

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 30 年 5 月 31 日現在

機関番号 : 14401  
 研究種目 : 特別推進研究  
 研究期間 : 2012 ~ 2017  
 課題番号 : 24000006  
 研究課題名 (和文) 物質構造科学の新展開 : フェムト秒時間分解原子イメージング  
 研究課題名 (英文) Innovation of structural materials science :  
 Femtosecond time-resolved atomic imaging  
 研究代表者  
 谷村 克己 (TANIMURA, Katsumi)  
 大阪大学・産業科学研究所・招へい教授  
 研究者番号 : 00135328  
 交付決定額 (研究期間全体) (直接経費) : 313,900,000 円

### 研究成果の概要 (和文) :

本研究は、固体の超高速非平衡構造変化過程に対する時間分解原子イメージングを獲得し、光誘起構造相転移の研究を推進して、物質構造科学研究の新展開を図る事を目指した。原子イメージング獲得手法として、①時間分解 X 線・電子回折の実験結果を「逆問題」として理論的に解析し実空間イメージを獲得する方法、②原子分解能を有する電子顕微鏡にフェムト秒の時間分解能を付与し、可逆的過程に適応できる積算型電子顕微鏡を確立する方法、③単一パルスで原子イメージングを可能にする為の相対論的フェムト秒電子銃を搭載した顕微鏡装置開発、の 3 つのアプローチで研究を推進した。その結果、①では、金属単結晶のレーザー誘起溶解過程の動力学に対する原子論的理解を達成すると共に、物質の特異な非平衡状態である warm-dense matter で発生する超高速構造変化機構が、高密度電子系励起下での原子間ポテンシャル変化に起因する non-thermal force によるものである事を明らかにした。②では、電荷密度波物質の典型例である 1T-TaS<sub>2</sub> の光誘起相転移過程に対して、時間分解能 800 fs 空間分解能 6 Å の時間分解イメージングの獲得に成功し、電荷密度波秩序の光誘起相転移機構を解明した。③では、フェムト秒 RF 電子銃を搭載した超高压時間分解電子顕微鏡を、世界に先駆けて完成させた。更に、光誘起相転移を駆動する励起電子系の超高速緩和過程に対する角度・時間分解光電子分光を用いた研究によって、運動量・エネルギー空間における電子分布変化のフェムト秒時間分解イメージングを実現した。これらの超高速電子的・構造的変化の直接的知見を獲得する事によって、超高速構造科学の基礎的理解を格段に進展させた。

### 研究成果の概要 (英文) :

In this research project, we aimed to obtain ultrafast real-space imaging of atomic ensembles which provides the crucial information in dynamical mechanisms of photoinduced phase transitions in solids. We adopted following three different approaches: ① solving the inverse problem for the time evolution of diffraction data using state-of-art theoretical methods, ② establishing the time-resolved electron microscopic method applicable to completely reversible processes, ③ constructing an electron microscope with fs-temporal resolution and atomic-level resolution and with a single-shot imaging capability. Developing and using these methods, we have provided far deeper insight into the physics in the ultrafast dynamics of lattice systems in laser-induced solid-to-liquid phase transformation of metals, in photoinduced transformations in charge-density-wave materials, and in initial atomic dynamics in phase-change materials. Also, the mechanism of ultrafast structural changes in warm-dense matters has been elucidated unambiguously. Furthermore, time-resolved imaging of hot electrons in energy- and momentum spaces has achieved for the first time using time- and angle-resolved photoemission spectroscopy. The achievement in the present project has greatly deepened our understanding of the ultrafast cooperative interactions of lattice systems in photoinduced phase transitions.

研究分野 : 物理学・物性 I

キーワード :

光物性、光誘起相転移、フェムト秒時間分解分光、時間分解電子回折、超高速キャリア動力学

### 1. 研究開始当初の背景

分子、生体物質、凝縮系を問わず、物質の機能はその構造と密接不可分の関係にあり、構造制御を通じた新規機能の開拓と創製は、物質科学研究の最大の目的の一つである。20世紀の物質構造科学研究の大きな発展によって、平衡状態における分子・固体の構造が原子レベルの分解能で解明される一方、分光学的手法を駆使して物質の非平衡過程での構造変化現象が原子移動の限界時間領域 ( $>10^{-13}$  秒) で獲得できるまでに至った。

今世紀に入り、構造科学研究は更なる飛躍への幕を開けた。X線自由電子レーザーの運用に伴う時間分解X線回折や、フェムト秒レーザーを駆使した時間分解電子回折手法の展開等によって、構造決定が「平衡条件下でのみ実現可能」という20世紀の限界が打破され、非平衡過程における物質構造が時間分解的に決定可能な段階に至っている。この大きな研究の転換期には、実空間における超高速構造変化を原子レベルで解明し、直接的微視的な知見の系統的獲得を可能にする新たな手法開発研究が、物質構造科学研究のブレークスルーを切り拓く上で必須である。

### 2. 研究の目的

本研究の対象は、近年世界的規模で研究が展開されている光誘起相転移現象である。相転移においては、核形成やドメイン動力学等の空間的に非一様な協力的相互作用が重要な役割を果たす。時間分解構造解析でのX線回折や電子回折は、基本的には、運動量空間における構造平均量を与える。従って、その結果から実空間上の原子レベルでの局所構造変化の知見を得る為には、高度な理論手法を用いた解析法の開発が必須である。本研究では、この手法開発を展開すると共に、より直接的に原子レベルでの構造変化を時間分解検出する為、 $10^{-13}$  秒の時間分解能を有する原子イメージング実験手法の開発を行う。そこから得られる構造変化の微視的知見を、相転移をトリガする励起電子系の超高速緩和過程に対する直接的知見と結合させ、光誘起相転移現象を、微視的統一的に解明する。

### 3. 研究の方法

次の3分担課題を設定して研究を進めた：

- (1) フェムト秒時間分解原子イメージング装置の開発研究
- (2) 凝縮物質系における超高速構造動力学の研究
- (3) 励起物質系における新規秩序形成過程の理論的研究

上記(1)の時間分解原子イメージングを獲得する為の研究においては、以下の3つのアプローチを採用した。

#### ① 回折の「逆問題」解法による時間分解原子イメージング

時間分解X線回折、電子回折の実験結果を逆問題として解法することにより、実空間で

の原子構造変化を再現する解析手法を確立し、原子イメージングの獲得を目指す。

#### ② 積算型時間分解電子顕微鏡開発

原子分解能を有する電子顕微鏡に、 $10^{-13}$  秒の時間分解能を付与し、多数回の積算測定が可能な可逆的過程に適応できる時間分解電子顕微鏡手法を確立する。

#### ③ 単一パルス原子イメージング装置開発

現有の相対論的電子パルスを用いた透過電子回折装置を基にして、原子レベルの空間分解能を併せ持つ、単一パルスで原子イメージングが可能な装置の開発研究を行う。

上記(2)の「凝縮物質系における超高速構造動力学の研究」課題においては、フェムト秒時間分解分光法・光電子分光法・電子回折等を併用し、光誘起相転移過程の核形成・ドメイン動力学・秩序形成過程等に対する研究を展開した。更に、相転移を駆動する励起電子系のエネルギー・運動量空間における時間分解イメージングを実現し、電子系超高速緩和過程の直接的知見を得る研究を進めた。

上記(3)の「励起物質系における新規秩序形成過程の理論的研究」課題においては、①励起状態第一原理計算手法による構造不安定性発現と新規秩序形成機構の解明、②モデルハミルトニアンに立脚した統一理論形成等を目指す純理論的研究を展開した。それと共に、時間分解原子イメージングの獲得、励起電子系の超高速緩和過程の解明など、実験グループとの有機的連携による共同研究を推進した。

### 4. 研究成果

#### 4.1 時間分解原子イメージングに関する成果

##### (1) 回折の「逆問題」解法による時間分解原子イメージングとその成果

時間分解電子回折の実験は、直接的な原子イメージング獲得に比べて容易かつ汎用的である。回折像の時間変化は構造の時間変化を反映する。従って、光励起後の相転移過程の電子・格子系の厳密な理論的解析によって実験的に観測された時間分解回折像の変化が記述可能であり、その直接比較から、光励起後の実空間原子イメージを構成できる。

このアプローチを可能にする為には、実験、理論共に、幾つかの条件が必要である。実験的には、回折像が、1回散乱近似が適応可能な運動学的領域において測定されている事が必須である。運動学的回折の成立要件は、電子の速度によって決まる回折の消衰距離 $\xi$ が試料の厚さに比較して十分に長い事にある。電子エネルギー3MeVの我々の透過電子回折装置では、 $\xi$ は大きく、10 nm程度の厚さを有するほとんど全ての試料に対して、その成立要件を満足する。一方、理論的には、光励起後の固体電子格子系を定量的に記述可能な手法を用いる事が必須である。金属の励起電子格子系は、速い励起電子系の熱化過程故に2温度モデルを用いた定量的記述が可能である。従って、主に金属単結晶薄膜試料の

レーザー励起固液相転移過程に対して、第一原理計算と分子動力学法を組み合わせた構造解析計算法を開発し、時間分解回折実験と融合させて、時間分解原子イメージングを獲得した。代表的成果を以下にまとめる。

① 金単結晶のレーザー誘起固液相転移過程の時間分解原子イメージング

この研究を通じて、電子回折の結果から時間分解原子イメージングを得る理論解析手法を確立した。理論の概略を以下にまとめる。金単結晶を電子系と格子系に区分し、

- 1) 第一原理計算手法を用いて光励起後の時刻での電子系の状態を計算し、電子温度、比熱、熱伝導度、電子格子結合定数を求めて格子系へのエネルギー移動量を定める、
- 2) 格子系は25万個の原子に対して古典的分子動力学手法を用いて計算し、電子系からのエネルギー付与に伴う格子状態変化を定め、各時刻での各原子位置・構造を決定する、
- 3) 求めた原子配置に対して、一回散乱近似の下での構造因子と回折強度を各次数の回折線に対して計算する、

の3つの段階を、1 fs の時間間隔で繰り返す。結果の1例を Fig. 1 に示す。図(b)に示したシングルショットで得た回折像の内、低次数回折点の強度変化を、Fig. 1(a)に示す。図中の実線は、理論解析によって得られた強度変化の結果であるが、実験結果を見事に再現している。図(c)は、理論解析によって得られた励起後 10 ps における金単結晶の原子イメージである。赤点が溶融領域を表しており、表面溶融と共に、溶融核が結晶内部で発生する均一溶融が発生している。この成果は、電子回折実験結果を理論的に解析し、結晶構造の超高速時間変化を原子レベルで可視化した世界初の成果である[論文④]。

② non-thermal melting 機構の解明

金単結晶のレーザー誘起固液相転移の動

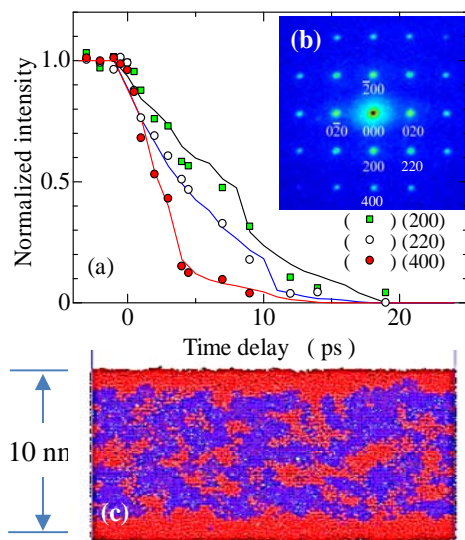


Fig.1 金単結晶の固液相転移における回折強度変化と理論解析結果の比較 (c)は励起後 10 ps における可視化された金薄膜の原子構造

力学は、励起強度に著しく依存する。Fig. 1 に示した結果は、励起エネルギー密度が  $3 \times 10^3 \text{ J/cm}^3$  の結果であるが、それ以下の励起エネルギーでは、溶融は、電子系のエネルギーが格子系に付与され格子温度が融点を超えて発生する熱的機構による。一方、励起エネルギー密度が閾値 ( $6 \times 10^3 \text{ J/cm}^3$ ) を超えると、(200) 回折強度の 50% 以上が 1 ps 以内に急速に消滅する。この急速な構造崩壊は熱的機構では説明できない。詳細な第一原理計算に基づく考察から、閾値以上では、電子系の高密度励起に伴い格子系の原子間ポテンシャルが大きく変化し、原子系にポテンシャル変化に対応する力 (non-thermal force) が作用する事、が判明した。実際、このポテンシャル変化を取り入れてはじめて、急激な回折強度減少を示す実験結果が定量的に記述可能になった。

金属、半導体等では、電子系の高密度励起によって、電子系のみが超高温に励起され格子系は低温状態を保ったままの物質状態 (warm dense matter) が形成され、特異な構造相転移 (non-thermal melting) を示す事が知られていた。本研究の結果は、non-thermal melting が原子間ポテンシャル変化によって誘起される non-thermal force に起因するものである事を明らかにした。更に、この効果を含めた研究を他の金属系にも展開し、その結果、タングステン等の結晶においては、この non-thermal force によって、電子的効果で、bcc 構造から fcc 構造への相転移が誘起される事を理論的に示した。

③ 相変化記憶材料における光励起初期構造変化の解明

時間分解回折測定実験から局所的な原子構造変化を得る他の例として、DVD の基盤物質である  $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_4$  および  $\text{GeTe}$  における光誘起初期構造変化を研究した。DVD の情報記録における結晶相からアモルファス相への変化は、Ge 原子の変位によって誘起されることが提案されているが、光励起直後の Ge 原子運動の詳細は不明であった。これらの物質中で Ge 原子は Te 原子と長短 2 種類の結合で結ばれており、構造的には off-center 位置を占めている。この 2 種の結合構造による回折ピークの分裂は小さく、運動量分解能が高い X 線回折でのみ、明瞭に分離される。結晶相からアモルファス相への大規模な構造変化過程の記述には、上で記した様な高度な理論解析を必要とするが、Ge の初期変位過程は、構造因子の計算結果から比較的容易に結論できる。アモルファス相への転移を誘起する閾値以下での光励起によって得られた SACLA による時間分解 X 線回折の結果の解析から、光励起直後 Ge 原子は、等価な off-center 位置を高速に移動する rattling motion を引き起こす事が明らかとなった。この運動がトリガとなって  $\text{GeTe}$  においては過渡的な高対称 fcc 構造への変化が、 $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_4$  では、局所的なアモルファス化が誘起される[論文②]。

## (2) 積算型時間分解電子顕微鏡開発と成果

空間分解能  $2\text{\AA}$  を有する  $200\text{keV}$  の電子顕微鏡に、電子銃部および試料部に光導入を可能とするポートを付加した時間分解電子顕微鏡 (Fig. 2(a)) を用いて、時間分解原子イメージングを獲得する開発研究を行った。電子銃のフェムト秒化のための開発・最適化作業を、光電子銃材料の特性評価研究を含めて展開した。その結果、フェムト秒光電子パルス (パルスあたりの光電子は 40 個以下) を用いて、空間分解能  $6\text{\AA}$  を達成した。この装置を用いて行った研究の代表的成果である遷移金属カルコゲナイド  $1\text{T-TaS}_2$  における光誘起相転移過程の結果を以下に示す。

$1\text{T-TaS}_2$  は、電荷密度波 (CDW) が発生する代表的な擬 2 次元物質であり、最低温相である commensurate-CDW (C-CDW) 相では、強相関と強い電子格子相互作用が共存し、系は絶縁体相になる。この物質に対する光誘起相転移に対して、多くの研究がなされてきた。しかし、観測される多様な現象が統一的に解釈されるには至っておらず、更なる研究が強く求められていた。我々は、まず、時間分解電子回折と時間分解コヒーレントフォノン分光を併用した系統的研究を展開した。時間分解原子イメージング獲得の目的から、電子回折は積算型時間分解顕微鏡を用いて行った。

Fig. 2(b), (c) に、励起前、および励起後  $150\text{ ps}$  の電子回折像を示す。C-CDW 相の  $\sqrt{13}\times\sqrt{13}$  超格子構造を反映して、6 個の 1 次回折点、12 個の 2 次回折点が検出される。励起後では、1 次回折点はほぼ完全に消滅するが、2 次回折点は  $50\%$  程度の強度を維持して存続する。この回折の特徴は、高温相である nearly commensurate-CDW 相に固有であり、実験結果は、C-CDW 相が光励起によって、高温相に可逆的に相転移する事を示している。この結果と、同様な時間領域のコヒーレントフォノン分光の結果から、「C-CDW 相での超周期構造の単位である 13 個の Ta 原子で構成されるクラスターの電子的構造的状態が、励起電子系の緩和過程で変化し、CDW 秩序が局所的に融解する」事によって相転移が発生する、

とするモデルを提唱した。このモデルに基づけば、今まで得られているほとんど全ての現象が統一的に説明可能になる [論文①]。

このモデルの実証には、 $\sqrt{13}\times\sqrt{13}$  超周期構造の光励起による局所的融解の直接観測が必要である。その為に、積算型時間分解電子顕微鏡を用い、時間分解原子イメージング獲得を目指した。装置の空間分解能  $6\text{\AA}$  では、 $1\text{T-TaS}_2$  の原子構造 ( $2.9\text{ \AA}$ ) の分離は不可能であるが、 $\sqrt{13}\times\sqrt{13}$  超周期構造の間隔  $10.5\text{ \AA}$  は分解できる。超周期構造のみを選択的にイメージ化する為、Fig. 2(b) に示す様に、超格子構造による回折スポットのみ (図中の波線円) を切り出してイメージ化させる暗視野法を用い、時間分解原子イメージを得た (Fig. 2(d))。

種々の制約の為にイメージの解像度は鮮明ではないが、 $\sqrt{13}\times\sqrt{13}$  超格子に特有な  $10.5\text{ \AA}$  の周期構造が識別できる。図は、励起強度が  $0.8\text{ mJ/cm}^2$  で励起後  $5\text{ ps}$  のイメージであるが、この時刻は、CDW 相転移過程 (転移時間は  $100\text{ ps}$ ) のごく初期に対応する。特徴は、図の破線の領域で周期性が完全に乱れた直径  $10\text{ nm}$  程度のドメインが形成されている点である。励起前にはこのようなドメインは存在せず、光励起によって CWD 秩序の一部が崩壊して新たに発生したドメインであると結論でき、時間分解電子回折とコヒーレントフォノン分光の研究から得られた C-CDW 秩序の光誘起局所的融解モデルを実証している。

上記の様に、積算型時間分解電子顕微鏡手法は、相転移過程の局所的構造変化を原子レベルで探る上で極めて有用である。しかし、この手法を他の系にも適応する上には、大きな実際の制約がある事も明らかになった。イメージの繰り返し積算測定の為には、光励起後の試料の状態が次の測定前には完全に復元している必要がある。しかし、顕微鏡用薄膜試料に固有な制限的な熱伝導によって熱負荷の効果が大きくなり、繰り返し周波数を大きく制限する。光誘起構造相転移を誘起する代表的励起フルエンス (数  $\text{mJ/cm}^2$ ) では、熱緩和時間は  $1\text{ ms}$  程度に達し、繰り返しは 1

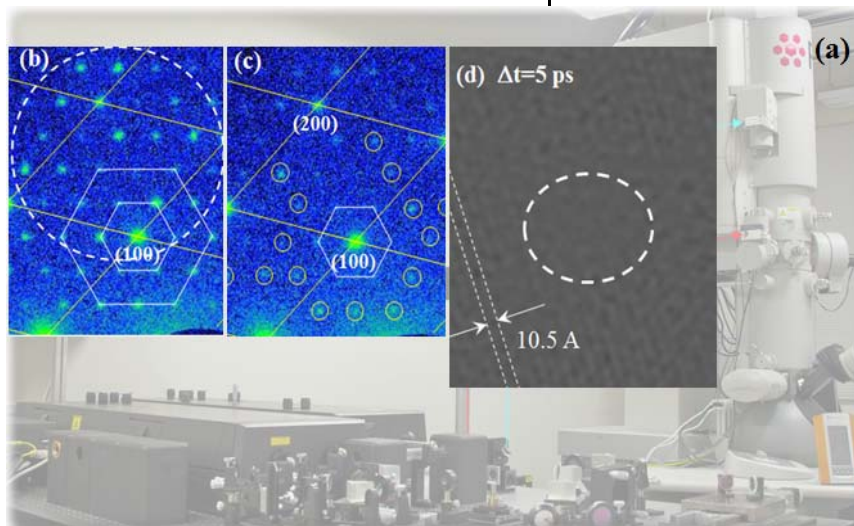


Fig. 2 (a): 積算型時間分解電子顕微鏡の写真

(b), (c):  $1\text{T-TaS}_2$  の電子回折像 (強度は対数表示)。黄色実線は基本構造の逆格子配列で、白の 2 つの六角形は超格子構造による回折点 (1 次, 2 次)。(d): (b) の破線円内の超格子回折点に対する dark-field image で時間分解能は  $800\text{ fs}$ 。

kHz 以下に制限される。イメージ形成に必要な総電子数を  $10^8$  個とすれば、この時の積算時間は 1000 秒となり現実的でない。従って、この手法の応用は、弱励起によって構造が大きく変化する系に限定される。

### (3) 単一パルス原子イメージング装置の開発

現有の時間分解透過型電子回折装置を原子イメージング装置に転生させる為には、電子ビームの高精度な安定化・単色化という極めて困難な技術的課題を克服する必要があった。その為、電子銃性能を高度化させるための専用電源の設計・試作と RF 波増幅の為にクライストロンの導入等の装置開発を研究当初から精力的に推進した。開発過程に付随する種々のトラブルや困難な諸点を克服し、RF 増幅電源の安定性として  $\pm 2 \times 10^{-5}$  の世界最高性能を実現した。この超安定化された電源を用い、電子パルスのエネルギー単色性として、 $2 \times 10^{-4}$  を実現した。

RF 電子銃による超短電子パルスを用いる超高压電子顕微鏡は、世界的にも全く前例がなく、電子ビームの空間電荷効果を含む伝播特性の把握、イメージングに最適なビーム特性確立やレンズ収差の特性解明など、多くの未知の課題があった。我々は、単一パルス原子イメージング装置の開発研究において、①試験機の作成し、それを用いたイメージング過程の諸問題の把握と解決指針の確立する、②実証機を試作しその応用を目指す、という

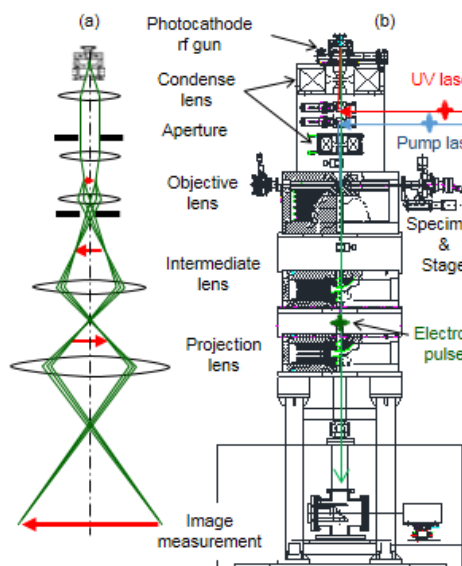


Fig.3 RF 電子銃を搭載した顕微鏡試験機のレンズ系の構成(a)と構造模式図(b)

2 段階の研究方法を採用した。試験機の構成図を Fig. 3 に、写真を Fig. 4(a) に示す。

レンズ系は、通常の電子顕微鏡と同様な 4 段構成であり、対物レンズの焦点距離は 5.8mm、最大倍率は 10000 倍として設計し、すべて試作した。この試験機を用いて、電子の加速電圧、パルスあたりの電子数等を系統的に変化させ、その際のビーム伝播特性を詳細に調べた。その結果、この構成では、電子

の加速電圧としては 3 MeV が最適であり、最も高い分解能と検出感度が得られる。到達した試験機の空間分解能は 400 nm であった。

これらの成果を基に、実証機の作成に移行した。Å 領域の空間分解能を実現する為には、試験機より球面収差の小さいマグネットが必要であるが、予算上の制約の為に、必要とする高性能マグネットを新たに発注・作成する事は不可能であった。そこで、本学超高压電子顕微鏡センターに、1971 年に設置された我が国初の超高压電子顕微鏡（現在は廃棄済）に使われていた試料部以降の顕微鏡レンズ系を譲り受け、移設して実証機を完成させた。Fig. 4(b) に実証機の写真を示す。これは、世界最初の相対論的電子パルス電子銃を搭載したフェムト秒時間分解電子顕微鏡である。像検出系の感度向上など、幾つかの開発課題は残されているが、今後の活用によって、時間的・空間的な極限領域の重要な知見の獲得が期待される。



Fig.4 RF 電子銃搭載時間分解電子顕微鏡の試験機(a)と実証機(b)の写真

### 4.2 結晶励起電子系のエネルギー・運動量空間における時間分解イメージング

光誘起構造変化は、電子系の光励起が出发点であり、電子系超高速緩和過程の解明は、本研究の重要な構成部分をなす。過去半世紀近くに亘って研究されてきた半導体に対しても、運動量空間における緩和過程の解明は間接的かつ不十分であった。本研究では、時間・角度分解光電子分光手法を駆使し、non-thermal melting 機構解明の為、半導体結晶中の励起電子系のエネルギー・運動量空間における超高速緩和過程を直接的に解明した。

最も代表的な半導体である GaAs 結晶中での励起電子の時間分解イメージングの結果を Fig. 5 に示す。縦軸はバルク伝導帯底からのエネルギー、横軸は(110)表面に垂直方向からの光電子放出角であり、表面平行方向の運動量保存則から、結晶運動量空間における  $\Gamma$ -L(実線)  $\Gamma$ -X(破線) と対応付けられる。励起後 30 fs では、励起電子はその大部分が  $\Gamma$  valley 中に存在しているが、励起後 113 fs では、多くが L valley へ遷移している。励起電子系の緩和過程で、始状態と終状態をエネルギーと運動量空間で明確に特定し、遷移

過程を直接観測した世界最初の結果であり、光学的手法では達する事が出来ない運動量

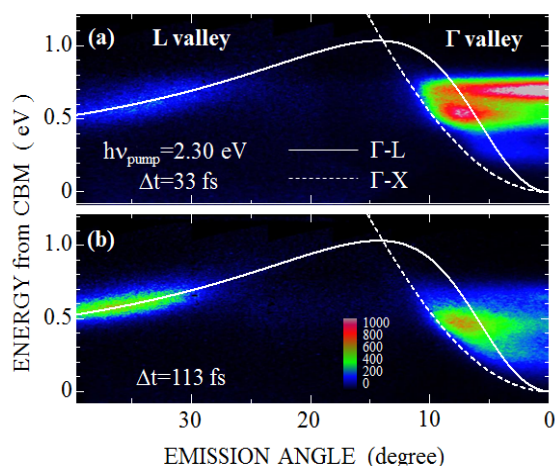


Fig.5 GaAs 結晶中の励起電子に対するエネルギー・運動量空間における時間分解イメージング

空間分光を実現した[論文③]。

励起エネルギーを系統的に変化させた研究から、伝導帯中の Valley 間遷移がエネルギー増加と共に早くなり、励起電子系は、運動量空間中で準平衡（エネルギー的には非平衡）状態を形成し、その全体がエネルギー緩和を起して最終的に伝導帯底付近に緩和する事が明らかになった。他の III-V 族半導体や Si においても、GaAs と同様な励起電子系の緩和が発生している。この成果は、光誘起相転移を誘起する電子系の新たな特徴を解明したばかりではなく、その波及効果は、半導体科学、光エネルギー変換素子開発、ナノ機能開拓研究、等、広範囲に及んでいる。

## 5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 45 件)

①K. Tanimura, “Photoinduced discommensuration of the commensurate charge-density wave phase in 1T-TaS<sub>2</sub>”, Phys. Rev. B, in print (2018). 査読有

②E. Matsubara, S. Okada, T. Ichitsubo, T. Kawaguchi, A. Hirata, P. F. Guan, K. Tokuda, K. Tanimura, T. Matsunaga, M.W. Chen, and N. Yamada, “Initial atomic motion immediately following fs-laser excitation in phase-change Materials”, Phys. Rev. Lett. **117**, 135501-1-6 (2016). 査読有

DOI: 10.1103/PhysRevLett.117.135501

③J. Kanasaki, H. Tanimura, and K. Tanimura, “Imaging energy-, momentum-, and time-resolved distributions of photoinjected hot electrons in GaAs”, Phys. Rev. Lett. **113**, 237401-1-5 (2014). 査読有

DOI: 10.1103/PhysRevLett.113.237401

④S. L. Darasiewicz, Y. Giret, N. Naruse, Y. Murooka, J. Yang, D. M. Duffy, A. L. Shluger, and K. Tanimura, “Structural dynamics of laser-irradiated gold nanofilms”, Phys. Rev. B **88**, 184101-1-12 (2013). 査読有

DOI: 10.1103/PhysRevB.88.184101

[学会発表] (計 60 件：うち招待講演 29 件)

①J. Yang, “Ultrafast Electron Microscopy using a 100-femtosecond Relativistic-Energy Electron Beam”, 7th International Particle Accelerator

Conference, 2016.

②K. Tanimura, “Toward ultrafast electron microscope with femtosecond temporal resolution, atomic-level spatial resolution, and single-shot imaging capability”, International conference on microscopy and microanalysis, 2015.

③K. Tanimura, “Imaging energy-, momentum- and time-resolved distributions of photoinjected hot electrons in semiconductors”, 19<sup>th</sup> International Conference on Electron Dynamics in Semiconductors, Optoelectronics, and Nanostructures, 2015.

④K. Nasu, “How much time necessary to photo-generate Fermi surface from true electron vacuum”, 5th International Conference on Photo-induced Phase Transitions and Cooperative Phenomena, 2014.

[図書] (計 2 件)

①那須 奎一郎、澤 博、門野良典、共立出版「現代文明と物質科学」(2012, 1-90 頁)

[その他]

ホームページ等

<http://www.sanken.osaka-u.ac.jp/labs/aem/Projects.html>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

谷村 克己 (TANIMURA, Katsumi)  
大阪大学・産業科学研究所・招へい教授  
研究者番号：00135328

### (2) 研究分担者

那須 奎一郎 (NASU, Keiichiro)  
高エネルギー加速器研究機構・物構研・名誉教授、研究者番号：90114595  
楊 金峰 (YANG, Jinfeng)  
大阪大学・産業科学研究所・准教授  
研究者番号：90362631

### (3) 連携研究者

高橋正彦 (TAKAHASHI, Masahiko)  
東北大学・多元物質科学研究所・教授  
研究者番号：80241579  
金崎純一 (KANASAKI, Junichi)  
大阪大学・産業科学研究所・准教授  
研究者番号：80204535  
成瀬延康 (NARUSE, Nobuyasu)  
滋賀医科大学・医学部・准教授  
研究者番号：30350408  
富田健一 (TOMITA, Norikazu)  
山形大学・理学部・教授  
研究者番号：70290848  
石田邦夫 (ISHIDA, Kunio)  
宇都宮大学・大学院工学研究科・教授  
研究者番号：40417100  
下位幸弘 (SHIMOI, Yukihiro)  
産業技術総合研究所・機能材料コンピュータショナルデザイン研究センター・上級研究員、研究者番号：70357226

### (4) 研究協力者

A. L. Shluger, Dept. of Physics & Astronomy, University College London (UK), Professor.