

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 10 日現在

機関番号：12701

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2013～2014

課題番号：25800177

研究課題名(和文)カーボンナノチューブにおけるコヒーレント電子励起状態の生成と制御

研究課題名(英文)Excitation and control of coherent excited states in carbon nanotubes

研究代表者

片山 郁文(Katayama, Ikufumi)

横浜国立大学・工学(系)研究科(研究院)・准教授

研究者番号：80432532

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,200,000円

研究成果の概要(和文)：超短パルスレーザーを用いてカーボンナノチューブの励起状態を生成し、これをコントロールすることで、励起状態の制御と、コヒーレントな素励起の生成を目的とした研究を行なった。その結果、非常に高周波のコヒーレントフォノンを含めて、ナノチューブ中の各種のフォノンを励起できることを明らかにし、それが、ストークスラマン過程を考えることで理解できることを示した。また、イオン液体を通じた電子状態の制御と組み合わせることで、これらのフォノンの振幅や周波数を変調することができることを明らかにした。これらの結果は、カーボンナノチューブの特殊な電子格子相互作用を示唆するもので興味深い。

研究成果の概要(英文)：Using ultrashort pulsed lasers, we generate coherent excited states in carbon nanotubes, and control these states by using the electro-chemical control of the nanotubes. We first demonstrated that in the detection process of coherent phonon signals, the coherent phonon signals becomes maximum at the energy below the electronic resonance by an amount of phonon energy. The results indicate that the Stokes Raman scattering process is dominant in the detection process of coherent phonons. We also investigated the gate voltage dependence of the coherent phonon signals by using ionic liquids. The results indicate that by tuning the electronic states of carbon nanotubes, it is now possible to control the phonon generation process, indicating an interesting nature of strong electron-phonon coupling in the carbon nanotubes.

研究分野：光物性

キーワード：カーボンナノチューブ コヒーレントフォノン 電子格子相互作用 超高速分光

### 1. 研究開始当初の背景

研究開始当初、代表者らはサブ 10 fs 超短パルスレーザーを用いてコヒーレントフォノン分光法に関する研究を行い、グラフェンなどの物質系において光励起をすると、通常のラマン過程とは異なり、波数の大きいナノスケールのコヒーレントフォノンを励起できることを明らかにしてきた。また、カーボンナノチューブにおいては、RBM や G モードなど比較的low周波のフォノンモードに関して、各国から研究報告があるという状況であった。しかしながら、これらのモードよりも高周波の素励起や、電子励起に関しては、これらの研究で用いられていたパルスレーザーのパルス幅が比較的長かったために、コヒーレントに励起することは難しかった。もしこれらの素励起をコヒーレントに励起することができれば、カーボンナノチューブの電子状態の制御や、フォノンの制御が可能となる可能性がある。

### 2. 研究の目的

そこで本研究では、サブ 5 fs という非常に短いパルス幅のレーザーを用いて、カーボンナノチューブの高周波素励起をコヒーレントに励起し、それをコントロールすることを目的とした。これらによって、カーボンナノチューブの励起状態を自在に制御し、化学反応などの新しい応用を開拓することを目的とした。

### 3. 研究の方法

そのために本研究では、パルス幅のより短い超広帯域の光源を用い、カーボンナノチューブ薄膜のポンププローブ分光法を行い、プローブ光の波長分解、イオン液体を用いたフェルミ面制御技術を用いて、カーボンナノチューブの高周波素励起を、励起、制御することを目指した。また、

### 4. 研究成果

まず金属型カーボンナノチューブを用いた場合の成果を報告する。カーボンナノチューブは、線型の分散を持つため、グラフェンなどと同様に、強い電子格子相互作用を有する。また、一方で、パルス幅の短いレーザーは、非常に広帯域のスペクトルを有する。従って、このような超短パルスレーザーを用

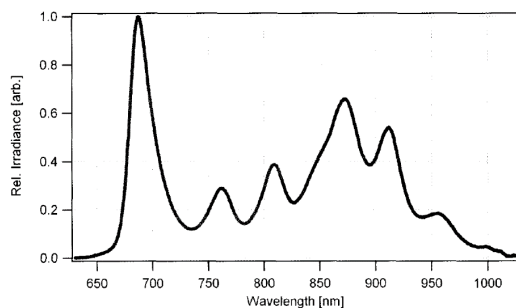


図 1: 本研究で用いた超短パルスレーザーのスペクトル

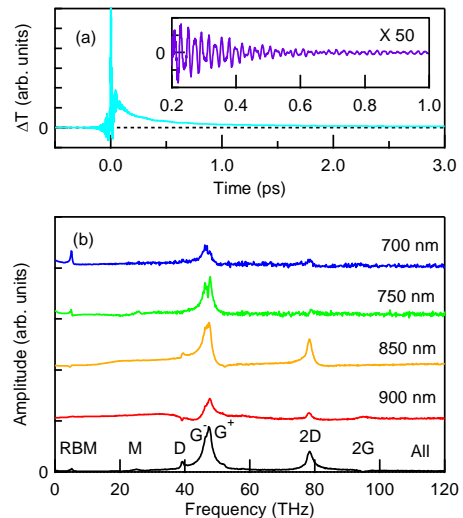


図 2: (a) 金属型カーボンナノチューブにおいて観測された過渡吸収の時間波形。挿入図は電子応答を差し引いた波形を示す。(b) 各波長で観測されたコヒーレントフォノン信号のスペクトル。All は、波長分解を行わなかった場合の波形を示す。

いれば、その広いスペクトル帯域において共鳴の情報を明らかにすることができる。そこで、本研究では、ポンププローブ分光法において、プローブ光を波長分解する、波長分解コヒーレントフォノン分光法を金属型カーボンナノチューブに適用した。特に、最低エネルギーの van Hove 特異点間の遷移エネルギーが、使用するレーザーの高エネルギー側に位置する直径約 1.4 nm のナノチューブを用いた。実験は、パルス幅 7.5 fs、スペクトル幅 320 nm のレーザーを用いて行った。

図 2 に観測されたコヒーレントフォノン信号と、それをフーリエ変換して得られたスペクトルを示す。RBM (5 THz)、G (47.4 THz)、2D (80 THz) モードをはじめとして、ナノチューブに特有の振動モードが明瞭に観測された。さらに、共鳴効果を明らかにするために、プローブ光のスペクトルを、バンドパスフィルターを用いて波長分解した結果も図 2 に示している。図 2 を見ると分かるように、各モードの強度は検出波長によって大きく異なっている。

そこで、この効果をより詳細に明らかにするために、各モードの振幅を検出波長に対しプロットした。その結果を図 3 に示す。これを見ると分かるように、コヒーレントフォノン信号の振幅が、最も振幅が大きくなる波長はモードごとに異なり、高周波になるほど高くなるのが分かる。この強度のピークは、図の一番上に示した van Hove 特異点のエネルギーからフォノンのエネルギー分だけ低い位置にあることが分かり、このことは、van Hove 特異点がレーザースペクトルの高エネルギー側に位置するため、フォノンを一つ放出するストークス過程が選択的に増強されるためであると考えられる。このように、幅広い周波数のフォノンに対して、共鳴効果を

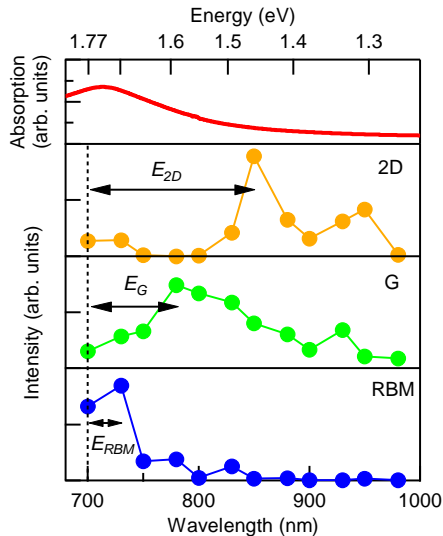


図3: 金属型カーボンナノチューブにおけるコヒーレントフォノン信号の検出波長依存性。赤線は、線形吸収を表している。矢印に示したように、それぞれのピークの強度は、線形吸収のピーク（励起子吸収）よりもフォノンのエネルギー分だけ低い位置に現れている。

明らかにできたのは短パルスレーザーの持つ広いスペクトル幅と、高い時間分解能のためである。このような波長分解のスペクトルをより詳細に考察すれば、コヒーレントフォノン信号から、ラマン散乱断面積の波長依存性に関する情報を得ることができる可能性があり、非常に興味深い。

さらに興味深いことに、今回観測された高周波コヒーレントフォノンでは、2Dモードの信号強度が強く観測された。同様の波長で観測したラマン散乱の結果と比べても強度が高い。この原因は未解明であるが、2Dモードが二次ラマン過程の二重共鳴効果によって観測されるモードであることと関係しているものと考えられる。このように、広い帯域で共鳴効果を観測できることが波長分解コヒーレントフォノン分光法の強みである。

このように、カーボンナノチューブは強い電子格子相互作用を持つため、励起子吸収を共鳴励起すると、コヒーレントフォノンを効率よく観測することができる。そこで、イオン液体を用いて電圧を印加することでフェルミ面の位置を変調させ、コヒーレントフォノン分光を行った。イオン液体は非常に広い電位窓を有するため、フェルミ面の位置を数eV程度変調することが可能であり、その結果、パウリブロッキングやKohn異常等の効果が変化し、その影響がコヒーレントフォノンの信号にも観測されるようになる。

図4は、金属カーボンナノチューブ薄膜をイオン液体に浸した上で電圧を印加しコヒーレントフォノン信号を測定した結果である。一見すると分かるのは、フォノンの振幅が電圧を印加することにより減少していることである。また、図からは読み取りづらいがGモードの周波数は電圧を印加することにより、高周波にシフトすることが分かった。

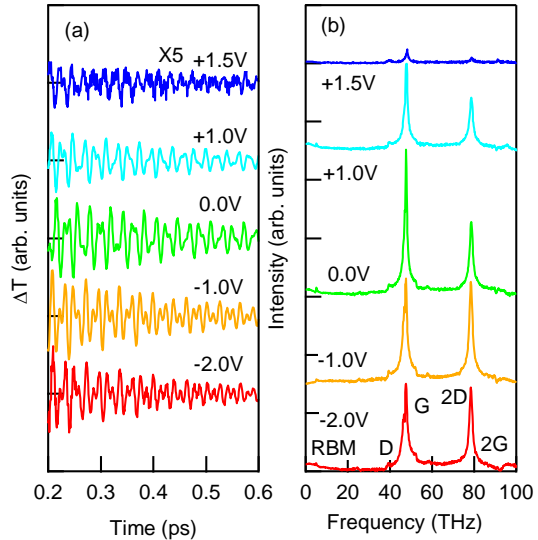


図4: 金属型カーボンナノチューブにおけるコヒーレントフォノン信号のバイアス依存性。イオン液体を通してバイアスを印加することで、フォノンの信号が大きく変化することが分かる。

これらの効果は、フェルミ面に非常に敏感にフォノンの信号が反応することを示しており、カーボンナノチューブの強い電子格子相互作用を示唆している。時間領域でも、光励起直後にGモードの周波数は低周波にシフトし、その周波数が高周波側に移動していく。このような周波数変化はフェルミ面が、ディラック点に近い際に最も強く表れることも明らかとなった。注目したいのは、非常に短いパルス幅のレーザーを用いたため、2Dモード、2Gモードなど100THzにもおよぶ非常に高周波のモードをコヒーレントに検出できていることである。

以上のように、非常に短いパルス幅のレーザーを用いると、広帯域のスペクトル成分を用いることができ、また、非常に高周波のフォノンをコヒーレントフォノン信号として検出できることが分かった。また、コヒーレントフォノン信号はそれぞれのチューブに

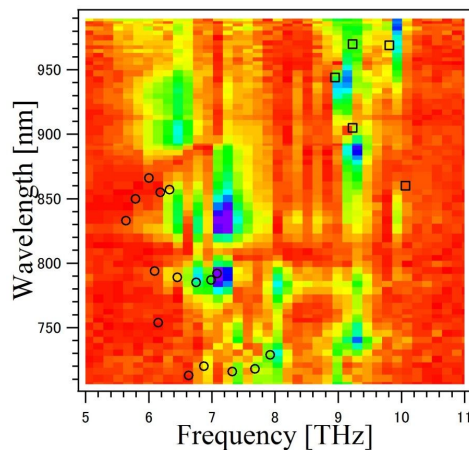


図5: HiPICOカーボンナノチューブの波長分解コヒーレントフォノン信号。それぞれのピークは○(E11)及び□(E22)で示したピーク位置に対応しており、これからカイラリティを同定できる。

おける van Hove 特異点に共鳴する位置からフォノンのエネルギー分だけずれた部分に現れることが分かった。したがって、エネルギーの低い RBM はほぼ共鳴点で最大となる。更に、RBM の周波数はチューブの径に大きく依存することから、フォノンの周波数と共鳴エネルギーのマップを作れば、カーボンナノチューブの共鳴を示すカイラリティを同定できる。このような実験を実証するために、可変バンドパスフィルターを用いて、各波長におけるコヒーレントフォノン信号を検出する実験を行った。その結果を図 5 に示す。このようにカイラリティを同定できることが分かった。

以上、これまでに示したように超短パルスレーザーを用いて、カーボンナノチューブの高周波フォノンを非常に広帯域に発生・検出できることを示した。電子状態にコヒーレンスを励起し検出することはできなかったが、カイラリティ同定など本手法の応用も開発した。今後は、より短いパルス幅のレーザーで、波形整形し、励起状態をコントロールすることで、ナノ物質の物性制御を目指した研究を行っていききたい。

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計 13 件)

1. K. Yoshioka, Y. Minami, K. Shudo, T. D. Dao, T. Nagao, M. Kitajima, J. Takeda, and I. Katayama, "Terahertz-field-induced Nonlinear Electron Delocalization in Au Nanostructures", *Nano Letters* 15, pp. 1036-1040 (2015). (IF=12.94)
2. K. Sato, K. Tahara, Y. Minami, I. Katayama, M. Kitajima, H. Kawai, K. Yanagi, and J. Takeda, "Resonant Enhancement of First- and Second-Order Coherent Phonons in Metallic Single-Walled Carbon Nanotubes", *Phys. Rev. B* 90, 235435: pp.1-5 (2014). (IF=3.664)
3. 片山郁文、南 康夫、武田 淳(招待論文) 『テラヘルツ時間領域分光法による薄膜・表面の物性評価』、*表面科学* 35, pp. 680-685 (2014). (IF=-)
4. Y. Minami, J. Takeda, T. D. Dao, T. Nagao, M. Kitajima, and I. Katayama, "Nonlinear Electron Dynamics of Gold Ultrathin Films Induced by Intense Terahertz Waves", *Appl. Phys. Lett.* 105, 241107: pp.1-4 (2014). (IF=3.794)
5. J. Takeda, W. Oba, Y. Minami, T. Saiki and I. Katayama, "Ultrafast Crystalline-to-Amorphous Phase Transition in Ge<sub>2</sub>Sb<sub>2</sub>Te<sub>5</sub> Chalcogenide Alloy Thin Film Using Single-Shot Imaging Spectroscopy", *Appl. Phys. Lett.* 104, 261903: pp. 1-4 (2014). (IF=3.794)
6. J. Takeda, I. Katayama, K. Shudo and M. Kitajima, (Invited paper) "Coherent Phonon and Surface-Enhanced Raman Scattering Dynamics in Solids", *J. Lumin.* 152, pp. 23-27 (2014). (IF=2.367)
7. Y. Minami, M. Yamaki, I. Katayama and J. Takeda, "Broadband Pump-Probe Imaging Spectroscopy Applicable to Ultrafast Single-Shot Events", *Appl. Phys. Exp.*, 7, 022402: pp. 1-3 (2014). (IF=2.731)
8. Y. Minami, Y. Hayashi, J. Takeda and I. Katayama, "Single-Shot Measurement of a Terahertz Electric-Field Waveform Using a Reflective Echelon Mirror", *Appl. Phys. Lett.* 103, 051103: pp. 1-4 (2013). (IF=3.794)
9. T. Kawano, I. Katayama, J. Ohara, M. Ashida and J. Takeda, "Intermolecular THz Vibrations Relevant to Optically and Thermally Induced Magnetic Phase Transitions in the Strongly Correlated Organic Radical TTTA", *J. Phys. Soc. Jpn.*, 83, 014713: pp. 1-6 (2014). (IF=2.087)
10. 千葉優、諸橋功、坂本高秀、片山郁文、関根徳彦、川西哲也、竇迫巖、"マッハツェンダ変調器型光コム発生器および断熱ソリトン圧縮を用いた 80fs パルス発生"、*電子情報通信学会和文誌 C* Vol.J97-C, No. 5, pp233-234 (2014). (IF=-)
11. I. Katayama, K. Sato, S. Koga, J. Takeda, S. Hishita, H. Fukidome, M. Suemitsu and M. Kitajima, "Coherent Nanoscale Optical-Phonon Wavepacket in Graphene Layers", *Phys. Rev. B*, 88, 245406: pp. 1-5 (2013). (IF=3.767)
12. I. Katayama, S. Koga, J. Takeda, S. Hishita, D. Fujita and M. Kitajima, "Electron-Phonon Coupling and Defect Scatterings in Ar<sup>+</sup>-ion Implanted Graphite", *J. Cer. Soc. Jpn.*, 121, pp. 291-294 (2013). (IF=0.736)
13. I. Katayama, R. Akai, M. Bito, E. Matsubara, and M. Ashida, "Electric Field Detection of Phase-Locked Near-Infrared Pulses Using Photoconductive Antenna", *Opt. Exp.* 21, pp. 16248-16254 (2013). (IF=3.546)

[学会発表](計 27 件)

1. I. Katayama, K. Maekawa, K. Sato, Y. Minami, K. Yanagi, M. Kitajima and J. Takeda, "Fermi Energy Dependence of High-Frequency Coherent Phonons in Metallic Carbon Nanotubes", *International Symposium on Computics: Quantum Simulation and Design (ISC-QSD2014)*, (1-3 December 2014, Tokyo, Poster).
2. Y. Minami, K. Araki, T. D. Dao, T. Nagao, J. Takeda, M. Kitajima, and I. Katayama, "Nonlinear Dynamics of Electrons on

- Dirac-Like Band in Semi-Metal Bismuth Induced by an THz Electric Pulse", International Symposium on Compuotics: Quantum Simulation and Design (ISC-QSD2014), (1-3 December 2014, Tokyo, Poster).
3. W. Oba, I. Katayama, Y. Minami, T. Saiki and J. Takeda, "Single-Shot Visualization of Ultrafast Amorphization in Chalcogenide Alloy Thin Films", International Symposium on Compuotics: Quantum Simulation and Design (ISC-QSD2014), (1-3 December 2014, Tokyo, Poster).
  4. I. Katayama, Y. Chiba, I. Morohashi, Y. Irimajiri, N. Sekine, I. Hosako and M. Ashida, "Sub-terahertz Frequency Detection Using Sub-5-fs Laser Pulses And A Photoconductive Antenna", 39th International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves (IRMMW-THz 2014), R5-P31.2 (14-19 September 2014, Tucson, USA, Poster).
  5. K. Yoshioka, Y. Minami, T. D. Dao, T. Nagao, K. Shudo, J. Takeda, M. Kitajima and I. Katayama, "Nonlinear Response of Au Nanostructures Observed with Intense THz Pulses", 39th International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves (IRMMW-THz 2014), T5-P16.4 (14-19 September 2014, Tucson, USA, Oral and Poster). [Best Student Paper/Presentation Award, 2nd place]
  6. I. Morohashi, Y. Chiba, Y. Irimajiri, T. Sakamoto, I. Katayama, N. Sekine, T. Kawanishi, I. Hosako, A. Kasamatsu, "Generation Of Broadband Optical Combs With High OSNR For CW-THz Wave Generation By Photonic Down-Conversion", 39th International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves (IRMMW-THz 2014), R5-P35.1 (14-19 September 2014, Tucson, USA, Oral and Poster).
  7. Y. Minami, T. D. Dao, T. Nagao, J. Takeda, M. Kitajima, and I. Katayama, "Nonlinear Carrier Responses in Gold Thin Films Induced by Intense Terahertz Waves", 19th International Conference on Ultrafast Phenomena, P1.29 (7-11 July 2014, Okinawa, Japan, Poster).
  8. K. Maekawa, K. Sato, Y. Minami, I. Katayama, J. Takeda, K. Yanagi, M. Kitajima, "Electrochemical Control of Coherent Phonon Generations in Single-walled Metallic Carbon Nanotubes", 19th International Conference on Ultrafast Phenomena, P1.42 (7-11 July 2014, Okinawa, Japan, Poster).
  9. W. Oba, I. Katayama, Y. Minami, T. Saiki, and J. Takeda, "Single-shot Real-time Observation of Ultrafast Amorphization in Ge2Sb2Te5 Thin Film", 19th International Conference on Ultrafast Phenomena, P2.38 (7-11 July 2014, Okinawa, Japan, Poster).
  10. K. Araki, Y. Minami, T. D. Dao, T. Nagao, J. Takeda, M. Kitajima, and I. Katayama, "Nonlinear Carrier Dynamics in Semi-Metal Bismuth Induced by Intense Terahertz Field", 19th International Conference on Ultrafast Phenomena, P3.29 (7-11 July 2014, Okinawa, Japan, Poster).
  11. Y. Minami, K. Araki, T. D. Dao, T. Nagao, J. Takeda, M. Kitajima, and I. Katayama, "Carrier Dynamics of a Bismuth Thin Film Accelerated via Intense Terahertz Field", The Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO 2014), JW2A.62 (San Jose, USA, June 8-13, 2014, Poster).
  12. I. Katayama, M. Bito, E. Matsubara and M. Ashida, "Broadband Terahertz Generation Approaching Optical Communication Frequency Using Tilted DAST Crystals", The Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO 2014), JTu4A.86 (San Jose, USA, June 8-13, 2014, Poster).
  13. M. Moriyama, N. Sugiyama, K. Shudo, I. Katayama, M. Kitajima and J. Takeda, "Ultrafast Measurements of Vibrations on Defective MoS2 Surface", 12th International Conference on Atomically Controlled Surfaces, Interfaces and Nanostructures, 5PN-43 (Nov. 4-8, 2013, Tsukuba, Poster).
  14. J. Takeda, I. Katayama, K. Shudo and M. Kitajima (Invited Talk), "Coherent Phonon and Surface-Enhanced Raman Scattering Dynamics in Solids", 18th International Conference on Dynamical Processes in Excited States of Solids, II-1 (August 4-9, 2013, Fuzhou, China, Oral).
  15. M. F. Avila-Ortega, I. Katayama, Y. Minami, J. Takeda and M. Kitajima, "Ultrafast Dynamics of the Interlayer Shearing Mode in Au Graphite Nanostructures", The 10th Conference on Lasers and Electro-Optics Pacific Rim, and The 18th OptoElectronics and Communications Conference, WPB-23 (30 June - 4 July 2013, Kyoto, Japan, Poster).
  16. T. Ohshima, Y. Minami, I. Katayama and J. Takeda, "Broadband THz Time-Domain Spectroscopy of Halogen-Bridged Platinum Complexes", The 10th Conference on Lasers and Electro-Optics Pacific Rim, and The 18th OptoElectronics and Communications Conference, WPC-2 (30 June - 4 July 2013, Kyoto, Japan, Poster).
  17. I. Katayama, Y. Hayashi, K. Masuda, Y. Minami, and J. Takeda, " Single-shot Terahertz Spectrometer Using an Echelon

- Mirror and Air Plasma", The 10th Conference on Lasers and Electro-Optics Pacific Rim, and The 18th OptoElectronics and Communications Conference, MC2-4 (30 June - 4 July 2013, Kyoto, Japan, Oral).
18. I. Katayama, M. Bito and E. Matsubara and M. Ashida, "Near-Infrared Time-Domain Spectroscopy using Broadband Phase-locked Electromagnetic Pulses", The Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO/QELS 2013), MC2-4, (Jun. 9-14, San Jose, USA, Oral) (2013/6/9-14).
  19. Y. Minami, Y. Hayashi, J. Takeda and I. Katayama, "Single-Shot Observation of THz Field with a Reflective Echelon Mirror", The Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO/QELS 2013), CW1K.2 (San Jose, USA, June 9-14, 2013, Oral).
  20. I. Katayama, Y. Ikegaya, Y. Minami and J. Takeda, "Control of Phonon Polariton Propagation in LiNbO3 Single Crystals", The Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO/QELS 2013), JTh2A.25 (San Jose, USA, June 9-14, 2013, Poster).
  21. K. Sato, I. Katayama, K. Tahara, Y. Minami, J. Takeda, K. Yanagi and M. Kitajima, "Resonant Enhancement of Coherent High-Order Phonons in Single-Walled Carbon Nanotubes", The Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO/QELS 2013), JTh2A.46 (San Jose, USA, June 9-14, 2013, Poster).
  22. T. Takizawa, I. Katayama, Y. Minami, M. Kitajima, and J. Takeda, "E-mode Phonon-Polariton Dispersion in LiNbO3 Probed via Frequency-Resolved Coherent Phonon Spectroscopy", The Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO/QELS 2013), JTh2A.39 (San Jose, USA, June 9-14, 2013, Poster).
  23. I. Katayama, K. Shudo, J. Takeda, and M. Kitajima (Invited Talk), "Nanoscale and Femtosecond Phonon Dynamics Observed with Surface Enhanced Raman Scattering", Ultrafast Surface Dynamics 2013, (May 28-31 2013, Colorado, Oral).
  24. J. Takeda, Y. Ikegaya, H. Sakaibara, Y. Minami and I. Katayama, "Single-Shot Time-Frequency Mapping of Coherently Controlled Phonon-Polariton Propagations in Ferroelectric LiNbO3", W5C-6, International Workshop on Optical Terahertz Science and Technoogy (OTST 2013), (1-5 April, Kyoto, Oral).
  25. I. Katayama, Y. Hayashi, Y. Minami and J. Takeda, "Single-shot Detection of Terahertz Electric-Field Waveform Generated Using a Grating-coupled LiNbO3 Single Crystal",

W2A-4, International Workshop on Optical Terahertz Science and Technoogy (OTST 2013), (1-5 April, Kyoto, Oral).

26. Y. Minami, T. Ohshima, I. Katayama, and J. Takeda, "Observation of the asymmetric stretch mode in PtX with a broad-band THz Spectroscopy", Th3-33, International Workshop on Optical Terahertz Science and Technoogy (OTST 2013), (1-5 April, Kyoto, Poster).
27. M. Ashida, E. Matsubara and I. Katayama, " Ultra-broadband IR and THz generation and detection with ultrashort pulses ", Photonics West 2014, 8964-7 ( Feb. 4, 2014, San Francisco, USA, Invited Talk ) .

〔図書〕(計 0件)  
該当なし

〔産業財産権〕  
出願状況(計 2件)

名称：計測機器  
 発明者：南 康夫、武田 淳、片山郁文  
 権利者：南 康夫、武田 淳、片山郁文  
 種類：特許  
 番号：特願 2014-248434  
 出願年月日：平成 26 年 12 月 8 日  
 国内外の別：国内

名称：テラヘルツ電場波形検出装置  
 発明者：片山郁文、南 康夫、武田 淳、Jeremy A. Johnson  
 権利者：片山郁文、南 康夫、武田 淳、Jeremy A. Johnson  
 種類：特許  
 番号：特願 2015-17672  
 出願年月日：平成 27 年 1 月 30 日  
 国内外の別：国内

取得状況(計 0件)  
該当なし

〔その他〕  
ホームページ等

1. <http://www.ultrafast.ynu.ac.jp/>
2. <http://www.laser-nanoscience.ynu.ac.jp/ja/>

#### 6. 研究組織

(1)研究代表者  
 片山 郁文 ( KATAYAMA IKUFUMI )  
 横浜国立大学・工学研究院・准教授  
 研究者番号：80432532

(2)研究分担者  
 該当なし

(3)連携研究者  
 該当なし