

令和元年6月17日現在

機関番号：82108

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16H03820

研究課題名(和文) ナノ構造誘起熱応答ダイナミクスの研究

研究課題名(英文) Study on thermal response dynamics in nano structures

研究代表者

北島 正弘 (Kitajima, Masahiro)

国立研究開発法人物質・材料研究機構・国際ナノアーキテクトニクス研究拠点・NIMS特別研究員

研究者番号：00343830

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 14,300,000円

研究成果の概要(和文)：ナノ構造における光励起・熱化過程及び熱伝導挙動を明らかにするため、フォノン・キャリアダイナミクス等の測定を行った。主たる成果は：(1)熱電変換材料としても注目されるBi-Sb系極薄膜についてコヒーレント音響フォノン閉じ込めの研究を行い、膜が侵入長より薄くなると音速が減少することを見いだした。これは、薄膜化により熱電変換材料の性能が向上することを示す。(2)Thzキャリアダイナミクス測定により、同系のキャリア励起機構と熱化の時間スケールを明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

デバイスの微細化は著しく、集積素子内部における熱の発生や伝導および輻射放熱を如何に制御するかは緊急の課題である。本研究では、音響フォノンやキャリアのダイナミクス等の測定により、ナノ構造における光吸収や熱伝導等をナノスケールで明らかとした。特に、Bi-Sb系極薄膜における音速の減少は薄膜化による熱電変換材料性能の向上を示しており、意義深い。

研究成果の概要(英文)：We have studied on carrier and acoustic phonon dynamics in nanostructures, in order to understand the processes of photo excitation, thermalization and heat transfer. The main findings are: (1) a decrease in sound velocity in ultrathin Bi-Sb films thinner than the optical penetration depth, suggesting an improvement of the thermoelectric conversion performance by thinning the films. (2) elucidation of excitation mechanisms of carriers in this system and determination of the thermalization time.

研究分野：光物性、フォノンダイナミクス

キーワード：ナノ構造物性 局在光・熱物性 熱伝導 フォノン

様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

光が物質に照射されると、光子が金属中の伝導電子に吸収され、電子の熱化を経てエネルギーは格子に移動する。ナノ構造では、パルスレーザーが当たると、この光誘起加熱によりナノ粒子は膨張する。これが格子原子の音響フォノンの瞬間的生成をもたらす。このようなナノ構造における光吸収や熱伝導についてナノスケールでの基礎的理解は十分でない。効率的に機能するナノ構造を設計するには、コヒーレントな熱伝達挙動についての分光学的特性評価は必須である。

2. 研究の目的

ナノ構造における熱伝播のダイナミクスを明らかにする。そのため、金属・半金属ナノ構造体、ナノワイヤ及び極薄膜を対象に、パルスレーザーによる電子励起から、引き続き熱応答のダイナミクスを超高速度非線形分光を用いて観測する。より具体的には、ナノ構造体の光ポンプ-光プローブ時間分解測定及び THz 時間領域測定等により、コヒーレント音響フォノンやキャリアのダイナミクスを観測し、光から電子・格子系へのエネルギー移動、熱化の過程および音響フォノンの閉じ込め効果等を明らかにする。ナノ構造に起因して発現する局在光・熱物性を評価するため、通常のラマン・赤外分光に加え、局在電位・電流分布による画像化を行う。併せ、顕微鏡的コヒーレント分光の手法の開発も目指す。

3. 研究の方法

主たる実験手段である、光ポンプ-光プローブ時間分解測定の概要を図1に示す。超短パルスレーザーには、パルス幅 7.5fs、中心波長 800nm、および繰り返し周波数 80MHz のフェムト秒チタンサファイアレーザーを使用した。

シェーカー-ステージ併用システム：発振されたレーザー光はビームスプリッターで、電子・格子を励起するポンプ光と、それを検出するプローブ光に分けられる。ポンプ光はシェーカーを経由して、プローブ光は時間遅延ステージを経由して試料にそれぞれ集光される。このシステムでは、シェーカーによるラピッドスキャン（時間領域 sub10fs~数 ps）で時間波形測定しながら、ステージを用い離散的に掃引する事により数 100ps の遅延時間も付与できる。試料から反射されたプローブ光はフォトダイオードによって検出する。このようにして、fs 時間オーダーのキャリア応答とコヒーレント光学フォノンに加えて、一般的に長い周期をもつと考えられるコヒーレント音響フォノンを同時に検出できた。

光ポンプ-光プローブ時間分解測定に加えて、極薄膜のキャリアのテラヘルツ (THz) 応答を調べるため THz 時間領域分光を行った。THz 領域での透過率測定では、広帯域・高強度 THz-TDS 測定系 (0-10THz ; ピーク電場~100kV/cm) を使用した。また、キャリアダイナミクスを調べるため、THz ポンプ-THz プローブ (遅延時間:0.2ps 間隔で-5ps~20ps) を行った。

局在光物性評価には、Witec 社 Alpha300SRA 顕微分光システム等を使用した。ナノ構造の顕微ラマン分光、光誘起局在電流・電位分布像、赤外発光特性等の計測・評価を行った。

4. 研究成果

1) Bi-Sb 系極薄膜におけるフォノン・キャリアダイナミクス

$\text{Bi}_{1-x}\text{Sb}_x$ 合金はその組成によって半金属からナロー・バンドギャップ半導体まで変化する特異な電子系を有する。また、(1) Dirac 電子系であり電子・正孔の移動度が大きく、(2) Sb ドープによりマルチバレーの縮退半導体化され、(3) 格子熱伝導が支配的で、(4) 特に 100 K 付近の低温領域や組成 $x = 0.2$ 未満で大きな熱電性能指数を示すため、熱電変換材料としても注目される系である [1-3]。格子熱伝導に関連しては、電子と比べ平均自由行程が大きいフォノンはナノ構造化の影響を受けやすいと考えられる。そこで、本研究では、膜厚 100nm 以下の $\text{Bi}_{1-x}\text{Sb}_x$ 合金の極薄膜に着目し、音響フォノンおよびキャリアのダイナミクスの研究を行った。ここでは、結晶性極薄膜の作成および測定結果について説明する。

① $\text{Bi}_{1-x}\text{Sb}_x$ 結晶性極薄膜および Bi ナノ粒子の作成

膜組成 ($x=0\sim 0.19$)、膜厚 (8nm~60nm) の $\text{Bi}_{1-x}\text{Sb}_x$ 結晶性極薄膜を作成した。作成法を以下に説明する。極薄膜試料は分子線エピタキシー法により作製した。蒸着作業はすべて 10^{-8}Pa の超高真空中で行った。まず、930K、3~5 秒間のフラッシングにより、Si(111)単結晶基板の 7×7 表面再構成化を行った。つぎに、K セルの加熱により Bi と Sb をそれぞれ蒸発させ、Si 基板上にエピタキシャル膜を成長させた。このとき、Sb 含有量は K セルの加熱温度設定により調整し

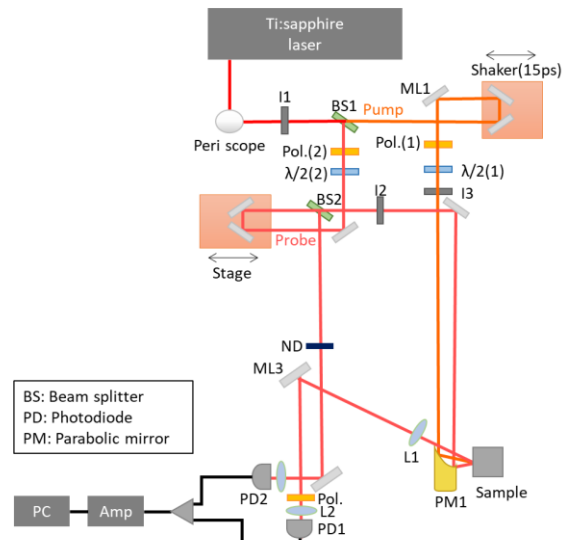


図1 光ポンプ-光プローブ時間分解測定模式図

た。薄膜は、蒸着後 360K で 10 分間アニールにより高平坦化した後、実験に供された。

作製薄膜の結晶性は反射高速電子線回折 RHEED により解析され、純 Bi 薄膜の場合 (001) 面を示すパターンが確認された。作成薄膜の膜厚は、原子間力顕微鏡 (Atomic Force Microscope; AFM) (WITec 社製) により、組成比は蛍光 X 線 (X-ray Fluorescence; XRF) 分析および X 線回折 (X-ray Diffraction; XRD) 法により評価された。また、Bi ナノ粒子の形成は、この Bi 極薄膜をさらに 300°C の温度で post-annealing することにより、実現された。

② コヒーレント音響フォノンと熱電変換特性

図 2(a) はシェーカー - ステージ併用システムを用いて得られた、Bi_{1-x}Sb_x 極薄膜 (組成 x=0.013、~膜厚 40 nm) の過渡反射率変化を示す。時間原点付近での応答には、高周波振動 (周期 T~0.3ps) が現れる。これはコヒーレント光学フォノンであり、フーリエ変換スペクトル (図 3(a)) に示されるように、Bi-Bi 伸縮振動 (2.9 THz)、Bi-Sb 伸縮振動 (3.6 THz) および Sb-Sb 伸縮振動 (4.5 THz) の三成分からなる。

光学フォノンによる変調に引き続き、ゆるやかな低周波の振動 (周期 T~20ps) が観測されている。対応して、(電子応答成分は差し引いた過渡反射率変化の) フーリエ変換スペクトルには ~50 GHz 付近にピークが現れる (図 3(b))。これが Bi_{1-x}Sb_x 薄膜に発生されたコヒーレント音響フォノンである。

この音響フォノン (低周波成分) が膜厚によってどのように変化するかを調べるために、異なる膜厚の薄膜について同様のポンププローブ測定を行った。3 つの光学フォノンの周波数 (~3THz) には、いずれのモードでも膜厚による変化が認められなかった。これに対し、音響フォノンの周波数は明らかな膜厚依存性を示した。すなわち、膜が薄くなるにつれ、次第に高周波側へシフトしていることが分かった。

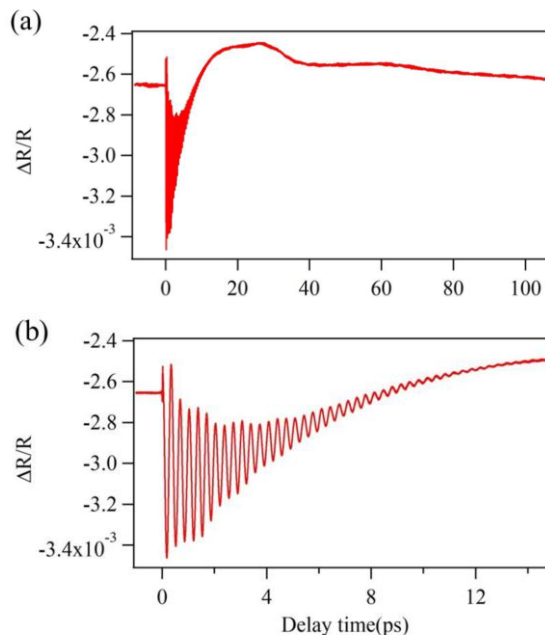


図 2 (a) Bi_{1-x}Sb_x 薄膜 (組成 x=0.013、~膜厚 40 nm) の過渡反射率の時間変化. (b) 時間原点付近の応答を拡大図

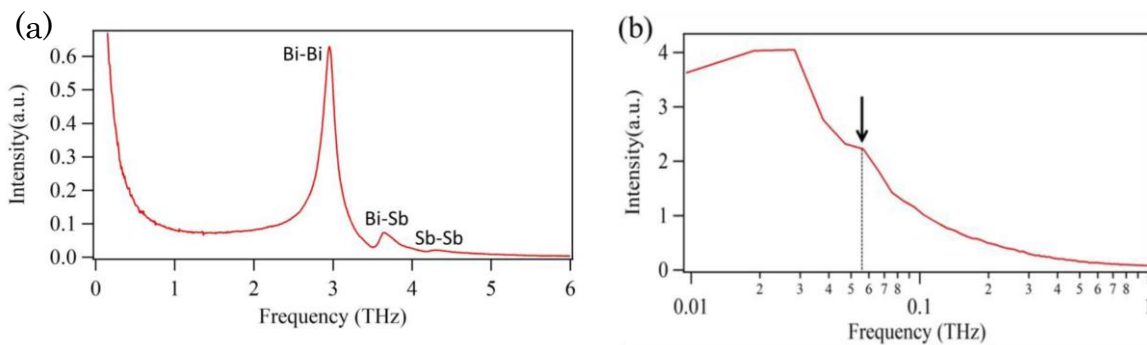


図 3 (a) 図 2 (b) のフーリエスペクトル、(b) 図 2 (a) のフーリエスペクトル

音響フォノンが膜中に閉じ込められると、波長 λ と膜厚 d とは $n\lambda/2=d$ の関係をもつので (n は整数)、周波数は $f=nv/2d$ となる (v は音速)。20nm 以上の厚膜側では、観測されたコヒーレント音響フォノンの周波数 f は膜厚 d に反比例することが分かった。これは、上記の関係を満たし、ナノ空間での音響フォノンの閉じ込めを示している。

ここで、次数 $n=1$ として、観測された周波数 f から Bi_{1-x}Sb_x 薄膜 (x~0.14) の音速 v を求めると、厚さ $d=19$ nm の場合 $v=2200$ m/s であった。この値は、厚膜側 (20nm~60nm) でほとんど一定であったが、バルクの音速 2661 m/s (*) と比べると小さい。この傾向は膜が薄くなると (<20nm)、さらに顕著となり、膜厚 10nm では 1200 m/s 程度まで減少した。表面領域では弾性定数の低下により音速が減少することが知られており、観測された音速減少は表面由来のフォノンに起因して現出するものと考えられる。実際、本研究で使用したレーザー光 (波長 ~800nm) の侵入長が Bi で ~17 nm であり、顕著な音速減少が始まる厚さ 20 nm に近く、この考えを支持する。* (バルク Bi および Sb のそれぞれの音速から、音速が組成に対して線形に変化するとして求めた)

この結果を熱電変換材料特性の観点から眺めてみよう。熱電変換材料の性能指標は B 因子と呼ばれるパラメータで議論することができる。B 因子によれば、熱電変換材料として適するものは、高い縮退度と大きなキャリア有効質量・移動度を有し、格子熱伝導が支配的かつ小さ

いことが要求される。ここで、格子熱伝導の観点から B 因子を表すと、 $B \propto 1/v_l = 1/v^2 \tau$: l は平均自由行程、 τ は緩和時間。薄膜や超格子、ナノワイヤなどナノサイズの物質系は、(量子)閉じ込め効果により性能指数が向上すると報告されている。これは、ナノ構造化によって界面の影響を大きく受け、本来の熱伝導能が制限されるため熱伝導率が低減すること—界面での散乱により τ が減少すること—に起因する。

上述したように、10nm の薄膜では音速はバルクの半分程度であり、 B 因子が v の 2 乗に反比例することから評価すると、熱電変換効率はバルクのほぼ 4 倍となることがわかる。このことから、薄膜化により熱電変換材料の性能向上が期待出来る。

③ THz 時間領域分光によるキャリアダイナミクス

$\text{Bi}_{1-x}\text{Sb}_x$ 結晶性極薄膜について、非線形 THz 光透過率測定および THz ポンプ-THz プロブ分光測定を行った。特に後者では、Dirac 電子系の励起に引き続き、キャリアの熱化に至る過程を捉えることができた。以下、より詳細について述べる。

THz 光透過率測定: $\text{Bi}_{1-x}\text{Sb}_x$ 合金はその組成によって半金属から半導体まで変化する特異な系であるが、このような電子構造の違いを反映し、THz 誘起透過率が半金属領域 ($0 \leq x \leq 0.02$) と半導体領域 ($0.07 \leq x \leq 0.16$) とでは顕かに異なる電場強度依存性を示した。

THz ポンプ-THz プロブ測定: 図 4 は $\text{Bi}_{1-x}\text{Sb}_x$ の THz 誘起透過率の時間変動である。時間原点付近に見られる、急激な透過率上昇は Dirac-like な伝導電子の THz 光電場による加速に対応する。続いて、数 ps で THz 誘起吸収が起き、やがて緩和することが透過率の時間曲線から分かる。この THz 誘起吸収の電場強度依存性は、Zener トネリング確率の計算で半定量的に再現できた。図 5 はこのような高強度 THz 励起ダイナミクスを模式化したものである。強い THz 電場下では電子の加速と Zener トネリングによるキャリア励起が起き、引き続く伝導帯と価電帯の励起キャリアの熱化は 10ps 程度の時間で起こることが、THz ポンプ-THz プロブ測定より明らかとなった。

2) ナノ構造の顕微分光

① 局在光物性解析・評価

主な成果を列記すると、

- ・グラフェン積層膜の顕微ラマン測定により、電子・格子間のファノ干渉の画像化に成功した。特に、単層グラフェン、電子・格子間結合がキャリアの熱化により増大することが明らかとされた。
- ・Au-nano array film/oxide/metal デバイスについて、光誘起電流に関する(近接場)顕微測定を行った。ナノ構造でのレーザー加熱に由来する局在誘起電流(電位)の生成を示唆する結果が得られた。
- ・Mo-nano array デバイスの作成及びその赤外発光特性解析を行った。これにより、本バイアスが高温 ($>1000^\circ\text{C}$)での使用に耐え、かつ高波長選択性の熱放出特性を発現することが確認された。
- ・高パワーのレーザー加熱を利用して Bi ナノ粒子を非晶質化し、これについて顕微ラマンの解析を行った。この結果、非晶質性 Bi ナノ粒子が、基板 Si の光学フォノンのラマン増強を(局在プラズモン励起により)強く発現することが明らかとなった。

② 顕微コヒーレント分光法の開発

ナノ構造の位置特定及び粒子間相互作用に起因するコヒーレンス緩和を防ぐ目的で、本法の開発を行った。試料の集光・観察には、分散を抑えるため反射型対物レンズを使用した。空間分解能は回折限界に近い $5.4 \mu\text{m}$ を、時間分解能は 16.8fs を達成している。このシステムを用い、グラフェン積層膜のコヒーレントフォノンの測定に適用し、C=C 伸縮振動 (G モード、周波数 $\sim 48 \text{THz}$) および面間振動モード (C モード、周波数 $< 1.4 \text{THz}$) について、周波数の層数依存性を 0.1TH 精度で検出できた。また、電子・格子ダイナミクスを時間スケール $\sim \text{fs}$ と空間スケール $\sim \text{nm}$ で観測手法として、時間分解 THz-STM の開発も行った。

5. 主な発表

論文等

[雑誌論文] (計 11 件)

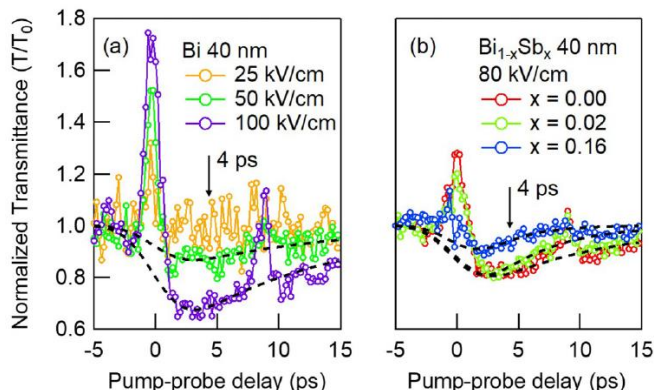


図 4 極薄 Bi 膜(a)および $\text{Bi}_{1-x}\text{Sb}_x$ 膜(b)の THz 誘起透過率の時間変動。

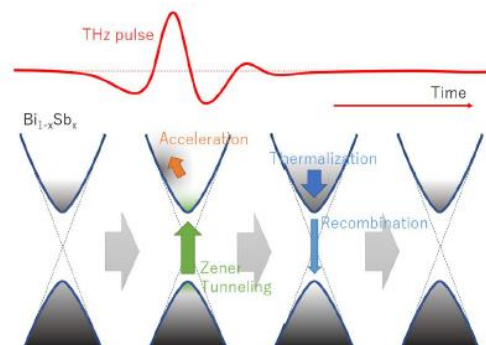


図 5 $\text{Bi}_{1-x}\text{Sb}_x$ における Dirac 電子系のキャリア生成・熱化ダイナミクスの模式図

- 1) “Laser-induced Structural Disordering and Optical Phase Change in Semimetal Bismuth Observed by Raman Microscopy”, Ørjan S. Handegård, Masahiro Kitajima, and Tadaaki Nagao, *Appl.Sur.Sci.* in press (available on online 3 May, 2019); 査読有.
- 2) “石井智, 長尾忠昭. ナノ粒子の光学共鳴を利用した光熱変換と太陽熱応用“, 光学, 2018, pp.375-380; 査読有.
- 3) “Demonstration of temperature-plateau superheated liquid by photothermal conversion of plasmonic titanium nitride nanostructures”, Satoshi Ishii, Ryosuke Kamakura, Hiroyuki Sakamoto, Thang D. Dao, Satish L. Shinde, Tadaaki Nagao, Koji Fujita, Kyoko Namura, Motofumi Suzuki, Shunsuke Murai, Katsuhisa Tanaka, 2018、Nanoscale. 10; 査読有.
- 4) “Terahertz-field-induced carrier generation in Bi_{1-x}Sb_x Dirac electron systems”, I. Katayama, H. Kawakami, T. Hagiwara, Y. Arashida, Y. Minami, L.-W. Nien, O. S. Handegard, T. Nagao, M. Kitajima, and J. Takeda, *Phys. Rev. B* 98, 2018, 214302-1-5, DOI: 10.1103/PhysRevB.98.21430; 査読有.
- 5) “All-Ceramic Solar-Driven Water Purifier Based on Anodized Aluminum Oxide and Plasmonic Titanium Nitride”, Kaur Manpreet, Ishii Satoshi, Shinde Satish Laxman, Nagao Tadaaki, *Advanced Sustainable Systems* 3, 2018, pp. 1800112~1800112, DOI: 10.1002/adsu.201800112; 査読有.
- 6) “Bias-induced Modulation of Ultrafast Carrier Dynamics in Metallic Single-Walled Carbon Nanotubes”, K. Maekawa, K. Yanagi, Y. Minami, M. Kitajima, I. Katayama, and J. Takeda, *Phys.Rev.B*, **97**, 2018,075435; 査読有.
- 7) “Interstitial-Dependent Enhanced Photoluminescence: A Near-Field Microscopy on Single Spheroid to Dimer, Tetramer, and Few Particles Gold Nanoassembly”, M. K.Hossain, M. Kitajima, K. Imura, and H. Okamoto, *J. Phys. Chem. C*, 2017, 121, pp.2344–2354; 査読有.
- 8) “Hole Array Perfect Absorbers for Spectrally Selective Mid-Wavelength Infrared Pyroelectric Detectors”, D.T. Dao, S. Ishii, T. Yokoyama, T. Sawada, S. Ramu Pasupathi, K. Chen, Y. Wada, T. Nabatame, T. Nagao, *ACS Photonics* 3, 2016, pp.1271-1278, DOI: 10.1021/acsp Photonics.6b00249; 査読有.
- 9) “Spectrally resolved detection in transient-reflectivity measurements of coherent optical phonons in diamond”, K. G. Nakamura, Kazuma Ohya, Hiroshi Takahashi, Tetsuya, Tsuruta, Hiroya Sasaki, Shin-ichi Uozumi, Katsura Norimatsu, Masahiro Kitajima, Yutaka Shikano, and Yosuke Kayanuma, *Phys.Rev. B*94, 2016, 024303-1-7; 査読有.
- 10) “Real-space coherent terahertz manipulation of electrons in a single tunnel junction”, K. Yoshioka, Ikufumi Katayama, Yasuo Minami, Masahiro Kitajima, Shoji Yoshida, Hidemi Shigekawa, and Jun Takeda, *Nature Photonics*, 2016, pp. 762-765 ; 査読有.
- 11) “Spectrally Selective Mid-Infrared Thermal Emission from Molybdenum Plasmonic Metamaterial Operated up to 1000 C”, T. Yokoyama, T.D. Dao, K.Chen, S. Ishii, R. P. Sugavaneshwar, Masahiro Kitajima, and Tadaaki Nagao, *Adv. Opt.Mater.* 2016, pp1-6; 査読有, 他.

[学会発表] (計 15 件)

- 1) “The thickness control of organic thin films for the evaluation of surface enhanced infrared absorption”, 生田咲智、鈴木裕史、島田 透、日本化学会第 99 春季年会、2019 年 3 月 16 日—19 日、甲南大学、神戸。
- 2) “Fabrication of nano-/micro Bismuth droplets and the effect of laser irradiation on morphology and Raman scattering”, HANDEGARD, Sele Orjan, KITAJIMA, Masahiro, NAGAO, Tadaaki, 第 79 回応用物理学会秋季学術講演会、2018 年 9 月 18 日-21 日、名古屋国際会議場、名古屋。
- 3) “サブ 10 fs ポンプ・プローブ分光によるグラフェンの超高速運動量緩和”, 奈良脩平、嵐田雄介、小野頌太、井ノ上泰輝、千足昇平、丸山茂夫、長尾忠昭、北島正弘、武田 淳、片山郁文、日本物理学会 2018 秋季大会、2018 年 9 月 11 日、同志社大学、京都。
- 4) “Nonlinear Terahertz Dynamics of Dirac Electrons in Bi Thin Films”, I. Katayama, Y. Minami, Y. Arashida, O. S. Handegard, T. Nagao, M. Kitajima, and J. Takeda (Invited Talk), SPIE Optics + Photonics 2018 , Aug.19-23, 2018, San Diego, USA.
- 5) “Single Particle Raman Scattering Spectroscopy from Bismuth Microdroplets on Silicon” , HANDEGARD, Sele Orjan, KITAJIMA, Masahiro, NAGAO, Tadaaki, The 4th Emallia Conference 2018, July 23-25, 2018, Hokkaido Univ. ,Sapporo.
- 6) "Ultrafast Carrier Generation in Bi_{1-x}Sb_x Thin Films Induced by Intense Monocycle Terahertz Pulses", I. Katayama, H. Kawakami, K. Araki, Y. Arashida, Y. Minami, L-W. Nien, O. S. Handegard, T. Nagao, M. Kitajima, and J. Takeda, International Conference on Ultrafast Phenomena 2018, July 15-20, 2018, Hamburg, Germany.
- 7) “Carrier Multiplication in Bismuth Investigated with Intense THz pump-THz Probe Spectroscopy”, Y. Minami, T.D. Dao, Tadaaki Nagao, Masahiro Kitajima, Jun Takeda, and Ikufumi Katayama, The Conference on Lasers and Electro-Optics(CLEO 2018), May 13-18, 2018, San Jose, USA.
- 8) “グラフェンにおける超高速応答のフェルミレベル依存性”, 片山郁文、井上慶一、嵐田雄介、北

- 島正弘、武田 淳、物理学会第 73 回年次大会、2018 年 3 月 22 日、東京理科大学、千葉。
- 9) “コヒーレントフォノン顕微分光による単結晶グラフェンの超高速ダイナミクス”、奈良脩平、嵐田雄介、井ノ上泰輝、千足昇平、丸山茂夫、北島正弘、武田 淳、片山郁文、第 65 回応用物理学会春季学術講演会、2018 年 3 月 19 日、早稲田大学、東京。
 - 10) 金ナノ四角柱周期配列における表面増強赤外吸収 “、島田 透、津島将導、中嶋 洋、石郷侑汰、熊谷遊太、千葉 豪、鈴木裕史、平成 29 年度 日本分光学会年次講演会、2017 年 5 月 23 日-25 日、早稲田大学西早稲田キャンパス、東京。
 - 11) “Chirality Dependent Coherent Phonon Dynamics in Carbon Nanotube Solutions”, I. Katayama, R. Xu, Y. Minami, K. Yanagi, M. Kitajima, and J. Takeda, The Conference on Lasers and Electro-Optics(CLEO 2017), May14-19, 2017, San Jose,USA.
 - 12) “Ultrafast Manipulation of Electron Transfer in a Tunnel Junction using CarrierEnvelope Phase Controlled THz-STM”, K. Yoshioka, I. Katayama, Y. Minami, M. Kitajima, S. Yoshida, H. Shigekawa, and J. Takeda, 24th International Colloquium on Scanning Probe Microscopy (ICSPM24), Dec.14-16,2016, Hawaii, USA.
 - 13) “Bi1-xSbx 単結晶薄膜におけるキャリアのテラヘルツ応答”, 川上紘貴、南 康夫、リウエイ・ニエン、長尾忠昭、北島正弘、武田 淳、片山郁文、日本光学会年次学術講演会、2016 年 11 月 02 日～ 2016 年 11 月 02 日、筑波大学。
 - 14) “Real-Space Control of the Electron Transfer in a Tunnel Junction with SingleCycle THz Electric Field”, K. Yoshioka, I. Katayama, Y. Minami, M. Kitajima, S. Yoshida, H. Shigekawa, J. Takeda, Ultrafast Dynamics at the Nanoscale 2016, Jul.13-16, Okinawa.
 - 15) “Femtosecond Carrier Dynamics of Metallic Single-Walled Carbon Nanotubes under Applied Bias-Voltage”, I. Katayama, K. Maekawa, Y. Minami, M. Kitajima, K. Yanagi, J. Takeda, International Conference on Ultrafast Phenomena 2016(UW4A.16), June 17-22, Santa Fe,USA, 他。

[図書] (計 1 件)

- 1) “Efficient Absorption of Sunlight Using Resonant Nanoparticles for Solar Heat Applications”, Ishii Satoshi, Chen Kai, Sugavaneshwar Ramu P., Okuyama Hideo, Dao Thang D., Shinde Satish L., Kaur Manpreet, Kitajima Masahiro, Nagao Tadaaki, in *Materials Nanoarchitectonics* 2018, 2018.

6. 研究組織

(1) 研究分担者

- ① 研究分担者氏名：長尾 忠昭
ローマ字氏名：Nagao Tadaaki
所属研究機関名：国立研究開発法人物質・材料研究機構
部局名：国際ナノアーキテクトニクス研究拠点
職名：MANA主任研究者
研究者番号（8 桁）：40267456
- ② 研究分担者氏名：島田 透
ローマ字氏名：Shimada Toru
所属研究機関名：弘前大学
部局名：教育学部
職名：講師
研究者番号（8 桁）：40450283
- ③ 研究分担者氏名：片山 郁文
ローマ字氏名：Katayama Ikufumi
所属研究機関名：横浜国立大学
部局名：大学院工学研究院
職名：准教授
研究者番号（8 桁）：80432532

(2) 研究協力者

- | | |
|--|--|
| <ol style="list-style-type: none"> ① 研究協力者氏名：石井 智(NIMS)
ローマ字氏名：Ishii Satoshi ② 研究協力者氏名：T.D.ダオ (NIMS)
ローマ字氏名：T.D.Dao ③ 研究協力者氏名：O.S.ハンデガート (NIMS 院生)
ローマ字氏名：O.S.Handegard | <ol style="list-style-type: none"> ④ 研究協力者氏名：嵐田 雄介 (横国大)
ローマ字氏名：Arashida Yusuke ⑤ 研究協力者氏名：田岡 裕貴 (横国大院生)
ローマ字氏名：Taoka Yuki ⑥ 研究協力者氏名：奈良 脩平 (横国大院生)
ローマ字氏名：Nara Yuhei |
|--|--|

※科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。