

田中耕一郎

京都大学 物質—細胞統合システム拠点
教授

高強度テラヘルツ光による究極的分光技術開拓と物性物理学への展開

§1. 研究実施体制

(1)「京都大学」グループ

① 研究代表者: 田中 耕一郎 (京都大学物質—細胞統合システム拠点、教授)

② 研究項目

- 波長可変高強度テラヘルツ光源によるテラヘルツ非線形分光
- 半導体量子構造における非線形分光とテラヘルツスイッチ
- リアルタイムテラヘルツ近接場顕微鏡の開拓と応用

(2)「広島大学」グループ

① 主たる共同研究者: 角屋 豊 (広島大学大学院先端物質科学研究科、教授)

② 研究項目

- 半導体量子構造における非線形分光とテラヘルツスイッチ
- テラヘルツ非線形性発現に適した半導体量子メタ構造

(3)「早稲田大学」グループ

① 主たる共同研究者: 青木 隆朗 (早稲田大学理工学術院、准教授)

② 研究項目

- 波長可変高強度テラヘルツ光源によるテラヘルツ非線形分光

§2. 研究実施の概要

本プロジェクトでは、高強度なテラヘルツ光を発生させる技術を発展させ、それを用いた高度な分光技術や究極的なイメージング技術を開発する目標を掲げている。これまでに、1 MV/cm (1cm あたり 10^6 V) という高強度テラヘルツ電場の発生に成功し、半導体における非線形な光学応答の観測や高い空間分解能を有するテラヘルツイメージング装置の構築をおこなってきた。平成25年度においては、高強度電場と波長可変性を共に有しているテラヘルツ光源の開発に取り組むとともに、物質の非線形な光学応答を実現するための仕組みやデバイスの開発、テラヘルツ近接場顕微鏡の応用実験に取り組んだ。

狭帯域高強度テラヘルツ光パルス発生の高強度化とその高出力化に関しては、回折格子をもちいた波長可変手法の限界を示した上で、その特性を生かした実験を提案した。波長可変テラヘルツ光の高出力化にも取り組み、波長可変帯域:0.5-2.5 THz, スペクトル幅:50 GHz 以下, ピーク電場強度: 10 kV/cm の光源を実現した。さらに、金属構造体を用いたテラヘルツ電場やテラヘルツ磁場の増強とそれをもちいた磁性体の実験をおこなった。希土類フェライト試料に金属構造体を付与して、試料面に平行に印加されたテラヘルツ光磁場とは 90 度向きが異なり、試料面に垂直の向きをもったテラヘルツパルス磁場を近接場の領域に生成することに成功した。その磁場強度は外部磁場に比べて30倍以上に増強されており、これを印加することによって、希土類フェライト試料の反強磁性モードを担う磁気モーメントの歳差運動を大振幅に誘起することに成功した。Landau-Lifshitz-Gilbert 方程式を用いた理論解析により、従来の可視円偏光パルスを用いた実験よりも、500 倍以上効率に磁化変化を誘起できることを明らかにした。

テラヘルツデバイスの構築に関しては、カプラーと共振器を一体化した素子の検討を行った。カプラーとしては Bull's-eye 構造とした。半導体基板表面と垂直な電場を得る方法として、非対称 Bull's-eye 構造を考案し、数値シミュレーションを行った。Bull's-eye 中心部に形成した円柱状平行平板共振器の中心における量子井戸と垂直な THz 波が入射電場の 5 倍以上となる見通しを得た。テラヘルツ近接場顕微鏡に関しては、金属構造体の近接場増強効果を確認する実験を進めるとともに、生細胞のイメージングや細胞照射実験の準備をおこなった。生細胞のテラヘルツイメージングに関しては、脂肪細胞のようなコントラストが大きい細胞では十分に近接場領域でも可視化が可能であることを示せたが、通常の細胞に関してはさらなる感度向上の課題が残った。

§3. 成果発表等

(3-1) 原著論文発表

論文詳細情報(国際)

1. Yuji Hazama, Nobuko Naka, Makoto Kuwata-Gonokami, and Koichiro Tanaka, "Resonant creation of indirect excitons in diamond at the phonon-assisted absorption edge", *Europhysics Letters*, 104, 47012, 2013(DOI:10.1209/0295-5075/104/47012)
2. N. Yoshikawa, H. Hirori, H. Watanabe, T. Aoki, T. Ihara, R. Kusuda, C. Wolpert, T. K. Fujiwara, A. Kusumi, Y. Kanemitsu, and K. Tanaka, "Biexciton state causes photoluminescence fluctuations in CdSe/ZnS core/shell quantum dots at high photoexcitation densities", *Phys. Rev. B* 88, 155440, 2013(DOI: 10.1103/PhysRevB.88.155440)
3. Tobias Kampfrath, Koichiro Tanaka and Keith A. Nelson, "Resonant and nonresonant control over matter and light by intense terahertz transients", *Nature Photonics* 7,680–690, 2013(DOI:10.1038/nphoton.2013.184)
4. K. Shinokita, H. Hirori, K. Tanaka, T. Mochizuki, C. Kim, H. Akiyama, L. N. Pfeiffer and K. W. West, "Terahertz-Induced Optical Emission of Photoexcited Undoped GaAs Quantum Wells", *Phys. Rev. Lett.* 111, 067401, 2013(DOI:10.1103/PhysRevLett.111.067401)
5. Y. Mukai, H. Hirori, and K. Tanaka, "Electric field ionization of gallium acceptors in germanium induced by single-cycle terahertz pulses", *Phys. Rev. B* 87, 201202(R), 2013(DOI:10.1103/PhysRevB.87.201202)
6. H. Nishimura, K. Ritchie, R. S. Kasai, N. Morone, H. Sugimura, K. Tanaka, I. Sase, A. Yoshimura, Y. Nakano, T. K. Fujiwara, and A. Kusumi, "Biocompatible fluorescent silicon nanocrystals for single-molecule tracking and fluorescence imaging" *The Journal of Cell Biology*, vol. 202 no. 6, pp. 967-983, 2013(DOI: 10.1083/jcb.201301053)
7. D. Armand, H. Taniguchi, Y. Kadoya, T. Tanaka, and K. Tanaka, "Terahertz full horn-antenna characterization", *Applied Physics Letters*, 102, 141115, 2013(DOI:10.1063/1.4801444)
8. T. Yoshida, S. Kamada, S. Murata, and T. Aoki, "Fiber-based pulse stretcher for narrowband terahertz pulse generation with a chirped-pulse beating method", *Appl.*

Phys. Lett. 103, 151118, 2013 (DOI: 10.1063/1.4824882)

9. S. Kamada, T. Yoshida, and T. Aoki, “The chirp-control of frequency-tunable narrowband terahertz pulses by nonlinearly chirped laser pulse beating”, Appl. Phys. Lett. 104, 101102, 2014 (DOI: 10.1063/1.4867983)

10. T. Yoshida, S. Kamada, S. Murata, and T. Aoki, “Suppressing Chirp of THz Pulses by Using an Optical Fiber as a Pulse Stretcher for Chirped Pulse Beating”, JPS Conf. Proc. 1, 014027, 2014 (DOI: 10.7566/JPSCP.1.014027)

11. S. Kamada, T. Yoshida, and T. Aoki, “Controlling Chirping of Narrowband THz Pulses Generated by Non-Linearly Chirped Pulse Beating”, JPS Conf. Proc. 1, 014022, 2014 (DOI: 10.7566/JPSCP.1.014022)

(3-2) 知財出願

- ① 平成 25 年度特許出願件数 (国内 1 件)
- ② CREST 研究期間累積件数 (国内 12 件)