

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 5 年 6 月 2 日現在

機関番号：24405

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2019～2022

課題番号：19H01826

研究課題名(和文) 時間・角度分解光電子差分分光による正孔動力学多次元イメージ法の開発

研究課題名(英文) Multi-dimensional imaging of photo-injected holes by means of time- and angle-resolved photoelectron difference spectroscopy

研究代表者

金崎 順一 (Kanasaki, Jun'ichi)

大阪公立大学・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) 13,700,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、光励起前後において時間分解光電子分光スペクトルを測定し、それらの差分分光スペクトルを経過時間に対して画像化することにより、従来の時間分解分光測定により得られる伝導帯励起電子系の情報のみでなく、これまで得ることが困難であった価電子正孔系の密度分布の時間発展についても直接的な知見を得た。光励起により半導体物質の伝導帯に励起電子系を、価電子帯に正孔系を注入し、これらキャリア系の密度分布がエネルギー及び運動量空間において時間発展する現象を実時間追跡することにより、励起キャリア系の緩和動力学を支配する散乱過程に関する直接的知見を得た。

研究成果の学術的意義や社会的意義

半導体を光励起すると、伝導帯に励起電子系、価電子帯に正孔系の非平衡分布が形成される。これら励起キャリア系は、エネルギー・運動量空間において種々の散乱過程を経て、バンド端まで緩和し、最終的には再結合等を介して消滅する。励起キャリア系の緩和現象は、非平衡量子多体系の動的振る舞いが顕著に現れる典型的な物理現象であり、学術的に重要である。更に、本研究課題の内容は、半導体物質における電荷輸送・熱輸送・発光・スピン伝導といった基礎的特性、光誘起構造変化・光触媒といった励起誘起現象等にも直接的・間接的に関与しており、その全貌の解明は広い産業分野において波及効果が大きく、極めて重要である。

研究成果の概要(英文)：Time- and angle-resolved two-photon photoelectron (2PPE) spectroscopy has elucidated the ultrafast dynamics of excited electrons in the energy- and momentum-spaces. On the other hand, our knowledge of the relaxation dynamics of holes injected in the valence band has been limited. In this project, the time- and angle-resolved photoelectron differential spectroscopy was used to investigate the ultrafast dynamics of valence holes in silicon, where holes are injected in the valence band by 1.48-eV pump laser pulses and then 5.92-eV laser light was used to eject photoelectrons via resonant direct transitions between the valence states and free electron-like states located above the vacuum level. Based on the experimental results on the temporal change of photoelectron images together with calculated results, we have elucidated ultrafast population dynamics of photoexcited electrons and holes in photoexcited semiconductors.

研究分野：固体物性

キーワード：半導体 光励起 キャリアダイナミクス 正孔動力学 時間角度分解光電子分光法 光電子差分分光法 フェムト秒レーザー 超高速緩和現象

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、研究者個人に帰属します。

1. 研究開始当初の背景

半導体を光励起すると、伝導帯に励起電子系、価電子帯に正孔系の非平衡分布が形成される。これら励起キャリア系は、エネルギー・運動量空間において種々の散乱過程を経てそれぞれのバンド端まで緩和し、最終的には電子・正孔再結合発光等を介して消滅する。これら一連の光励起キャリア系の緩和現象は、非平衡量子多体系の動的振る舞いが顕著に現れる典型的な物理現象であると共に、応用的には、半導体物質における電荷輸送・熱輸送・発光・スピン伝導といった基礎的特性や、光誘起構造変化・光触媒といった光機能性に直接的・間接的に関与しており、その全貌の解明が強く求められてきた。

キャリア系の主要な散乱過程として、キャリア-キャリア散乱及びキャリア-フォノン散乱があるが、これらの散乱は数 10 フェムト秒(fs)からピコ秒(ps)程度の時定数で発生し、励起キャリアのエネルギー・運動量空間における緩和動力学を支配している。極短パルスレーザー技術の進歩により、フェムト秒時間スケールでの時間分解測定が可能となり、国内外の多くグループによりキャリア緩和動力学の研究が進められてきた。初期の動力学研究において行われた吸収・発光などの時間分解光学分光測定は、キャリア系の動的挙動に関する重要な知見を与えてきたが、1)キャリア系の運動量に関する情報が完全に欠落している事、2)測定により得られる誘電関数には電子と正孔両方の分布関数が複雑に混じりこんでおり、電子と正孔の動的挙動の情報を分離して得ることが困難である事、が指摘されてきた。これに対して、時間・角度分解 2 光子光電子分光法は、エネルギー・運動量空間における伝導帯励起電子系の密度分布の時間発展を、正孔と分離して、且つ、直接的に測定可能なことが最大の特長である。しかしながら、価電子帯正孔系については、未だに光吸収や発光等の光学的分光測定を通してしか研究がなされておらず、正孔系の動的振る舞いを直接観察する手法の開発が急務であった。

2. 研究の目的

本研究の目的は、1) 価電子正孔系の超高速緩和過程を直接観察する為の新たな手法として、光電子分布の多次元差分イメージ法の可能性を明確にする事、更に、通常の 2 光子光電子分光法と差分分光法との併用により、2) 半導体における伝導帯励起電子系・価電子帯正孔系のキャリア緩和現象や光学特性を総合的且つ統一的に理解する事、である。

3. 研究の方法

研究手法

- (i) 時間・角度分解光電子差分分光の手法を用い、価電子帯正孔の密度分布を時間・エネルギー・運動量 (表面に平行な 2 次元ベクトル空間) の多次元空間において直接観察し、正孔系の緩和動力学を解明した。
- (ii) 時間・角度分解 2 光子光電子分光を用いた分光測定を実施し、伝導帯励起電子系の時間・エネルギー・運動量の多次元空間において緩和動力学を解明した。
- (iii) 第一原理計算による理論的結果と分光学的実験結果との比較検討を行い、エネルギー・運動量の緩和を支配するキャリア散乱素過程を明確にした。

4. 研究成果

4-1 シリコンにおける価電子正孔系の緩和動力学

試料として B ドープ Si(111)-7x7 を用い、励起光 ($\epsilon_{ph}=1.49$ eV, 200fs) によるバンド間光学遷移により正孔系を価電子帯に注入した。励起直後からの価電子正孔系の動的挙動を測定するため、励起光の 4 倍波 (5.96 eV, p-pol.) を用いた光電子差分分光測定を実施した。図 1(a) は励起光入射前 1.5ps において測定した価電子バンドのイメージである。光電子強度が強い領域が明るくなるようにカラー表示されている。図の横軸は放出角 θ (表面法線方向をゼロとする) を、縦軸はフェルミエネルギーを基準にしたエネルギー ϵ を示す。強い分散構造を示す光電子イメージは、バルク価電子バンドから真空準位の上にある free-electron like なバンドへの共鳴遷移によるものである。図 1(c) 及び (d) は、それぞれ、 $\theta = -5^\circ$ と $+5^\circ$ の方向に放出された光電子のエネルギースペクトルである。各図において、黒・赤・青の実線は、励起光とプローブ光の間の遅延時間 t_d がそれぞれ -1.5 ps (Black), +0.1ps (Red), +0.5ps (Blue) に対する結果である。励起光の照射により光電子強度は大きく減少 (0.1ps) した後、回復している (0.5ps) ことが分かる。この強度の減少は、励起光によるバンド間光学遷移に伴い、価電子帯へ正孔が注入されたことによるものである。励起後の異なる遅延時間に対する光電子分布画像を測定し、図 1(a) からの差分を取ることで、価電子帯に注入された正孔系密度分布の時間発展を得た。 $t_d = 0.1$ ps における差分イメージを図 1(b) に示す。図中価電子正孔密度の高い領域が明るくなるよう表示した。

本研究では、 $t_d = -1.5 \sim +1000$ ps の範囲において、差分光電子画像 (価電子正孔密度分布) を測定した。3つの異なるエネルギー領域での正孔密度の時間変化を図 2(a) にまとめる。ここで、各データの最大値が 1 になるように設定し、各エネルギーにおける正孔密度の時間変化を比

較した。正孔密度は光励起により急激に増大した後、励起後1psまで急激に減衰した(成分1)後、ゆっくりと消滅しており(成分2)、その時間変化の特徴は測定したエネルギー位置で相違は見られない。図2(b)は観測した全エネルギー領域において積算した正孔密度の時間変化を示す。価電子

正孔系の緩和過程は時定数 0.8ps 及び 180ps で特徴づけられる 2つの過程により支配される。

図1(c)及び(d)からわかるように、緩和成分1はピークエネルギー位置及びピーク幅の急速な変化を伴っている。この変化を詳しく見るため、表面垂直方向の光電子スペクトルの時間発展を図3に示す。励起前に観察される鋭いピーク(16.5 eV)は、励起時($t_d=0$)にその強度が大きく減少すると共に、そのピークエネルギーのシフトとピークエネルギー幅の増大が起こる(グラフ中赤実線)。図4に、ピーク強度(a)・ピークエネルギー(b)・ピーク幅(c)の時間変化を示す。励起光とプローブ光の重なりに従ってピークプロファイルの急速な変化が生じている。励起後2psまでにピークエネルギーとピーク幅は完全に回復しているのに対して、ピーク強度は87%までしか回復しておらず、その後数百psの時間スケールで緩やかに回復することが分かった。観測された2つの回復過程はいずれも励起光とプローブ光の重なり時間よりも長い時間を費やしているため、価電子帯光電子ピークの回復過程に正孔のバンド内緩和が関与していると結論できる。

ピークプロファイルの時間変化をいくつかの異なる励起強度に対して行った。図5にピーク幅の広がりや表面近傍に注入された正孔密度に対してプロットした結果であり、ピーク幅は正孔密度の3分の1乗に比例して増大した。キャリアーキャリア散乱(c-c)の効率がキャリア密度の3分の1乗に比例することから、励起直後における光電子ピーク幅の変化は、クーロン相互作用によるc-c散乱効果であると結論した。もう一つのスペクトル変化の特徴としてピークエネルギー位置の変化が観測されたが、この結果は、電子バンド構造の変化を強く示唆している。本研究で用いた励起強度領域においては、励起キャリア密度がMott density(約 $4.4 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ at 11 K)を超えており、電子相関相互作用を介したバンドの再構成が関与している可能性が高い。異なる励起光($\epsilon_{ph}=2.06\text{eV}$)条件において行った先行実験においても同様な結果が観測されている。従って、観測された現象は波長によらず、バンド間の高密度励起により観測される一般的な現象といえる。

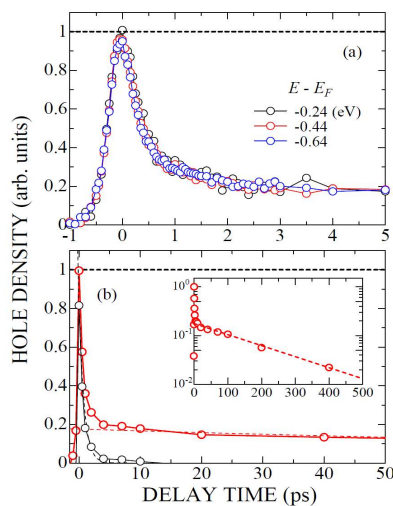


Fig. 2 (a) The hole density in the VB states at different energies, as a function of delay time. (b) Total density of valence holes as a function of delay time. The inset shows the same data plotted on a semi-logarithmic scale over the enlarged delay time range.

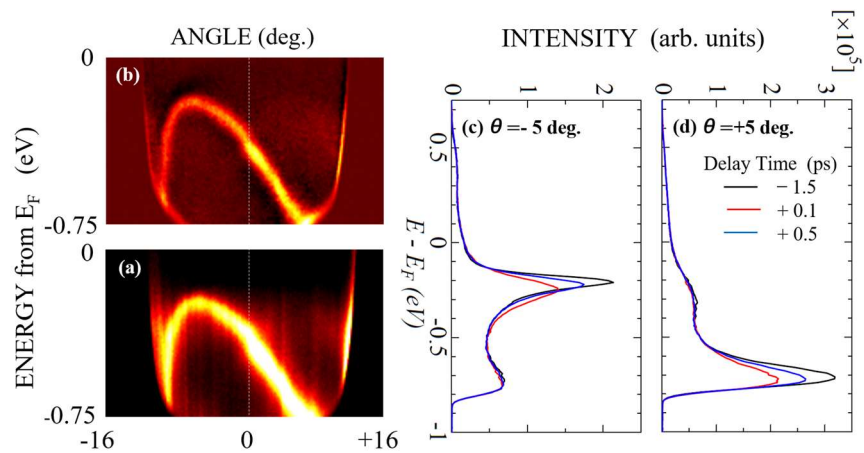


Fig. 1 (a) Photoelectron (PE) image from Si(111)7x7 with 5.96-eV probe light. (b) Differential PE image at delay time of 0.1ps. (c)(d) Energy spectra of photoelectrons emitted at -5 and +5 degree, respectively, from the surface normal, acquired at delay times of -1.5 (black lines), 0.1 (red lines), and 0.5ps (blue lines).

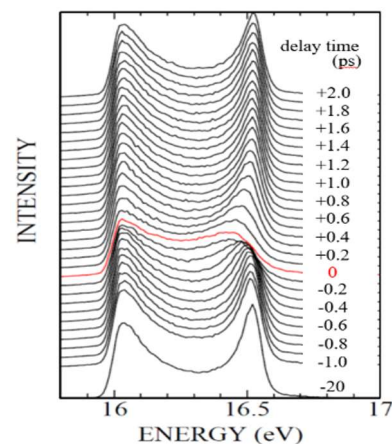


Fig. 3 (a) Normal emission photoelectron spectra measured at different delay times between the pump and probe laser pulses.

光子エネルギー $\varepsilon_{ph} = 2.06\text{eV}$ の励起光パルスを用いた場合の、光電子エネルギー $\varepsilon = -0.3\text{eV}$ における光電子差分強度（正孔密度）の時間変化を図6に示す。 $\varepsilon_{ph} = 1.49\text{eV}$ の場合(図2)と異なり、正孔密度は $t_d = 0\text{ps}$ においてピークを形成した後、更に 5ps 程度まで徐々に増大していく事が分かる。 $\varepsilon_{ph} = 2.06\text{eV}$ 励起の場合、価電子带上端から深さ約 1eV 程度までの広いエネルギー領域に渡って正孔が注入される。 $\varepsilon_{ph} = 1.49\text{eV}$ の結果との比較より、 $t_d = 0\text{ps}$ における急激な正孔密度の増大は、バンド間遷移により直接的にプローブエネルギー領域に注入された正孔によるものと結論できる。一方、緩やかに増大する成分は、深い準位に注入された正孔が価電子バンド内を緩和してきたことによるものであり、価電子バンド内での正孔のエネルギー緩和には数 ps の時間を要することがわかった。

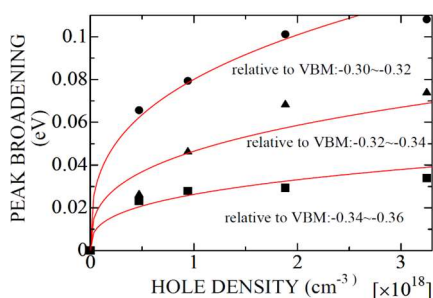


Fig. 5 The peak broadening at different energies, as a function of the density of holes injected in the valence band.

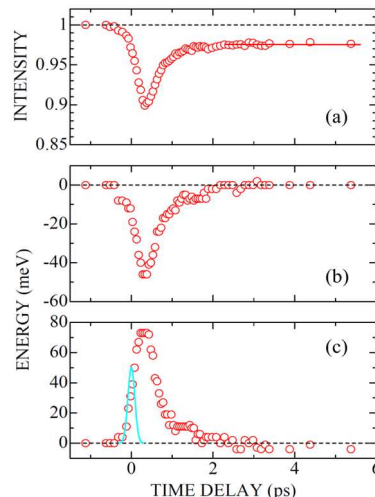


Fig. 4 Time evolution of intensity, (a), energy shift, (b), and energy width, (c), of the peak of photoelectrons emitted via resonant transitions by 5.96-eV probe light.

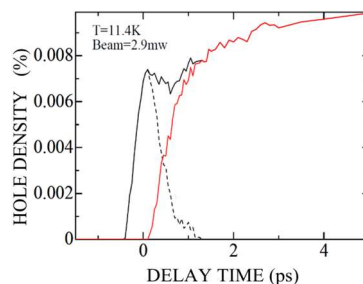


Fig. 6 Time evolution of the hole density of the probed energy regime upon 2.06-eV pumping.

4-2 ゲルマニウムにおける励起電子系の超高速緩和動力学

シリコンと同じIV族の単元素半導体であるゲルマニウムのp-typeウエハを試料として用い、光励起により伝導帯に注入した励起電子系の密度分布をエネルギー・運動量及び時間の関数として画像化した。フェムト秒パルス(800nm, 100fs, s-pol.)を励起光源として電子系を伝導帯 Γ バレーに注入して非平衡電子系を発生させ、その後の励起電子系の密度分布の変化をプローブ光(266nm, p-pol.)により追跡した。励起直後からの励起電子系密度分布の時間発展を測定した結果をFig.7に示す。縦軸のエネルギーは伝導帯下端(CBM)を基準としている。励起直後(0ps)において0.8, 0.65及び0.45 eV近傍に観測される光電子集団は、3つの価電子バンド(hh , lh , so)を始状態として伝導帯 Γ バレーに励起された電子による。 Γ バレー内に注入された励起電子系は、その後速やかに別のバレーへと散乱され、広い波数領域に再分配された(運動量緩和)。 Γ バレーからのバレー間散乱時定数は $10\sim 20\text{fs}$ と評価した。バレー間散乱により運動量空間において広く再分配された励起電子系は、その後 $1\sim 2\text{ps}$ の時間スケールでCBMまでエネルギー緩和していることが分かる。緩和励起電子系は、CBM近傍において熱化し電子系内のみで熱平衡に到達(準平衡状態の形成)した後、励起後 3ps 程度で格子系との熱平衡が実現した。伝導帯内にお

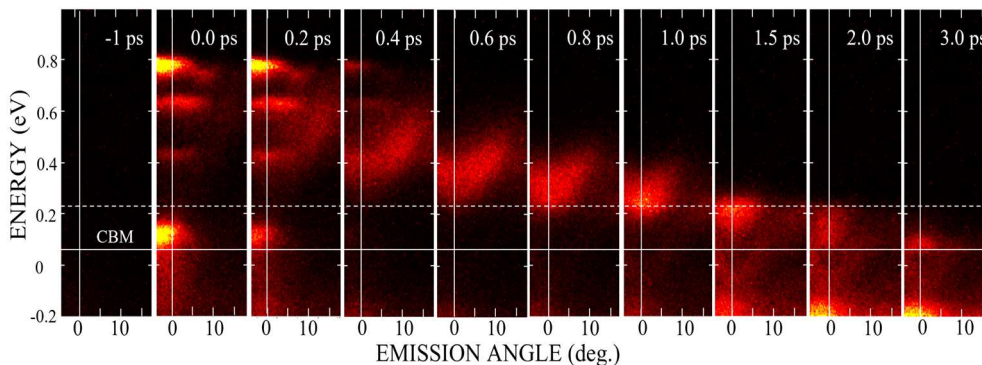


Fig. 7 Temporal change of photoelectron image $I(\varepsilon, \theta)$ as a function of delay time.

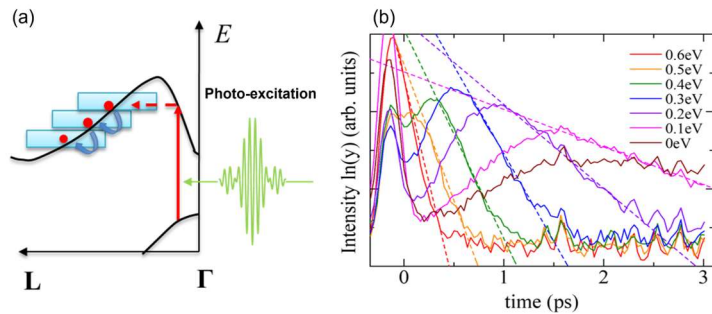


Fig.8 (a):Band structure along the ΓL line and electron relaxation pathway (b):Electron population at respective excess energies as a function of delay time

の領域への流出項の差で近似することができる。遅延時間 t_d が大きい領域では、上のエネルギー領域に存在する電子の密度はほとんど無視できるようになるため、密度変化は流出項のみによって支配される。そこで、 t_d が大きい領域における減衰部分を指数関数で最適化して流出効率(すなわち度を算出した。各エネルギー領域におけるエネルギー緩和速度を異なる励起強度(注入される緩和効率)を評価した。更に、緩和効率にエネルギー間隔を乗じることによりエネルギー緩和速励起電子密度に比例)及び試料温度に対して測定した結果を図9にまとめる。エネルギー緩和速度は1)励起電子の余剰エネルギーに対して増大する事、2)励起強度及び試料温度には依存しない事、が判明した。励起電子系の散乱過程には、大別して、キャリア-キャリア散乱とキャリア-フォノン散乱が存在する。エネルギー緩和速度がキャリア密度(励起強度)に依存しないことから、本研究で用いた励起条件の下ではキャリア-キャリア散乱はエネルギー緩和過程に支配的に働いていないことは明確である。また、キャリア-フォノン散乱の一つである Fröhlich(電子-双極子)相互作用による散乱過程については、対象物質 Ge が無極性物質であるため有効に働かない。その為、変位ポテンシャルによるフォノン散乱がエネルギー緩和過程を支配していると結論した。実際に、Dr. Sjakste らは、変位ポテンシャルによる電子・フォノン散乱を介したエネルギー緩和速度を第一原理的に計算し、実験結果をよく再現することを示した(図9)。

バルク励起電子系は励起後 1.5ps 程度から CBM 近傍に蓄積すると同時に、運動量(放出角)の大きな空間に再分布される(図7)。時間経過とともに、その分布はさらに低エネルギー側へ移動し、放出角ゼロの位置に収束していく。この CBM より低エネルギー領域にみられる分散構造は Ge(111)表面の表面状態バンドと一致している。これらの結果より、バルク励起電子系の一部は、CBM から表面バンドへ遷移し、更に表面バンド内を運動量・エネルギー緩和して

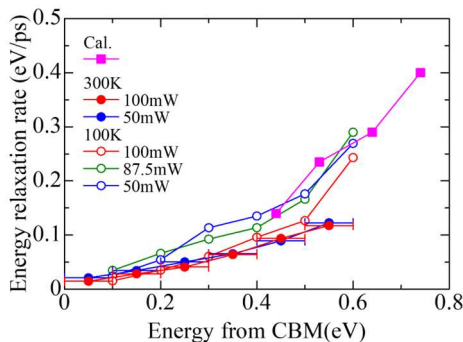


Fig.9 Energy relaxation rate of an excited electron as a function of their excess energy relative to the CBM. Also indicated by closed squares are the calculated energy relaxation rates.

いく。CBM 及び同じエネルギー領域の表面バンド内における励起電子系の密度変化を同時測定し、バルクから表面状態への散乱効率を評価した。その結果、散乱時定数は試料温度 300K で 0.43 ps, 40K で 1.0ps となった。表面へ散乱できるバルク電子の深さを 5Å 程度の領域と仮定すると、この試料表面における表面再結合速度は 10^5 cm/sec 程度と見積もることができる。最後に、バルク励起電子系のエネルギー緩和速度と同様の解析手順により、表面バンド内での励起電子系のエネルギー緩和速度を算出した。表面電子系の余剰エネルギーの増大と共に表面バンド内のエネルギー緩和速度は大きくなる。また、試料温度に対する依存性は見られないことがわかった。

4-3 III-V 族半導体における励起電子系の緩和動力学

・代表的な III-V 族化合物半導体(GaAs, InP)について、 Γ バレー内における励起電子系の非平衡初期分布から準平衡分布に至る動的過程を解明するため、緩和時間の励起強度・ドープタイプ・ドープ量依存性について時間・角度分解光電子分光法により研究した。いずれの試料、励起強度においても、電子系内における準平衡分布に到達するのに数百 fs 程度の時間遅延が観測され、それを支配する散乱素過程は試料により異なることが判明した。n-type GaAs では、光注入された励起電子系と不純物注入による初期の伝導帯'cold electron'との電子散乱が緩和プロセスを支配する。これに対して、p-type 試料では、主要な散乱過程として電子-フォノン及び電子-正孔散乱の効果も重要であるとの結論を得た。

・光励起 InP(110)表面におけるエキシトン生成に起因するギャップ内状態からの光電子放出を観測し、表面エキシトンの結合エネルギー(28meV)及び空間広がりに関する知見を得た。

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 1件/うちオープンアクセス 4件）

1. 著者名 R. Horie, R. Hirose, J. Kanasaki, K. Kisoda, I. Yamamoto, J. Azuma, K. Takahashi	4. 巻 35
2. 論文標題 Optical film-thinning of few-layer graphene epitaxially grown on 4H-SiC(0001) surface	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 J. Physics: Condensed Matter	6. 最初と最後の頁 195401-1-7
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1361-648X/acbffc	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 H. Tanimura, K. Tanimura, J. Kanasaki	4. 巻 107
2. 論文標題 Surface exciton formation on InP(110)-(1x1) studied by time- and angle-resolved photoemission spectroscopy	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 075304-1-10
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.107.075304	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 K. Tanimura, H. Tanimura, J. Kanasaki	4. 巻 106
2. 論文標題 Ultrafast dynamics of photoinjected electrons at the nonthermal regime in the intra-valley relaxation in InP studied by time- and angle-resolved photoemission spectroscopy	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 125204-1-16
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.106.125204	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 H. Tanimura, K. Tanimura, J. Kanasaki	4. 巻 104
2. 論文標題 Ultrafast relaxation of photoinjected nonthermal electrons in the valley of GaAs studied by time- and angle-resolved photoemission spectroscopy	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 245201-1-16
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.104.245201	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 H. Tanimura, J. Kanasaki, K. Tanimura, J. Sjakste, and N. Vast	4. 巻 100
2. 論文標題 Ultrafast relaxation dynamics of highly excited hot electrons in silicon	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 035201-1-13
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.100.035201	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

[学会発表] 計10件 (うち招待講演 2件 / うち国際学会 3件)

1. 発表者名 R. Horie, R. Hirose, J. Kanasaki, K. Kisoda, I. Yamamoto, J. Azuma, K. Takahashi
2. 発表標題 Spectroscopic studies of laser-induced structural modifications of graphene layers epitaxially-grown on SiC(0001)
3. 学会等名 The 22nd International Vacuum Congress (IVC-22) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 安武裕輔、金崎順一、深津晋
2. 発表標題 光学的にとらえたGe中の非平衡電子の超高速緩和過程とそれにともなう特異な物性
3. 学会等名 電子情報通信学会・シリコン材料・デバイス研究会 (SDM) (招待講演)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 R. Horie, T. Yamana, J. Kanasaki, K. Kisoda, C. Itoh, I. Yamamoto, J. Azuma, K. Takahashi
2. 発表標題 Raman spectroscopic studies of laser-induced structural change of epitaxial graphene layers on SiC(0001)
3. 学会等名 International Symposium on Surface Science (ISSS-9) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 佐藤悠介、金崎順一、山本勇、東純平、深津晋
2. 発表標題 シリコンにおける光注入価電子正孔系の超高速緩和現象
3. 学会等名 2020年第81回応用物理学会秋季学術講演大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 佐藤悠介、金崎順一、山本勇、東純平、深津晋
2. 発表標題 シリコン表面近傍における光注入価電子正孔系の超高速緩和過程
3. 学会等名 日本表面真空学会2020年学術講演大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 金崎順一
2. 発表標題 半導体表面における励起物性 -超高速キャリア動力学と光誘起構造変化-
3. 学会等名 佐賀大学 シンクロトロン光応用研究センター講演会（招待講演）
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 佐藤悠介、金崎順一、谷村克己、山本勇、東純平、深津晋
2. 発表標題 シリコン表面近傍における光注入価電子正孔系の超高速緩和現象
3. 学会等名 2021年第68回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2021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 応用物理学会学術講演大会2019年秋季大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 T. Sakamoto, Y. Ysutake, J. Kanasaki, S. Fukatsu
2. 発表標題 Relevance of hidden Valleys in the Dequenching of Room-temperature-emitting Ge layers
3. 学会等名 American Vacuum Society (AVS) 66th International Symposium & Exhibition
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Jun'ichi Kanasaki
2. 発表標題 Optical Control of Structural Transformation to Form Nano-sclaed Phase Including sp3-like Interlayer bonds in Graphite
3. 学会等名 15th International Conference of 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	東 純平 (AZUMA JUNPEI) (40372768)	佐賀大学・シンクロトロン光応用研究センター・准教授 (17201)	

6. 研究組織（つづき）

	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	深津 晋 (FUKATSU SUSUMU) (60199164)	東京大学・大学院総合文化研究科・教授 (12601)	

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		
フランス	Ecole Polytechnique		