローキャビティを挿入し励起光をパルストレイン化した。このとき、過飽和吸収体であるCr:YAGを挿入することで、キャビティの自発的な発振を抑制している。パルストレインの各パルス間の間隔は、20 ns及び40 nsの2種類に設定した。これはキャビティ長3mと6mに相当する。パルストレイン励起光と外部共振器型半導体レーザー(ECLD)からの注入光を、角度位相整合条件を満たすようLiNbO₃結晶に入射することで、テラヘルツ波を発生し、焦電検出器で検出した。

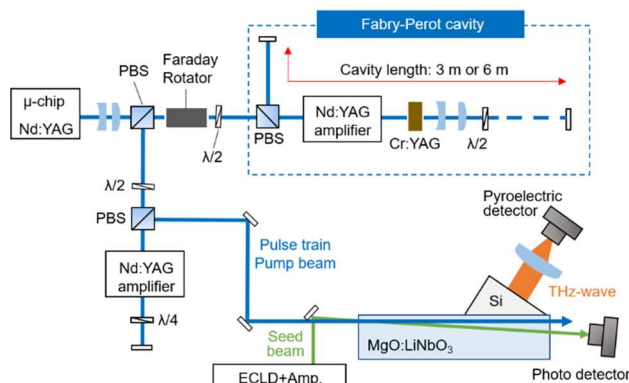


図1 パルストレイン励起光を用いた is-TPG の実験系

まずはパルストレイン励起光の確認を行った。キャビティの設定次第では、最大 50 パルスを超えるパルストレインを確認できたが、1 パルスあたりのエネルギーは小さくテラヘルツ波発生には不適であった。そこで、ここでは図 2(a)に示す 5 パルスにエネルギーを集中させたパルストレイン励起光によりテラヘルツ波発生を行った。テラヘルツ波の時間波形の観測が難しいため、対となって発生するストークス光の時間波形を観測した結果を図 2(b)に示す。パラメトリック波長変換はおおよそ 5 パルス目まで行われており、これは図 2(a)内にも示したテラヘルツ波発生閾値から考えたパルス数とも一致した。次にテラヘルツ波出力を測定した結果を図 2(c)に示す。パルストレインテラヘルツ波の全ての出力をまとめて測定した結果を赤菱形で示し、その出力を図 2(b)から予測したパルス数で割った 1 パルスあたりのテラヘルツ波出力(平均値)をオレンジ四角で示した。1 パルスあたりの出力は、青丸で示した通常の励起光を用いた際の出力と一致しており、パルス数に応じたテラヘルツ波出力向上が確認された。結晶の損傷を回避しつつ is-TPG の平均パワーを向上できる可能性を示すことができた。

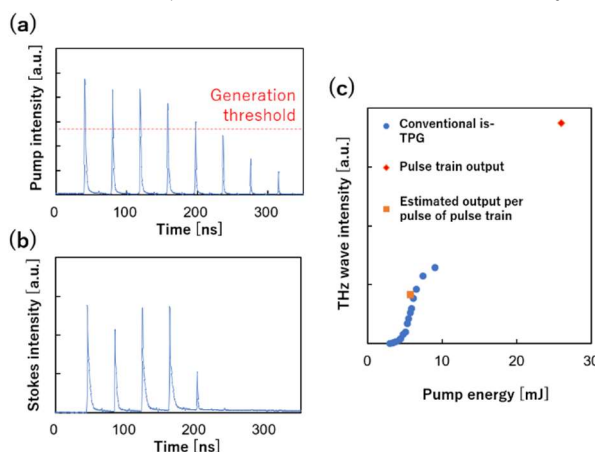


図2 (a)励起光時間波形 (b)ストークス光時間波形 (c)テラヘルツ波出力

謝辞

本研究を進めるにあたりご協力頂いたフラクシ株式会社、浦田佳治博士に感謝申し上げます。本研究は科研費19H02627、22H00212、JST 創発的研究支援事業 JPMJFR212J、公益財団法人立松財団、内藤科学技術振興財団の助成を受けたものです。

- 参考文献 [1] S. Mine, K. Kawase, and K. Murate, Opt. Lett., vol. 47, no. 5, pp. 1113–1116, 2022.
[2] S. Mine, K. Kawase, and K. Murate, IEEE Trans. Terahertz Sci. Technol., vol. 13, no. 2, pp. 153–157, 2023.
[3] K. Murate, and K. Kawase, J. Appl. Phys., vol. 124, no. 16, p. 160901, 2018.

サブナノ秒パルスを用いた端面反射位相整合による テラヘルツパラメトリック発生

Terahertz parametric generation by edge reflection phase matching using sub-nanosecond pulse

名大院工¹, 山本 直弥¹, 嶺 颯太¹, 川瀬 晃道¹, 村手 宏輔¹

Nagoya Univ.¹, [°]Naoya Yamamoto¹, Sota Mine¹, Kodo Kawase¹, Kosuke Murate¹

E-mail: yamamoto.naoya.c6@s.mail.nagoya-u.ac.jp

我々が長年研究している光注入型テラヘルツ (THz) 波パラメトリック発生器 (is-TPG : injection-seeded THz-wave parametric generator) は、高いピークパワー (~ 100 kW)、広い波長可変性 (0.4~5 THz)、フーリエ限界の線幅を有し、有力な THz 波単色光源として期待されている [1]。is-TPG ではノンコリニア位相整合条件を利用しており、励起光と注入光を位相整合角で非線形光学結晶に入射することで THz 波が発生する。一方、励起光と注入光を同軸入射し、結晶端面で反射させることでノンコリニア位相整合条件を満たす端面反射位相整合方式 [2]は、アクロマティック光学系などの注入光角度調整機構が不要なため、is-TPG の小型化に向けて期待される。そこで本研究では、端面反射位相整合方式の is-TPG にサブナノ秒励起光を導入することで、実用レベルの高出力化を目指した。

Fig. 1 に端面反射位相整合方式の is-TPG の実験概略図を示す。 μ -chip: Nd YAG レーザーから出力されたパルス幅 500 ps の励起光と高強度注入光を同軸で LiNbO₃ に入射した。その後、励起光および高強度注入光が結晶 y 面で全反射することで、反射した高強度注入光と反射していない励起光がノンコリニア位相整合を満たす。パラメトリック波長変換により結晶端面近傍で強く発生した THz 波を、Si プリズムカプラで自由空間に取り出し、焦電検出器で測定した。

結晶の角度を 1.5 THz 発生時に最適化し、高強度注入光の波長のみチューニングした際の周波数可変性を Fig. 2 に示す。高強度注入光を用いているため、位相整合条件を厳密には満たしていない 1.5 THz 以外の周波数でも THz 波は発生し、1.5 THz をピークとして、1.1- 2.1 THz の周波数可変性が得られた。ここで、周波数可変性は高強度注入光の波長可変性により制限されている。

最適化された 1.5 THz では、過去のナノ秒パルスを用いた報告 [3]に比べ、100 倍以上の高出力化に成功した。これは、サブナノ秒の励起光を用いたことで誘導ブリリュアン散乱が抑制され、パラメトリックゲインが増大したからと考えられる [3]。また、周波数ごとに結晶角度を位相整合条件を満たすように調整すれば、広帯域に渡る高出力化が期待される。

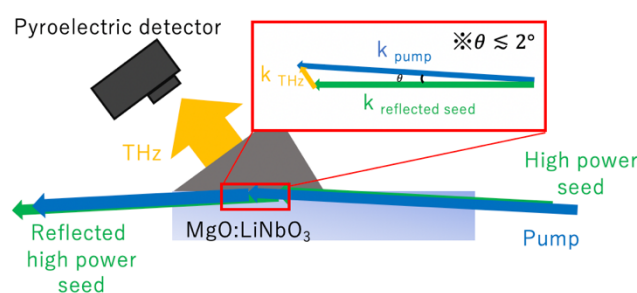


Fig.1 Experimental setup of is-TPG with a reflected seed beam.

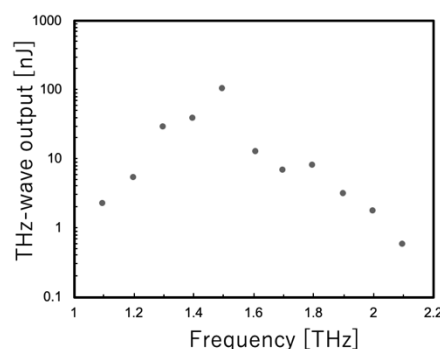


Fig. 2 Tunability of is-TPG with a reflected seed beam.

謝辞

本研究は JSPS 科研費 22H00212, 19H02627, 22J20963、科学技術振興機構(JST) FOREST プログラム (JPMJFR212J)の助成を受けたものです。

参考文献

- [1] K. Murate et. al., J. Appl. Phys., vol. 124, p. 160901 (2018)
- [2] T. Akiba et. al., Appl. Opt., vol. 52, pp.8305-8309 (2013)
- [3] K. Nawata et. al., IEEE Trans. Terahertz Sci. Technol., vol. 7, pp. 617-620 (2017)

電気光学ポリマーへの印加電界方向とシュタルクシフトの関係性 ～シュタルク効果を利用した超高速電界検出へ向けて～

Relationship between the direction of the electric field applied to electro-optic polymer and the Stark shift

: Toward the ultrafast electric field detection utilizing the Stark effect of electro-optic polymer

情報通信研究機構¹ ○山田 俊樹¹, 梶 貴博¹, 大友 明¹

NICT¹, °Toshiki Yamada¹, Takahiro Kaji¹, Akira Otomo¹,

E-mail: toshiki@nict.go.jp

共鳴非線形光学効果の一種であるシュタルク効果は、非共鳴非線形光学効果である電気光学効果と対照的であり、両方とも 2 次の非線形光学効果である。シュタルク効果は複素屈折率の虚部である消衰係数の変化($\Delta\kappa$)に関係し、電気光学効果は複素屈折率の実部の変化(Δn)に関係する。我々は、これまで、電気光学(EO)ポリマーのシュタルク効果を利用したテラヘルツ(THz)波検出方法を開発し、ギャップのない広帯域な THz 波検出が可能であることを報告してきた[1]。THz 電場波形の検出では、電場の実時間波形とそのフーリエ変換スペクトルを得ることが重要であり、検出の際に EO ポリマーに印加されている THz 電場の方向については、あまり留意する必要がなかった。一方、EO ポリマーのシュタルク効果を利用して、超高速電界センサーとして用いる場合には、EO ポリマーに印加される電界の方向とシュタルクシフトの関係性を明らかにしておくことは、応用上とても重要である。

本研究では EO ポリマーに DC 電界を印加して、吸収スペクトルにおけるシュタルクシフトと電界の印加方向との関係性を明らかにするための実験を行った。更に、EO 色素の密度汎関数法計算からも、その関係性を明らかにした (図 1)。

EO ポリマーのシュタルク効果を利用した超高速電界計測の応用として、高強度レーザー科学研究、例えば、高強度フェムト秒レーザーを用いた核融合燃焼履歴研究への応用がある。レーザー核融合燃焼の過程で放出される電子線、X 線、 γ 線、中性子線等に起因するピコ秒の超高速電界変化をプローブすることが重要となっている[2]。

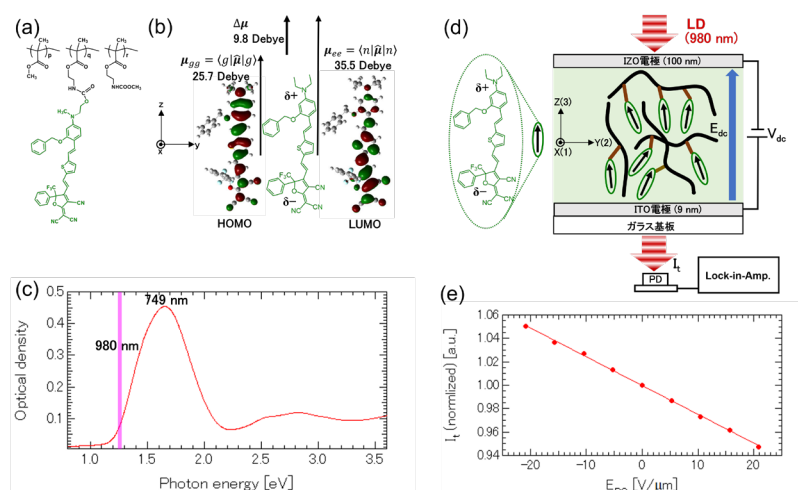


図1 (a)EOポリマーの化学構造, (b) EO色素のDFT計算結果, (c) EOポリマーの吸収スペクトル, (d)EOポリマーへDC電界印加下での透過光強度変化検出の概要図, (e) 透過光強度のEOポリマーへのDC電界依存性

参考文献: [1] T. Yamada et al, J. J. Appl. Phys., Vol.58, pp.040901-1-7, 2019.; [2] 浅野他、レーザー学会学術講演会第 42 回年次大会、E03-12p-V-02 (2022).

空気中金属表面を利用した電場誘起第二高調波発生に基づく 広帯域テラヘルツパルスのギャップレス検出

Gapless detection of a broadband terahertz pulse using a metal surface in air
based on field-induced second-harmonic generation

東大物性研¹, 筑波大学², マックスプランク研究所³ ○田中 駿介¹, 室谷 悠太¹,
佐藤 駿丞^{2,3}, 藤本 知宏¹, 松田 拓也¹, 神田 夏輝¹, 松永 隆佑¹, 吉信 淳¹

The Institute for Solid State Physics, The Univ. of Tokyo¹, University of Tsukuba²,
Max Planck Institute³ ○Shunsuke Tanaka¹, Yuta Murotani¹, Shunsuke A. Sato^{2,3}, Tomohiro
Fujimoto¹, Takuya Matsuda¹, Natsuki Kanda¹, Ryusuke Matsunaga¹, and Jun Yoshinobu¹

E-mail: shunsuke.tanaka@issp.u-tokyo.ac.jp

私たちは、テラヘルツ (THz) パルスが照射された大気中 Pt 表面から発生する第二高調波発生 (SHG) 光強度を調べた[1]。Ti:sapphire レーザー (Solstice Ace: 7 W, 45 fs, 1 kHz) の出力を二つに分け、一方は二色レーザー誘起空気プラズマによる THz パルス発生[2]に用い、もう一方は SHG 光の基本波光として用いた。THz パルスを近赤外パルスと同軸、*p* 偏光で Pt 表面に集光し、Pt 表面を反射した光をバンドパスフィルターを通すことで、SHG 光を光電子増倍管で測定した。THz パルスを 500 Hz に変調して、光電子増倍管からの信号をロックイン検出することで、THz パルスによる SHG 光強度変調 $\Delta I_{2\omega}$ を得た。

図 1(a) は電気光学 (EO) サンプリング法によって評価した THz 電場波形である。この THz パルスを用いて測定した $\Delta I_{2\omega}$ の時間波形が図 1(b) である。それぞれの時間波形をフーリエ変換することによって得た周波数スペクトルが図 1(c) である。EO サンプリング法によって評価した周波数スペクトル (赤線) は、周波数成分が 7 THz 以下に制限されている。これは EO サンプリングに用いた GaP 結晶のフォノン吸収や結晶内でのパルス位相整合条件の影響である。これに対し、 $\Delta I_{2\omega}$ から得た周波数スペクトル (青線) はおよそ 20 THz までギャップなく周波数成分を評価できている。この広帯域 THz パルスのギャップレス検出は、Pt 表面だけでなく金ミラーでも可能であることが確認できた。私たちは、大気中金属表面を利用し、バイアス電圧を必要としない新しい THz パルス検出を air-metal coherent detection (AMCD) と名付けた[1]。

金属内部への THz パルスの透過係数が極めて小さいことから、 $\Delta I_{2\omega}$ の結果は空気分子からの THz 電場誘起第二高調波 (TFISH) 光と金属表面からの第二高調波発生 (SHG) 光の干渉に由来することを提案した。講演では、LiNbO₃ 結晶から発生させた THz パルスを用いた AMCD 測定結果と、波動方程式に基づいた $\Delta I_{2\omega}$ シミュレーション結果を合わせて、AMCD について紹介する。

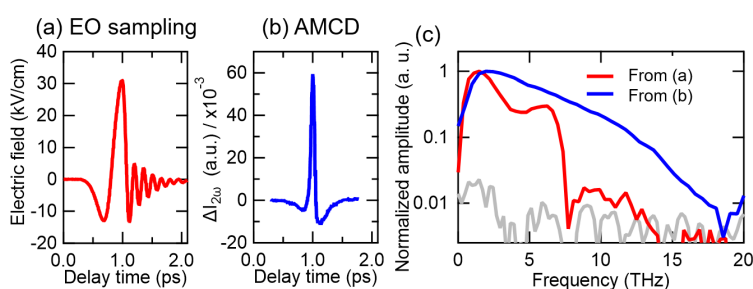


Fig. 1 (a) The THz waveform measured by EO sampling with a GaP crystal. (b) The time profile of $\Delta I_{2\omega}$ using the THz pulse of (a). (c) The red and blue lines correspond to the amplitude spectra obtained from the time traces of (a) and (b), respectively. The gray line shows a noise floor measured for (b) without THz pulses.

- [1] S. Tanaka *et al.*, Applied Physics Letters (doi:10.1063/5.0153667). selected as a featured article.
[2] J. Dai *et al.*, Physical Review Letters **103**, 023001 (2009).