

令和 2 年 6 月 8 日現在

機関番号：24402

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2016～2019

課題番号：16K13822

研究課題名（和文）極限時空間分光法の開発と光誘起構造相転移研究への応用

研究課題名（英文）Ultrahigh time and space resolved spectroscopy and its application to the study of photo-induced phase transition

研究代表者

金崎 順一（Kanasaki, Jun'ichi）

大阪市立大学・大学院工学研究科・教授

研究者番号：80204535

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,000,000円

研究成果の概要（和文）： グラファイトを光励起することにより新規構造相が創成される現象について、核構造の形成とその周辺への新規構造相の成長過程を直接観察することに成功した。更に、光励起によりsp² sp³結合変換が起こること、核形成と新規構造相の成長過程が異なる励起波長依存性を明確にし、光による構造制御に向けた重要な基礎的知見を得た。

また、グラファイト関連物質であるグラフェンについて、光励起に対する構造安定性の研究を推進した。光照射時間に対するラマン散乱ピーク形状の変化を解析し、光励起により多層グラフェン領域から原子層が剥離脱離し、最終的に単層グラフェン構造が安定的に残ることを明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

グラファイトにおける光誘起構造相転移の過程で生成される核構造や新規構造相の成長過程の原子論的解明に成功すると共に、核形成と新規構造相の成長過程が示す異なる波長依存性を明確にした。物性物理学的に重要な知見を得ると共に、光による構造制御に向けた可能性を拓いた。

また、光励起に対するグラフェン構造の安定性が原子層数に強く依存することを発見し、光励起による単層グラフェンの精製技術の可能性を示した。グラフェンの特異な電子的特性や機械特性はグラフェンの原子層数に強く依存しており、本研究の成果は応用物理学及び材料科学分野において大きな波及効果が期待でき、社会的意義は大きいものと評価できる。

研究成果の概要（英文）： By using scanning tunneling microscopy, we have revealed the primary steps included in the excitation-induced phase transformation, such as nucleation and proliferation of sp³-like interlayer bonds. The growth mode of photo-induced structures strongly depends on the photon energy, and these results are interpreted by different dynamical pathways for the nucleation and proliferation of interlayer-bonded phase. The findings of our investigation can provide a key to the optical control of sp²-to-sp³ conversion and the organization with the nano-scaled products in graphene-related materials.

Also, we studied the structural stability of graphene on SiC under pulsed laser irradiations. We analyzed the evolution of 2D Raman peak of graphene layers, and revealed that optical excitation removes graphene layer selectively from multiple graphene-layer region, forming single atomic-layer graphene on SiC which is stable against the excitation.

研究分野：固体物性

キーワード：分光 光誘起相転移 新構造相創成 ナノ構造 グラファイト グラフェン

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

代表者は、炭素原子間 sp^2 結合による擬2次元ネットワークの積層構造であるグラファイトを光励起することにより、 sp^3 結合による層間結合を周期的に取り込んだ3次元的新規ナノ構造相 (Diaphite) へ構造相転移することを明らかにしてきた[1]。この成果は、光よってのみ創成可能な炭素系新規構造相への動的経路を開拓したとして大きな注目を集めた[2,3]。この光誘起構造相転移では、 sp^3 型原子層間結合の形成及びその増殖により現象が進行するものと考えられるが、新規構造相の生成過程に関する原子論的理解や構造変化の動的過程に関する実験的な知見は得られていなかった。一般に、構造相転移現象では、ナノスケールの核構造形成と周辺サイトでの構造相の成長が重要であり、トンネル顕微鏡等の原子スケールでの直接観察と共に、同じナノ領域における時空間分光する手法の開発が必須である。しかしながら、従来の光誘起構造相転移の測定で用いられていた極短パルス光による超高速光学分光法では、構造相転移過程におけるナノ構造変化の原子レベルでの直接観察やナノ構造の変化や増殖に関する動的過程を同時観察し、相転移現象に関する原子論的解明をおこなうことは困難であった。

ナノ分光の分野で発展目覚ましい近接場顕微鏡では、光をその波長以下の微細な穴を通す事により近接場を創り出し、回折限界を超えた空間分解能を得ている。しかしながら、近接場顕微鏡プローブによるイメージング分光の空間分解能は未だ数 10nm 程度あり、原子スケールの 100 倍程度に留まっているのが現状であった。これとは別の手法として、トンネル顕微鏡探針による光の局所電場増強効果を利用し、探針直下の原子サイトを局所分光する探針増強ラマン散乱分光法が開発されている。既に、Dong 教授(University of Science and Technology of China)のグループは、この手法により分子中の原子イメージ化に成功しているが[4]、物質の動的過程を測定するための時間分解計測機能も兼ね備えた局所分光手法が開発されていなかった。申請者は、反応場での動的過程を原子レベルで解明するには、原子スケールの空間分解能と格子振動周期程度の時間分解能を有する手法を融合した研究が本質的に重要と考え、本研究の着想を得た。

2. 研究の目的

(1) トンネル顕微鏡とラマン散乱分光法を融合したトンネル顕微鏡・探針増強ラマン散乱分光システムに、ポンプ・プローブ法による時間分解測定技術を導入し、フェムト秒スケールの時間分解能と原子スケールの空間分解能を備えた極限時空間ラマン分光法を開発する。

(2) 従来のトンネル顕微鏡・トンネル分光の手法に加え、ラマン散乱等の分光法等を光励起構造相転移の研究に導入し、実際に進行する反応場での構造変化や動的過程について原子論的理解を得る。

3. 研究の方法

(1) トンネル顕微鏡探針を接近させた試料表面にフェムト秒光パルスを照射し、探針による局所電場増強効果により、探針直下のナノ領域からのラマン散乱光のみを選択的且つ効率的に分光測定する。その為、現有のトンネル顕微鏡装置を改造すると共に、探針の条件・プローブ光条件・集光光学系について最適化を行う。更に、フェムト秒時間遅延機構を導入して、励起光により誘起される電子系・格子系の動的過程を、励起からの遅延時間を制御したプローブ光により時間分解的に測定できる探針増強ラマン分光システムを構築し、極限時空間・空間分解能を有する時空間分解ラマン散乱分光法の技術基盤を確立する。

(2) トンネル顕微鏡及び時空間分解ラマン散乱分光法を用いて、グラファイト及びグラファイト関連材料における光励起誘起構造変化・相転移現象の素過程に関する原子論的理解を得る。

4. 研究成果

当初、時空間ラマン分光測定システムの開発・測定に使用する予定であった強度増強型高感度 CCD 検出器の読み出し回路が故障し、使用することが不可能であることが初年度に判明した。その為、電子冷却型、液体窒素型 CCD 検出器を代用して計画の推進を試みた。散乱光の集光システム及びポンプ・プローブ測定に向けた時間遅延機構を構築し、システムの性能評価を行った。しかしながら、上記目的 1) を達成しうるに十分な感度を得ることができなかった。そこで、当初の計画を変更し、トンネル顕微鏡システム及び通常のラマン散乱分光システムを兼用することにより誘起構造の原子スケール観察と振動特性測定を行い、上記目的 2)、すなわち、グラファイト関連物質に対する光誘起構造変化・相転移過程の原子論的解明に関する課題を推進した。得られた成果を以下に概説する。

(1) グラファイトにおける光誘起構造相転移過程の原子論的説明

光励起によりグラファイト内にナノスケール秩序相 'Diaphite' を生成させる新規の動的反応経路を発見したが、この光誘起構造相転移現象の素過程について原子スケールでの完全な理解には至っていなかった。このナノ秩序相は、 sp^3 的な層間結合を周期的に取り込んだ構造をとるとされているが、本研究では、この光誘起構造相転移過程において生成される主要なナノ構造を明確にし、その成長過程に関する重要な知見を得た。本研究の成果は、稲見栄一准教授(高知工科大学)及び西岡圭太准教授(金沢工業大学)との共同研究によるものである。

グラファイトにフェムト秒レーザー光を照射し、走査型トンネル顕微鏡を用いて、励起前後の表面構造を原子スケールで観察した。Fig. 1 に光励起したグラファイト表面において観測される典型的なナノ構造のトンネル顕微鏡像を示す。Diaphite 相(Dc)以外に、微小な2つの構造が観察された。最も小さい構造(D_A)では単一原子サイトが明るい輝点を示しており、これは単一の sp^3 様層間結合に起因するものと考えられる。タイプ D_B は 1-5nm 程度のスケールに渡って明るい構造を示し、領域内で照射前の周期構造は保存されているという点でも D_C と異なる。これら2つのナノ構造は、Diaphite 相に先んじて生成され、特に、D_A 構造は励起の初期段階において優先的に生成されることが判明した。照射積算時間の増大とともに、D_A 構造に加えて D_B 構造の密度が増大を開始する。更に、照射積算時間が増大すると、D_A 構造密度は減少すると共に、D_C 構造密度が遅れて増大を始める。これらの結果により、Diaphite 相生成の初期過程は、 sp^3 型層間結合による核(D_A 構造)形成であり、それに引き続いて周辺領域で新たな層間結合が形成されることにより、新規構造相領域が成長していることが明確となった。

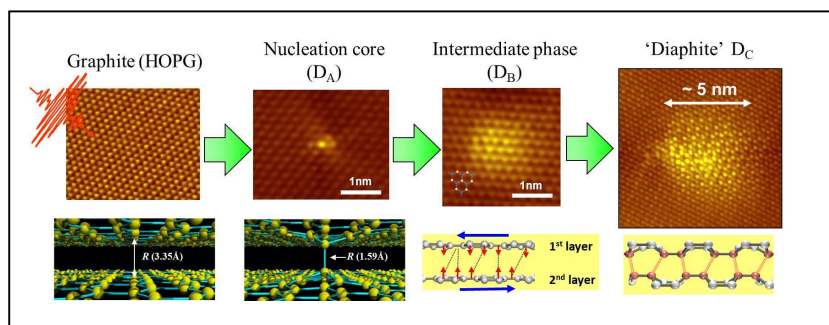


Fig. 1 光励起グラファイト表面に生成される典型的なナノスケール構造秩序相 (D_A, D_B & D_C) のトンネル顕微鏡像 (上の列) とその構造モデル (下の列)。

(2) グラファイトにおける構造相転移素過程における励起波長依存性

3つの異なる光子エネルギー (1.55, 3.1, 4.66 eV) でパルス光励起を繰り返し、表面構造の変化を走査型トンネル顕微鏡により直接観察した。成果1) で述べた3種のナノ構造について、照射積算時間に対するすべてのタイプのナノ構造全数密度、さらに生成されるナノ構造相の平均サイズを測定した。全数密度は同一照射時間に対して、光子エネルギーの増大につれて顕著に増大する。それに対して、ナノ構造相の平均サイズは光子エネルギーの増大に対して減少するという結果を得た。これらの結果は、①光子エネルギーが高い励起条件では、核構造(D_A タイプ)の生成、すなわち完全格子サイトにおける層間結合形成が効率的に発生する。②光子エネルギーが低い励起条件では、ナノ構造相の成長、すなわち、すでに存在する sp^3 層間結合の隣接サイトにおける新たな層間結合形成が効率的に発生する、ことが判明した。このように、ナノ構造相の生成・成長過程が強い励起波長依存性を示すことが本研究により明確となった。これらの結果は、層間結合による核形成と新規秩序相の成長過程に対する動的経路が異なることを強く示唆している。

本研究の結果は、新規秩序相の構造、スケール及びその組織化を光制御する可能性を拓く有意義な成果と評価できる。グラファイトにおける光誘起構造相転移に関する上述の成果(1)及び(2)について、理論的考察も含め、現在学術論文を執筆中である。

(3) グラファイトにおける光誘起 $sp^2 \rightarrow sp^3$ 結合形態変換のラマン分光分析

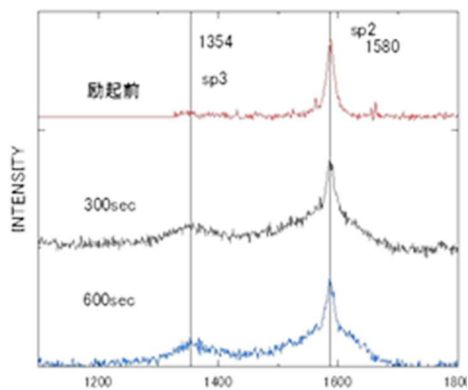


Fig.2 光励起前(赤線)及び300及び600 shot照射後に測定したグラファイトからのラマン散乱スペクトル。励起前のスペクトルにみられる 1580cm^{-1} のピークは sp^2 結合に由来するピーク。

グラファイトは sp^2 結合による炭素原子の六角網目状平面構造（グラフェン）が、弱いファンデルワールス結合で積層したものである。光誘起構造相転移による Diaphite 相創成では、原子層間での sp^3 結合形成がその主要過程であると考えられてきた。本研究では、光励起によるラマン散乱スペクトルの変化を観測し、光誘起構造相転移過程において $sp^2 \rightarrow sp^3$ 結合変換を示す確証を得た。

光源としてフェムト秒励起光（波長 800nm , 繰り返し周波数 1kHz, p 偏光）を用い、Diaphite 相が形成される強度で試料を連続的に照射した。ラマン散乱分光のプロブ光源としてダイオード励起固体レーザー（DPSS レーザー, 532nm, 100mW）を用い、試料表面からの散乱光を分光した後、液体窒素冷却タイプの CCD 検出器にて検出した。

Fig. 2 に光励起前後におけるラマン散乱スペクトルを示す。励起前には、 $1580cm^{-1}$ に鋭いピークが観測される。これは、炭素原子の sp^2 結合に由来するラマンピークである。このエネルギー領域においてこれ以外の構造が見られないことから、高配向性を保った試料であることがわかる。図中には、励起光の照射積算時間 300 及び 600 秒後に測定したラマンスペクトルも示す。照射時間が増大すると共に、① $1580cm^{-1}$ の鋭いピークの強度が減少すると共に、その周辺領域に広がったブロードな構造が成長する事、② 励起前には観察されなかった $1350cm^{-1}$ 周辺のブロードなピークが成長する事、がわかる。炭素原子の sp^3 結合に由来する振動は $1330cm^{-1}$ 近傍にピークを形成することが知られており、本研究の結果は、光励起により炭素原子の結合形態が変化することを明確に示している。更に、観測された鋭いピークと二つのブロードなピークをローレンツ関数によりフィッティングして分離し、積算照射時間に対する強度の変化を測定した。その結果、 sp^2 由来の鋭いピークとそれ以外のブロードなピークの強度が反相関の関係で変化することがわかった。以上の結果は、光励起により sp^2 結合の一部が sp^3 型結合に変換され、照射時間の増大と共に sp^3 結合が増殖することを示している。以上の結果より、Diaphite への相転移過程における sp^3 型結合形成の重要性が示された。

(4) 光励起に対するグラフェン原子層の構造安定性

—構造安定性の原子層数依存性—

佐賀大学放射光研究センターにおいて、face-to-face 加熱蒸着法によるグラフェン合成装置を用いて SiC 基盤上にグラフェンを数層合成した。合成した試料を double phonon scattering に起因する 2D ラマンピークに着目してラマン散乱スペクトルを測定し、その形状からグラフェンの原子層数に関する情報を得た。光励起（400nm, $160mJ/cm^2$ ）前後のラマンスペクトルから 2D ラマンピークを抽出したものを Fig. 3 に示す。上から順に励起光照射前（緑）、400shot 後（赤）、1200shot 後（青）のスペクトルである。光励起前には $2702cm^{-1}$ にピークを持つブロードな形状のピークが観測された。積算照射回数が増大すると共に、2D ピークのピーク位置が低波数側にシフトしていることが分かる。1400shot 以上（図にはスペクトルは示していない）においては、2D ピークのエネルギーシフト及びピーク強度の変化は観測されなかった。これらの結果は、合成した直後の初期構造は光励起に対して不安定であり、繰り返し照射により構造変化を起こして、最終的に安定な構造に到達したものと結論付けることができる。

照射前後の 2D ラマンピークを、単層グラフェンからの 2D ピーク成分と 2 層グラフェンの 2D ピーク成分の二つのピーク成分で最適化した結果を Fig. 3 に示す。最適化に用いたピーク成分にはローレンツ関数を用いた。各スペクトルにおいて、点線は $2702cm^{-1}$ にピークを持つ単層グラフェンからの 2D ピーク成分、破線は $2707cm^{-1}$ にピークを持つ 2 層グラフェン領域からの 2D ピーク成分であり、実線は二つの成分の和で、測定スペクトルを最適化した結果である。図に示したように、実測したラマンスペクトルは、単層及び 2 層グラフェン成分の和で再現することができた。実測したスペクトルの変化は、2 層グラフェンと単層グラフェンの領域比が光励起により変化したことによると理解できる。

Fig. 3 に示すように 2D ラマン散乱ピークを解析することにより、光励起による単層及び 2 層グラフェン領域比の変化を得た。照射前の 2D ピ

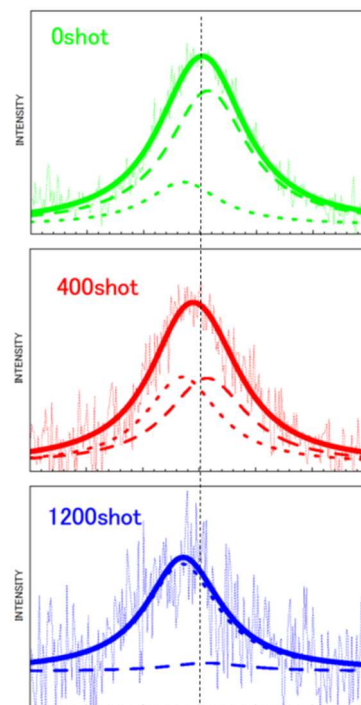


Fig.3 フェムト秒光励起 (400nm, $160mJ/cm^2$) による SiC 上に合成したグラフェン膜の double-phonon scattering 2D ラマンピークの変化。上より、励起前、400shot、1200shot 照射後のスペクトル。スペクトル中の実線は、単層グラフェン（点線）及び 2 層グラフェン（破線）の成分により実験結果を最適化したスペクトル。

ークは、2層グラフェンと単層グラフェンが3:1の強度比で再現できる。積算照射回数が増大するにつれて、2層グラフェン成分の強度は減少し、一方、単層グラフェン成分は増大していく。1200shot以上では、2層グラフェンと単層グラフェンの成分比は1:14となり、ほぼ全面にわたって単層グラフェンが分布していると考えられる。すでに申請者が報告しているように、グラファイト（多層グラフェン）に光を繰り返し照射すると、最外原子層の剥離性脱離が発生することが知られている[5]。今回のスペクトル変化は、2層グラフェン層領域から最外層の単層グラフェンが選択的に剥離性脱離することにより、単層グラフェン領域が広がること、また、今回の励起条件ではSiC上に合成された単層グラフェンは変化せず、構造的に安定であるものと結論できる。

光励起に対する単層グラフェン層の構造安定性を更に明確にするため、160mJ/cm²励起により単層となったグラフェン層に、更に強い強度の励起光照射を行った。その結果、320mJ/cm²の光励起によってもラマンスペクトルに変化は現れず、単層グラフェン構造はこの強度以下においては安定であることが判明した。これらの結果より、グラフェンの原子層数によって、光励起に対する構造安定性が異なることを明確にすることができた。観測された構造安定性の層数依存性は、グラフェン第1層及び第2層内での炭素原子で、SiC基盤の表面原子との相互作用に違いがあることに起因していると考えられる[6]。

今回の成果は、光励起により多層グラフェン領域の最外層を選択的に剥離・除去することが可能であることを明確に示しており、光による原子層の剥離性脱離によるグラフェン関連材料の物性制御に向けた可能性を切り開くものと期待できる。

引用文献

- [1] J. Kanasaki, E. Inami, K. Tanimura, H. Onishi, and K. Nasu, *Physical Review Letters* **102**, 087402 (2009).
- [2] *Nature* **458**, 129 (2009).
- [3] *Nanotechnology* **4**, 298 (2009).
- [4] R. Zhang, Y. Zhang, Z. C. Dong, et al., *Nature* **498**, 82 (2013).
- [5] H. Ohnishi, E. Inami, J. Kanasaki, *Surface Science* **605**, 1497 (2011).
- [6] A. Mattausch and O. Pankratov, *Physical Review Letters* **99**, 076802 (2007).

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計5件（うち査読付論文 5件/うち国際共著 4件/うちオープンアクセス 5件）

1. 著者名 Kanasaki J., Yamamoto I., Azuma J., Fukatsu S.	4. 巻 96
2. 論文標題 Electronic structure of the surface unoccupied band of Ge(001)-c(4×2): Direct imaging of surface electron relaxation pathways	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 115301-1-7
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） https://doi.org/10.1103/PhysRevB.96.115301	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 Kanasaki Jun'ichi, Tanimura Hiroshi, Tanimura Katsumi, Ries Philip, Heckel Wolfgang, Biedermann Kerstin, Fauster Thomas	4. 巻 97
2. 論文標題 Ultrafast dynamics in photoexcited valence-band states of Si studied by time- and angle-resolved photoemission spectroscopy of bulk direct transitions	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 035201-1-6
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） https://doi.org/10.1103/PhysRevB.97.035201	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 Sjakste Jelena, Vast Nathalie, Barbarino Giuliana, Calandra Matteo, Mauri Francesco, Kanasaki Junichi, Tanimura Hiroshi, Tanimura Katsumi	4. 巻 97
2. 論文標題 Energy relaxation mechanism of hot-electron ensembles in GaAs: Theoretical and experimental study of its temperature dependence	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 064302-1-9
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） https://doi.org/10.1103/PhysRevB.97.064302	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 H. Tanimura, J. Kanasaki, K. Tanimura, J. Sjakste, N. Vast, M. Calandra, and F. Mauri	4. 巻 93
2. 論文標題 Formation of hot-electron ensembles quasiequilibrated in momentum space by ultrafast momentum scattering of highly excited hot electrons photoinjected into Γ -valley of GaAs	5. 発行年 2016年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 161203(R)-1-5
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 11.1103/PhysRevB.93.161203	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 N. Itoh, C. Itoh, and J. Kanasaki	4. 巻 11
2. 論文標題 Comparison of electronic-excitation-induced structural modification of Carbon-based nanomaterials with that of semiconductor surfaces	5. 発行年 2016年
3. 雑誌名 NANO	6. 最初と最後の頁 1630001-1-17
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1142/S1793292016300012	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15件 (うち招待講演 3件 / うち国際学会 7件)

1. 発表者名 E. Inami, K. Nishioka, J. Kanasaki, K. Tanimura
2. 発表標題 Optical Control of Structural Transformation to Form Nano-scaled Order Phases Including sp ³ -like Bonds in Graphite
3. 学会等名 The 22nd SANKEN International Symposium/ The 17th SANKEN Nanotechnology International Symposium (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 J. Kanasaki
2. 発表標題 Momentum Space View of Ultrafast Carrier Dynamics in Photo-excited Optoelectronic Semiconductors
3. 学会等名 The 2017 EMN Optoelectronics Meeting (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 金崎順一
2. 発表標題 光による電子励起物性科学：励起キャリアの緩和動力学と新規表面構造相の創成
3. 学会等名 第7回物質・デバイス領域共同研究拠点活動報告会及び28年度ダイナミックアライアンス成果報告会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 金崎順一、山本勇、東純平、深津晋
2. 発表標題 ゲルマニウムにおける励起電子系の超高速動力学
3. 学会等名 日本物理学会 2017年秋季大会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 金崎順一
2. 発表標題 光による半導体表面構造秩序の変換
3. 学会等名 大阪大学産業科学研究所学術講演会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 金崎順一
2. 発表標題 フェムト秒時間・角度分解光電子分光法による超高速キャリア緩和過程の多次元イメージング
3. 学会等名 日本物理学会2016年秋季大会
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 金崎順一、山本勇、東純平
2. 発表標題 時間角度分解2光子光電子分光法によるGe(001)-c(4x2)表面非占有バンド構造の決定
3. 学会等名 日本物理学会2016年秋季大会
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 谷村克己、谷村洋、金崎順一
2. 発表標題 光励起による半導体価電子正孔系の緩和動力学：時間・角度光電子分光法による観測
3. 学会等名 日本物理学会2016年秋季大会
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 J. Kanasaki, I. Yamamoto, J. Azuma
2. 発表標題 Electronic Structure of Surface Conduction Band of Ge(001)-c(4x2) and Ge(111)-c(2x8) Surfaces Studied by Two-photon Photoelectron Spectroscopy
3. 学会等名 Atomically-Controlled Surfaces, Interfaces & Nanotechnology (ACSIN) 2016 (国際学会)
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 金崎順一、山本勇、東純平
2. 発表標題 角度分解2光子光電子分光法によるGe(001)-c(4x2)表面非占有バンド構造の決定
3. 学会等名 第36回表面科学学術講演大会
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 J. Kanasaki, I. Yamamoto, J. Azuma, S. Fukatsu
2. 発表標題 Band Structure and Electronic Dynamics at Ge(001) and (111) Surfaces
3. 学会等名 The 20th SANKEN International, The 15th SANKEN Nanotechnology Symposium (国際学会)
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 J. Kanasaki, I. Yamamoto, J. Azuma, S. Fukatsu
2. 発表標題 Direct Imaging of Surface Electron Relaxation and Surface Conduction Band Structures of Ge(001) and (111) Surfaces
3. 学会等名 Symposium on Surface Science & Nanotechnology 2017, Kyoto (Japan) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 J. Kanasaki
2. 発表標題 Momentum Space View of Ultrafast Carrier Dynamics in Photo-Excited Semiconductors
3. 学会等名 The 3rd Annual World Congress of Smart Materials 2017 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 金崎順一
2. 発表標題 フェムト秒時間分解光電子分光法による超高速キャリア動力学の多次元イメージング：第12回励起ナノプロセス研究会
3. 学会等名 応用物理学会 第12回励起ナノプロセス研究会 (招待講演)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 E. Inami, K. Nishioka, J. Kanasaki,
2. 発表標題 Optical Control of Structural Transformation to Form Nano-scaled Order Phases Including sp ³ -like Bonds in Graphite
3. 学会等名 15th International Conference on Laser Ablation (COLA-2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔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	木曾田 賢治 (Kisoda Kenji) (90243188)	和歌山大学・教育学部・教授 (14701)	