

令和 5 年 6 月 19 日現在

機関番号：14401

研究種目：国際共同研究加速基金（国際共同研究強化(B））

研究期間：2018～2022

課題番号：18KK0140

研究課題名（和文）低次元ナノ材料における局所場光テラヘルツ波変換の科学

研究課題名（英文）Science of local optical-to-terahertz wave conversion in low dimensional nanomaterials

研究代表者

斗内 政吉（Tonouchi, Masayoshi）

大阪大学・レーザー科学研究所・教授

研究者番号：40207593

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,800,000円

研究成果の概要（和文）：半導体カーボンナノチューブ（CNT）を用いて光スイッチを開発し、そのフェムト秒レーザー励起によるテラヘルツ波の観測に成功し、非平衡数値シミュレーションを組み合わせ、その特性からエキシトンの乖離ダイナミクスを解明し、CNT配列の程度が励起された準粒子ダイナミクスに大きく寄与し、その熱化経路の迂回などを明らかにした。また、GaInN/GaN多層量子井戸構造やビスマステルル/テルルヘテロ接合などにおけるテラヘルツ放射分光により複雑な超高速ダイナミクスを観測解明した。その他、酸化ガリウムの表面ナノ領域の光電荷の異方的光物性も明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

カーボンナノチューブ（CNT）など低次元ナノ材料の物性は、その構造に由来する特異な素励起に起因する電気・光学的特性を有しており、これらを活用した新規な機能を持つ次世代デバイスの基礎研究に向けて、光励起電荷ダイナミクスの解明は不可欠である。しかし、従来のフォトルミネッセンスなどでは、光励起の初期過程におけるキャリア・励起子の発生・走行・解離プロセスなどサブピコ秒レベルの高速な電荷走行現象を捉えることは困難であった。本研究では、高速電荷ダイナミクスをテラヘルツ波放射分光により解明することで、テラヘルツ放射科学を世界に展開する波及効果をもたらし、ナノデバイス開発に新たな道を提供するものとなった。

研究成果の概要（英文）：We have developed an optical switch using semiconducting carbon nanotubes (CNTs), successfully observed terahertz waves with their femtosecond laser excitation, and combined it with non-equilibrium numerical simulations to elucidate the exciton divergence dynamics from its properties, and the extent of the CNT arrangement makes a significant contribution to the excited quasiparticle dynamics, such as the bypassing of its thermalization pathway, was clarified. We also observed and elucidated complex ultrafast dynamics in GaInN/GaN multilayer quantum well structures and bismuth telluride/telluride heterojunctions by terahertz emission spectroscopy. In addition, anisotropic photophysical properties of photo-charges in the surface nano-region of gallium oxide were also clarified.

研究分野：テラヘルツ波工学

キーワード：テラヘルツ波 ナノカーボン フェムト秒パルスレーザー 励起子

1. 研究開始当初の背景

カーボンナノチューブ(CNT)やグラフェン、低次元ナノ材料の物性は、その構造に由来する強結合・荷電励起子、バレー・スピン偏極電子などが重要な役割を担っていることが明らかになってきた。そのため、これら特異な素励起に起因する電氣的・光学的特性の解明や、これらを活用した新規な機能を持つ次世代デバイスの基礎研究が精力的に行われている。例えば、一次元系である半導体CNTでは、クーロン遮蔽効果が弱いために、電子と正孔が対状態にある励起子が室温においても非常に安定であることが知られており、励起子相互作用が本質的にその電氣的および光学的特性を支配している。そのため、CNT励起子ダイナミクスは基礎的にも応用的にも非常に重要な問題である。そのような低次元系半導体におけるエキゾチックな素励起は、従来は主にフォトルミネッセンス(PL)やエレクトロルミネッセンス(EL)、および電気測定などによって行われてきた。しかしながら、PLやELは再結合時の発光をモニターするため、光励起の初期過程におけるキャリア・励起子の発生および走行・解離プロセスのダイナミックな観測は困難である。また、電気測定ではサブピコ秒レベルの高速な現象を捉えることは出来ない。

2. 研究の目的

本件研究の目的は、半導体低次元ナノ構造に起因する特異な励起子やバレー自由度を持つキャリアなどの素励起を媒介とした、局所場超短パルス光・テラヘルツ波変換機構などを明らかにし、その知見を基に新規な光・テラヘルツ機能の開拓を行うことである。その過程において、テラヘルツ波放射顕微鏡(LTEM)の実力を世界に示し、申請者グループから、世界を巻き込む幅広い研究へとテラヘルツ放射科学を展開することを旨とする。

3. 研究の方法

フェムト秒レーザーを物質に照射することで、放射されるテラヘルツ電磁波を用いて、励起された電荷の時空間での移動を科学する。まず、光励起後の複雑な電荷の振舞いを、テラヘルツ波が放射されるピコ秒程度にフォーカスした単純化モデルを構築し、実験的による観測データの物理的解釈を容易にし、議論の対象を明らかにする。実際のナノ材料として、カーボンナノチューブ(CNT)に注目し、光励起による電荷の振舞いを明らかにし、整列したCNTネットワークとランダムなCNTを比較することで、光・テラヘルツ波変換機構を明らかにし、デバイス応用の可能性を示す。また、ワイドギャップ半導体の光応答をLTEMで観測することで、ナノ領域の光電荷物性を明らかにする。その他、新規材料への適用を進めることで、上記目的を達成する。

4. 研究成果

4-1. 汎用的アプローチ

十分な励起エネルギーを有するフェムト秒光励起により、自由電荷が励起され、その電荷移動に伴いテラヘルツ電磁波されることは、古くから知られ、様々な研究がなされてきた。しかしながら、その電荷ダイナミクスは極めて複雑で、モンテカルロシミュレーションなどを用いても一般化の議論は困難であった。本研究では、まず、大胆に単純化したモデルを提案した[1]。その後、多くの場合が、その定式化モデルにより、様々な物性値を抽出できることが示されている。その他、物証評価のためのエアープラズマテラヘルツ光源の改良に貢献する理論も提案し[2]、波及効果のある汎用的基盤理論に成果を上げた。

[1] M.Tonouchi, "Simplified formulas for the generation of terahertz waves from semiconductor surfaces excited with a femtosecond laser", *Journal of Applied Physics* 127 (24), 245703(2020).

[2] G. Chen et al., "Observation of the Terahertz Pulse Shaping Due to Intensity-Induced Additional Phase in Two-Color Filaments", *Sci Rep* 11, 498 (2021).

4-2. 半導体ナノチューブ(CNT)

半導体ナノチューブからのテラヘルツ波放射を観測し、テラヘルツ波放射強度および同時に流れる光電流の励起レーザー強度依存性を測定から、非線形な応答を見出し、超高速光電流応答が、エキシトンの励起・乖離過程に起因することを突き止めた[3]。

また、整列したCNTネットワークとランダムなCNTネットワークにおける強電場下での準粒子のダイナミクスを比較し、テラヘルツ発光と光電流の実験と非平衡数値シミュレーションを組み合わせて、配列の程度が励起された準粒子のダイナミクスに強く影響し、熱化経路を迂回させることを発見した。図1に示すように、高エネルギー・高運動量の電子集団が、拡散的から超拡散的に発展する輸送領域が存在することを明らかにした[4]。

[3]"Terahertz Excitonics in Carbon Nanotubes: Exciton Autoionization and Multiplication," *Nano Lett.* 2020, 20, 3098–3105.

[4]"Transition from Diffusive to Superdiffusive Transport in Carbon Nanotube Networks via Nematic Order Control," *Nano Letters* 2023 23 (10), 4448-4455.

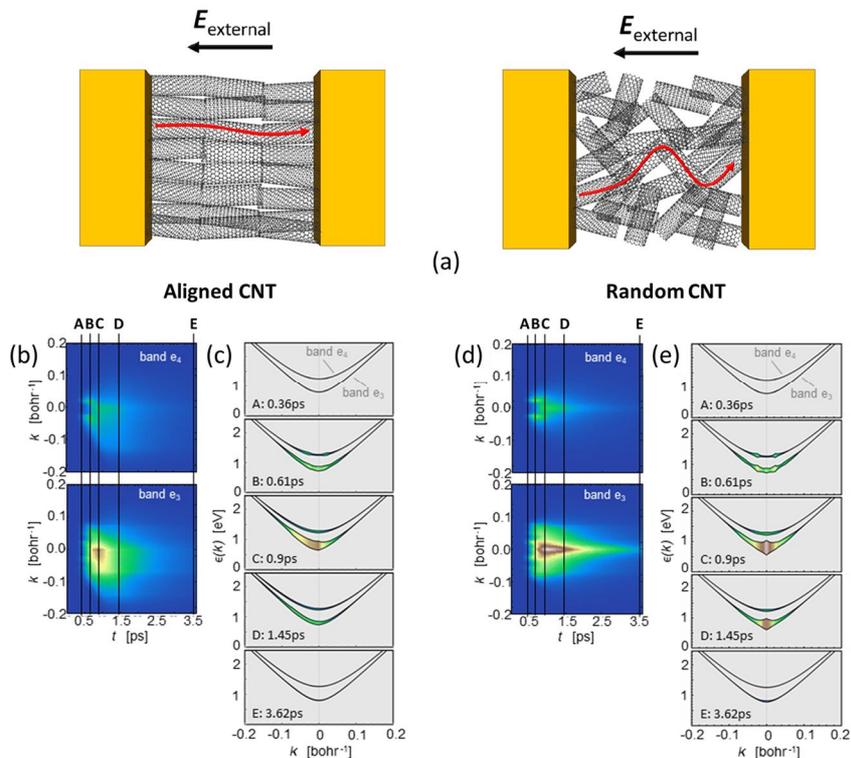


図 1 (a)高電界下における整列した CNT とランダム CNT 中に流れる光電流。(b)と (d): 異なる時間スケールでの対応する電子バンドのバンド分解密度プロットおよび (c)と (e): ポピュレーションの時間スナップショット。[4]

4-3 . ワイドバンドギャップ半導体ナノ表面の光科学

ワイドバンドギャップ半導体は、従来の半導体に比べて、表面近傍ナノ領域において強い表面電界を有している。その表面における高速光電荷ダイナミクスの解明は、デバイス性能を左右する物性を露にするもので、極めて重要である。本研究では、そのようはナノ領域光物性を、テラヘルツ波放射分光イメージング (LTEM) により科学した。

β -Ga₂O₃は、異方的電荷ダイナミクスなど重要な物性が未解明である。本研究では、表面での瞬時の電荷の流れなどを LTEM により明らかにし、欠陥を介したフォトルミネッセンスと直接のバンド間励起によるテラヘルツ放射の相関を明らかにした[5]。

また、ナノ材料として、GaInN/GaN 多層量子井戸構造の光に対する複雑な応答を観測した。InGa_xN_{1-x}/GaN 多重量子井戸構造内に光電荷を生成すると、1) 内部電界が遮蔽される時、2) 歪が緩和されるときに音響フォノンが生成され格子振動の衝撃波となって、表面に到達した時、3) 多重量子井戸がナノキャパシターの役割を果たして、井戸内で電荷が振動する時にテラヘルツ電磁波が励起され、それらを観測することで、複雑な超高速ダイナミクスの同時観測に成功した[6]。また、音響フォノンテラヘルツ放射を観測することで、ナノメートル精度での厚さ測定が可能であることも実証した[6]。

[5] H. Jiang et al., "Terahertz Emission Spectroscopy and Microscopy on Ultrawide Bandgap Semiconductor β -Ga₂O₃", Photonics 2020, 7(3), 73.

[6] A. Mannan, et al., "Ultrafast Terahertz Nanoseismology of GaInN/GaN Multiple Quantum Wells", Advanced Optical Materials 9 (15), 2100258(2021).

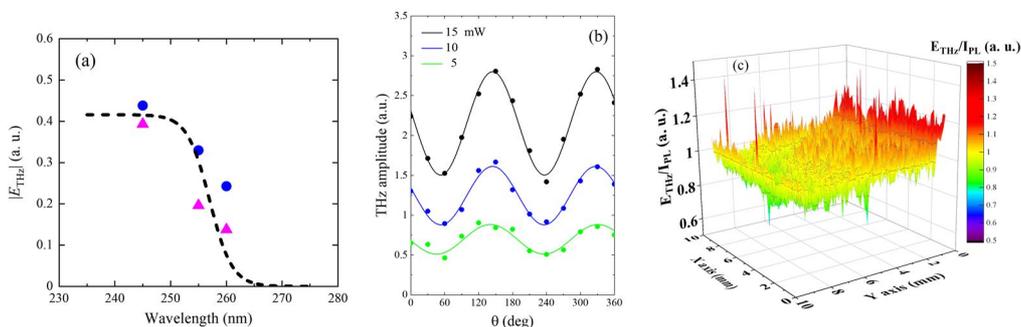


図 2 (a) 各波長におけるテラヘルツ波発光強度。破線は計算によるフィット。(b)は、異なるポンプパワーでの、入射角度依存性。[102]方向と平行な方向からスタート。励起波長は 245nm で測定。(c)は LTEM 振幅を PL 強度で割った分布。[5]

4-4 . その他ナノ材料評価への応用

ビスマステルル (Bi_2Te_3) は注目を集めるトポロジ絶縁体の一つであるが、そのヘテロ接合や光電荷の振舞いは、未だ未解明な部分が多い。本研究では、ビスマステルル(系ヘテロ構造の例として、 $\text{Bi}_2\text{Te}_3/\text{Te}$ を対象として、そのヘテロ界面で光電荷がどのように振舞うのかをLTEMを用いて調べた[7]。図3にLTEM波形とLTEM像を示す。A,B地点で振幅符号が変化していることから、これらの地点ではキャリアの移動方向が逆であることがわかる。LTEM画像中の矢印は、光電流の面内成分の方向を示す。界面では E_{\perp} が強く、Te領域では E_{\parallel} が強いTHz 発光が見られる。これらの結果から、界面におけるテラヘルツ波放射電界は、界面に対して垂直に偏光していることを見出した。この波形の極性から、 Bi_2Te_3 領域とTe領域の間に p-n 接合を形成している。また、Te領域では、界面に平行に偏った電界を持つ強いTHz 発光が観測された。このユニークなTHz 発光は、電子と正孔の有効質量を考慮することで、ホットフォトキャリアの異方性輸送によって説明した。本研究において、微細構造中の局所的なキャリアダイナミクスが明らかになり、ポテンシャル分布や異方性輸送特性が明らかになった。これらの知見は、共晶系ヘテロ構造の新機能材料としての探求に貢献し、最先端の熱電・光起電力デバイスに新たな道を提供するものである。

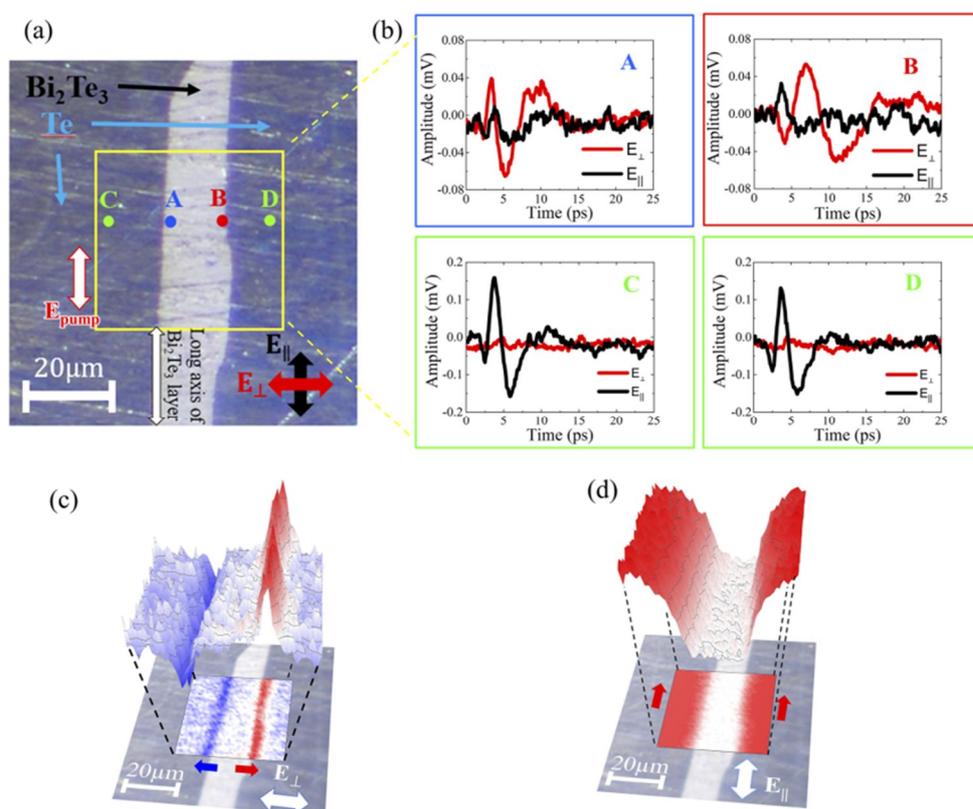


図3 Bi_2Te_3 -Te ヘテロ構造における Bi_2Te_3 相と Te 相で放出される THz 波形。(a) 実験に使用した領域の光学顕微鏡画像。LTEM 実験は、黄色の四角い領域で行われた。(b) 電界を垂直 (E_{\perp}) と平行 (E_{\parallel}) としたときの LTEM 波形。 Bi_2Te_3 層は A 点と B 点、Te 領域は C 点と D 点。(c) E_{\perp} 、(d) E_{\parallel} の放射電界 LTEM 像。光学顕微鏡画像との重ね合わせる。[7]

その他、金ナノアイランドのフェムト秒レーザーに対するプラズモニック応用を明らかにすることで、テラヘルツ波検出器の応答を改善する[8]など、様々な応用展開を図っている。そのような取り組みが世界的に認められ、テラヘルツ科学技術論文 “The 2023 terahertz science and technology roadmap” において、初めて “テラヘルツ放射分光とイメージング” が重要技術として、独立した章に採用された[9]。

[7] F. Murakami, et al., “Probing photocarrier dynamics in a Bi_2Te_3 -Te eutectic p-n junction with a laser terahertz emission microscope”, APL Mater. 11, 031102 (2023).

[8] H. Murakami, et al., “Low-temperature GaAs-based plasmonic photoconductive terahertz detector with Au nano-islands”, Photonics Research 8 (9), 1448-1456(2020).

[9] M.Tonouchi, T S. Seifert, P. Klarskov, “11. Terahertz emission spectroscopy and imaging” in “The 2023 terahertz science and technology roadmap”, A. Leitenstorfer et al., J. Phys. D: Appl. Phys. 56 223001(2023).

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計11件（うち査読付論文 11件 / うち国際共著 5件 / うちオープンアクセス 8件）

1. 著者名 Mannan Abdul, Bagsican Filchito Renee G., Yamahara Kota, Kawayama Iwao, Murakami Hironaru, Bremers Heiko, Rossow Uwe, Hangleiter Andreas, Turchinovich Dmitry, Tonouchi Masayoshi	4. 巻 9
2. 論文標題 Ultrafast Terahertz Nanoseismology of GaInN/GaN Multiple Quantum Wells	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Advanced Optical Materials	6. 最初と最後の頁 202100258
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/adom.202100258	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する
1. 著者名 Tonouchi Masayoshi	4. 巻 127
2. 論文標題 Simplified formulas for the generation of terahertz waves from semiconductor surfaces excited with a femtosecond laser	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 245703 ~ 245703
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/5.0005623	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Jiang Hao, Gong Chen, Nishimura Tatsuhiko, Murakami Hironaru, Kawayama Iwao, Nakanishi Hidetoshi, Tonouchi Masayoshi	4. 巻 7
2. 論文標題 Terahertz Emission Spectroscopy and Microscopy on Ultrawide Bandgap Semiconductor -Ga203	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Photonics	6. 最初と最後の頁 73 ~ 73
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/photonics7030073	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 Murakami Hironaru, Takarada Tomoya, Tonouchi Masayoshi	4. 巻 8
2. 論文標題 Low-temperature GaAs-based plasmonic photoconductive terahertz detector with Au nano-islands	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Photonics Research	6. 最初と最後の頁 1448 ~ 1448
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1364/PRJ.395517	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Bagsican Filchito Renee G., Wais Michael, Komatsu Natsumi, Gao Weilu, Weber Lincoln W., Serita Kazunori, Murakami Hironaru, Held Karsten, Hegmann Frank A., Tonouchi Masayoshi, Kono Junichiro, Kawayama Iwao, Battiato Marco	4. 巻 20
2. 論文標題 Terahertz Excitonics in Carbon Nanotubes: Exciton Autoionization and Multiplication	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Nano Letters	6. 最初と最後の頁 3098 ~ 3105
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acs.nanolett.9b05082	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Mannan Abdul, Yamahara Kota, Bagsican Filchito Renee G., Serita Kazunori, Murakami Hironaru, Kawayama Iwao, Higashiwaki Masataka, Tonouchi Masayoshi	4. 巻 129
2. 論文標題 Terahertz emission spectroscopy of GaN-based heterostructures	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 245702 ~ 245702
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/5.0047402	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Gong Chen, Teramoto Takahiro, Tonouchi Masayoshi	4. 巻 42
2. 論文標題 Observation of the Terahertz Pulse Shaping Due to Intensity-Induced Additional Phase in Two-Color Filaments	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves	6. 最初と最後の頁 647 ~ 655
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s10762-021-00797-4	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Jiang Hao, Wang Ke, Murakami Hironaru, Tonouchi Masayoshi	4. 巻 9
2. 論文標題 Non-Drude-Type Response of Photocarriers in Fe-Doped α -Ga ₂ O ₃ Crystal	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Photonics	6. 最初と最後の頁 233 ~ 233
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/photonics9040233	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Murakami Fumikazu, Serita Kazunori, Kawayama Iwao, Murakami Hironaru, Bandopadhyay Kingshuk, Materna Andrzej, Urbas Augustine M., Pawlak Dorota A., Tonouchi Masayoshi	4. 巻 11
2. 論文標題 Probing photocarrier dynamics in a Bi2Te3-Te eutectic p-n junction with a laser terahertz emission microscope	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 APL Materials	6. 最初と最後の頁 031102 ~ 031102
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/5.0137862	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Wais Michael, Bagsican Filchito Renee G., Komatsu Natsumi, Gao Weilu, Serita Kazunori, Murakami Hironaru, Held Karsten, Kawayama Iwao, Kono Junichiro, Battiato Marco, Tonouchi Masayoshi	4. 巻 23
2. 論文標題 Transition from Diffusive to Superdiffusive Transport in Carbon Nanotube Networks via Nematic Order Control	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Nano Letters	6. 最初と最後の頁 4448 ~ 4455
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acs.nanolett.3c00765	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Leitenstorfer Alfred, et al.	4. 巻 56
2. 論文標題 The 2023 terahertz science and technology roadmap	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Journal of Physics D: Applied Physics	6. 最初と最後の頁 223001 ~ 223001
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1361-6463/acbe4c	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

〔学会発表〕 計40件 (うち招待講演 19件 / うち国際学会 31件)

1. 発表者名 Masayoshi Tonouchi
2. 発表標題 Emission Spectroscopy of Wide Gap Semiconductors
3. 学会等名 The 2021 Spring Meeting of the European Materials Research Society , VIRTUAL Conference (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Masayoshi Tonouchi
2. 発表標題 Laser Terahertz Emission Microscope as a Killer Tool
3. 学会等名 The International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves 2021 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Wang Ke, Jiang Hao, Gong Chen, Murakami Fumikazu, Serita Kazunori, Murakami Hironaru, Tonouchi Masayoshi
2. 発表標題 Effect Of CW Laser Illumination On Fe-doped -Ga203
3. 学会等名 The International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves 2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 H. Murakami, M. Tonouchi, K. Konishi, K. Ota
2. 発表標題 Effect Of CW Laser Illumination On Fe-doped -Ga203
3. 学会等名 The International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves 2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Mannan, F. Murakami, K. Serita, H. Murakami, M. Tonouchi
2. 発表標題 Visualization of phase array effect in a terahertz radiation pattern from the semiconductor surface in free space
3. 学会等名 JSAP-OSA Joint Symposia 2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Dongxun Yang, Masayoshi Tonouchi
2. 発表標題 Terahertz (THz) radiation mechanism from a metal-insulator-semiconductor structure upon femtosecond laser illumination
3. 学会等名 JSAP-OSA Joint Symposia 2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Ke Wang, Hao Jiang, Hironaru Murakami, and Masayoshi Tonouchi
2. 発表標題 Temperature dependence of anisotropic terahertz conductivity of unintentionally doped α -gallium oxide
3. 学会等名 JSAP-OSA Joint Symposia 2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Masayoshi Tonouchi
2. 発表標題 Multi-Functional Optical Responses of InGaN/GaN Multiple Quantum Wells studied by Laser Terahertz Emission Microscopy
3. 学会等名 International Symposium on Imaging (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Masayoshi Tonouchi
2. 発表標題 How to use terahertz emission spectroscopy and imaging in real onsite semiconductor R&D scenes
3. 学会等名 Smart NanoMaterials 2021 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 A. Mannan, H. Murakami, A. Hangleiter, D. Turchinovich, Masayoshi Tonouchi
2. 発表標題 Nano-seismology on GaInN/GaN MQWs sandwiched in GaN medium by LTEM
3. 学会等名 The 9th Russia-Japan-USA-Europe Symposium on Fundamental & Applied Problems of Terahertz Devices & Technologies (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Masayoshi Tonouchi
2. 発表標題 Terahertz Spectroscopy on b-Ga2O3
3. 学会等名 International Conference on "Frontiers in Terahertz Technologies and Applications (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 斗内政吉
2. 発表標題 半導体R&D支援分析技術としてのテラヘルツ放射顕微鏡
3. 学会等名 川崎市 ナノマイクロ技術支援講座【講師】
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Mannan, F. R. G. Bagsican, 山原滉太, 川山巖, 村上博成, H. Bremers, U. Rossow, A. Hangleiter, D. Turchinovich, 斗内政吉
2. 発表標題 GaInN / GaN 多層量子井戸構造からの多機能光励起テラヘルツ波放射
3. 学会等名 電子情報通信学会 テラヘルツ応用システム研究会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 斗内政吉
2. 発表標題 レーザーテラヘルツエミッション顕微鏡によるワイドギャップ半導体の評価
3. 学会等名 レーザー学会 学術講演会第42回年次大会（招待講演）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 李 治賢, 芹田 和則, 村上 博成, 斗内 政吉
2. 発表標題 ナノ開口付きカンチレバーチップと近接場THz検出器によるレーザーテラヘルツ放射顕微鏡の開発
3. 学会等名 第69回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 村上史和, Abdul Mannan, 芹田和則, 村上博成, 斗内政吉
2. 発表標題 半絶縁性窒化ガリウムからのテラヘルツ波放射特性とUV照射による水素脱離
3. 学会等名 第69回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Wang Ke, Hao Jiang, Chen Gong, Hironaru Murakami and Masayoshi Tonouchi
2. 発表標題 Broad-band Terahertz Birefringence of Fe-doped Gallium Oxide (Ga ₂ O ₃)
3. 学会等名 第68回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Chen Gong, Takahiro Teramoto, and Masayoshi Tonouchi
2. 発表標題 Self-induced nonlinearity modulates the THz waveform generated by the two-color laser filament
3. 学会等名 第68回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Abdul Mannan, Filchito Renee G. Bagsican, Kota Yamahara, Iwao Kawayama, Hironaru Murakami, Heiko Bremers, Uwe Rossow, Andreas Hangleiter, Dmitry Turchinovich, Masayoshi Tonouchi
2. 発表標題 Terahertz emission from GaInN/GaN multiple quantum wells studied by wavelength-tunable terahertz emission spectroscopy
3. 学会等名 第68回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Abdul Mannan, I. Kawayama, K. Yamahara, F.R. Bagsican, H. Murakami, T. Langer, H. Bremers, U. Rossow, D. Turchinovich, A. Hangleiter, and M. Tonouchi
2. 発表標題 Contact-free THz nano-seismology in InGaN/GaN Multiple Quantum Wells
3. 学会等名 Global Nonophotonics 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Masayoshi Tonouchi
2. 発表標題 Near surface built-in field of wide gap semiconductors studied by LTEM
3. 学会等名 Global Nonophotonics 2019 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 H.Murakami, T.Takarada, M.Tonouchi
2. 発表標題 Plasmonic enhancement effects on terahertz detection sensitivity of LT-GaAs photoconductive antenna deposited with gold nanoparticles
3. 学会等名 OptoX-Nano2019 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Masayoshi Tonouchi
2. 発表標題 Frequency tunable narrow band terahertz time-domain source
3. 学会等名 Asian Symposium on Intense Laser Science11 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Filchito Renee G. Bagsican, Iwao Kawayama, Michael Wais, Natsumi Komatsu, Kazunori Serita, Weilu Gao, Lincoln Weber, Marco Battiato, Hironaru Murakami, Frank A. Hegmann, Junichiro Kono, and Masayoshi Tonouchi
2. 発表標題 Probing photocarrier dynamics in semiconducting carbon nanotubes by terahertz emission spectroscopy
3. 学会等名 2019 International Conference on Advanced Functional Materials and Nanotechnology (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Filchito Renee G. Bagsican, Iwao Kawayama, Hironaru Murakami, and Masayoshi Tonouchi
2. 発表標題 Terahertz science and technology: exploring the last frontier of the electromagnetic spectrum
3. 学会等名 21st SPVM National Physics Conference (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Masayoshi Tonouchi
2. 発表標題 Opto-science and engineering using nanomaterials for fundamentals and applications
3. 学会等名 The 3rd IMS-INSD Joint Workshop on Frontier Nanomaterials (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Masayoshi Tonouchi
2. 発表標題 Laser Terahertz Emission Microscope for Real World Application
3. 学会等名 The 5th International Symposium on Microwave/THz Science and Applications 2019 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Abdul Mannan, I. Kawayama, K. Yamahara, F.R. Bogsican, H. Murakami, A. Hangleiter, T. Langer, H. Bremers, U. Rossow, D. Turchinovich, M. Tonouchi.
2. 発表標題 Terahertz radiation generated by acoustic waves in InGaN/GaN Multiple Quantum Wells
3. 学会等名 The 80th JSAP Autumn Meeting 2019 JSAP-OSA Joint Symposia (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 F. Murakami, K. Serita, H. Murakami, R. Dalipi, A. M. Urbas, A. Materna, M. Buza, D. A. Pawlak, M. Tonouchi, and I. Kawayama
2. 発表標題 Observation of Bi ₂ Te ₃ /Te striped structures using a laser terahertz emission microscope
3. 学会等名 44th International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Masayoshi Tonouchi
2. 発表標題 Terahertz Nanoscience
3. 学会等名 2019 2nd International Conference on Nano Science&Technology (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Masayoshi Tonouchi
2. 発表標題 Laser terahertz emission microscope for real world application
3. 学会等名 SPIE The international society for optica and photonics (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Filchito Renee G. Bagsican, Iwao Kawayama, Michael Wais, Natsumi Komatsu, Kazunori Serita, Weilu Gao, Lincoln Weber, Marco Battiato, Hironaru Murakami, Frank A. Hegmann, Junichiro Kono, and Masayoshi Tonouchi
2. 発表標題 Terahertz Emission from a Photoconductive Antenna Switch Based on Aligned Single-Chirality Semiconducting Carbon Nanotubes
3. 学会等名 21st International Conference on Electron Dynamics in Semiconductors, Optoelectronics and Nanostructures (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 F. Murakami, K. Serita, H. Murakami, R. Dalipi, A. M. Urbas, A. Materna, M. Buza, D. A. Pawlak, M. Tonouchi, and I. Kawayama
2. 発表標題 Characteristics of THz emissions from Bi2Te3/Te striped structure
3. 学会等名 21st International Conference on Electron Dynamics in Semiconductors, Optoelectronics and Nanostructures (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Abdul Mannan, I. Kawayama, K. Yamahara, F.R. Bogsican, H. Murakami, T. Langer, H. Bremers, U. Rossow, D. Turchinovich, A. Hangleiter, and M. Tonouchi
2. 発表標題 Terahertz radiation from InGaN/GaN Multiple Quantum Wells
3. 学会等名 21st International Conference on Electron Dynamics in Semiconductors, Optoelectronics and Nanostructures (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 村上史和、芹田和則、村上博成、Dalipi Rea, Urbas. A., Materna. A., Buza. M., Pawlak. D., 斗内政吉、川山巖
2. 発表標題 フェムト秒レーザー励起したBi ₂ Te ₃ /Teストライプ構造から放射されるテラヘルツ波偏光特性
3. 学会等名 第80回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Filchito Renee G. Bogsican, Iwao Kawayama, Michael Wais, Natsumi Komatsu, Kazunori Serita, Weilu Gao, Lincoln Weber, Marco Battiato, Hironaru Murakami, Frank A. Hegmann, Junichiro Kono, and Masayoshi Tonouchi,
2. 発表標題 Terahertz emission from photoconductive antenna switches based on highly-aligned and chirality-enriched semiconducting carbon nanotubes
3. 学会等名 Optical Terahertz Science and Technology2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Filchito Renee Bogsican, Iwao Kawayama, Kazunori Serita, Weilu Gao, Natsumi Komatsu, Michael Wais, Lincoln Weber, Marco Battiato, Hironaru Murakami, Frank A. Hegmann, Junichiro Kono, and Masayoshi Tonouchi
2. 発表標題 Terahertz emission properties of photoconductive antennas based on semiconducting carbon nanotubes
3. 学会等名 The Global Nanophotonics 2018 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Masayoshi Tonouchi
2. 発表標題 New Methods of THz Time Domain Spectroscopy for Graphene Science
3. 学会等名 International Conference on Nanomaterials & Nanotechnology 2018 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Masayoshi Tonouchi
2. 発表標題 Past, Present, and Future of LTEM: Laser Terahertz Emission Microscope
3. 学会等名 IEEE Summer Topicals Meeting Series 2022 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Masayoshi Tonouchi
2. 発表標題 Laser Terahertz Emission Microscopy for Silicon Electronics
3. 学会等名 SPIE Optical Engineering + Applications (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 斗内政吉	4. 発行年 2021年
2. 出版社 内田老鶴圃	5. 総ページ数 256
3. 書名 テラヘルツ時間領域分光	

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究 分 担 者	芹田 和則 (Serita Kazunori) (00748014)	大阪大学・レーザー科学研究所・その他 (14401)	
研究 分 担 者	村上 博成 (Murakami Hironaru) (30219901)	大阪大学・レーザー科学研究所・准教授 (14401)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関			
ドイツ	Bielefeld University	Technical University Braunschweig		
米国	Rice University	University of Utah		
シンガポール	Nanyang Technological University			
ポーランド	3ENSEMBLE			
オーストリア	TU Wien			