

令和 2 年 7 月 13 日現在

機関番号：92704

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2016～2019

課題番号：16H02120

研究課題名(和文)アト秒スペクトロスコピー技術によるペタヘルツエンジニアリングの創出

研究課題名(英文)Development of attosecond spectroscopic techniques for solid state materials towards petahertz engineering

研究代表者

小栗 克弥(Oguri, Katsuya)

日本電信電話株式会社NTT物性科学基礎研究所・量子光物性研究部・グループリーダー

研究者番号：10374068

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 32,400,000円

研究成果の概要(和文)：ペタヘルツスケール固体超高速デバイス実現に向けた基盤技術となる固体電子系アト秒時間分解分光法の開発を中心に研究を実施し、超高時間分解能につながる30 as級単一アト秒パルス光源、サブサイクル級の電子系バンドダイナミックイメージングが可能なサブ5 fs級時間分解ARPESの開発、固体電子系の微小変調を捉えることが可能な高次高調波時間分解反射率計測法を実現した。また、電子分極振動の実時間計測を実現する新しいアト秒吸収分光スキームの提案や、それを用いた世界最高周波数の分極振動計測、グラフェン・グラファイトにおける電子分布再配列緩和ダイナミクス計測など、ペタヘルツ時間スケールの物性計測を実証した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究で開発された固体電子系アト秒高次高調波時間分解分光技術は、世界最高の時間分解能や、これまで明瞭に計測できなかった固体電子系微小応答を捉える高感度性など、今後のアト秒時間領域の固体電子系物性の研究にキーとなる手法である。一研究室でこれだけ多面的なアト秒時間分解分光技術を開発している例はなく、我が国が、ペタヘルツという従来の「3桁以上」という極限的な動作速度を追求する超高速情報処理デバイスの実現のイニシアチブを握る強力な基盤技術を創出した。さらに、本技術は、光電変換プロセスの高効率化や超短パルスレーザー加工など光-電子相互作用に関わる技術・産業に新しい方向性を提供すると期待できる。

研究成果の概要(英文)：We have developed an isolated attosecond pulse source whose bandwidth corresponds to 30-as duration assuming Fourier limit based on based on a 1.6-cycle Ti:sapphire laser pulse, a time-resolved and angle-resolved photoelectron spectroscopy (Tr-ARPES) with sub-5fs-probe resolution that will enable subcycle electronic band mapping, and a time-resolved reflectivity measurement with much higher sensitivity than previous high-order harmonic spectroscopic techniques. By using our developed attosecond spectroscopic techniques, we have demonstrated a time-domain measurement of PHz-dipole oscillation in sapphire crystal, and Tr-ARPES measurement of the ultrafast evolution of energy redistribution process in photoexcited graphite. These newly developed attosecond spectroscopic techniques and ultrafast electronic dynamics in solid state materials will contribute to future development of PHz-driven solid state devices.

研究分野：超高速光物理

キーワード：アト秒科学 アト秒時間分解分光 時間分解ARPES グラフェン 人工二次元結晶

## 様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

アト秒パルスと、ポンプ・プローブ法を組み合わせた「アト秒時間分解分光法」は、最も直接的なアト秒ダイナミクス計測手法であるため、2010年代前半には原子系ダイナミクス計測に主に適用され、多くのハイインパクトな成果が生まれた。しかしながら、アト秒領域における電子ダイナミクスの応用が最も期待されている固体電子系については、アト秒時間分解分光法の適用が、極めて限られており(Schultze et al., *Nature* 493,75 (2013))、研究開始当初は、アト秒技術の固体サンプル計測適用の研究が喫緊の課題であるとの認識が背景にあった。

研究代表者は、本課題の研究計画調書において、光をサブ PHz の周波数を有する超高周波電界、すなわち“PHz 波”として自在に計測・制御し、PHz 波が駆動するアト秒レベルの固体電子系ダイナミクスを利用する新しいタイプの光機能を目指す将来ビジョン“ペタヘルツエンジニアリング”を提唱し、研究をスタートさせた(小栗克弥、*日本物理学会誌* 70 巻 936 (2015))。また、研究代表者のグループでは、本課題開始直前には、すでにアト秒パルス列を用いた世界最高プローブエネルギーフェムト秒光電子分光法の開発や、世界最高時間分解能単一アト秒吸収分光法など、固体電子系に適用可能なアト秒スペクトロスコーピー技術を既に確立していた。これらの技術により、半導体表面に光誘起されたキャリアの拡散に由来する光デンプー効果の観測や(Oguri et al., *Applied Physics Express* 8, 022401 (2015))、ワイドギャップ半導体における非線形電子分極の実時間計測に成功してきた(Mashiko, Oguri et al., *Nature Physics* 12, 741 (2016))。

### 2. 研究の目的

本研究の目的は、研究代表者が提唱する“ペタヘルツエンジニアリング”のコンセプトを切り拓くために、その第 1 ステップとして、研究代表者らの有するアト秒スペクトロスコーピー技術及びグラフェン等人工二次元結晶成長・プロセス技術を融合するという独自のアプローチにより、(i) 固体電子系ダイナミクス用アト秒分光法の開発、(ii) 光波電界に対する固体電子系のアト秒スケール時間応答の解明、に取り組むことである。本研究により、光が備えているサブペタヘルツ (PHz) 周波数の電磁波としてのポテンシャルを引出し、既存の高周波エレクトロニクスと比べて 1000 倍以上の情報処理速度の向上を可能とする革新的超高速光技術の実現への最初の道筋をつけることを目指した。

### 3. 研究の方法

上記の目的を達成するために、これまで我々が構築してきたアト秒時間分解分光技術をベースに、プローブ光源の性能アップ並びに物性計測技術の多角化という新しい固体系アト秒時間分解分光技術の開発と、それによるダイナミクス計測を重点化して実施する。そのために、以下の 4 課題を実施する。

#### (1) アト秒パルスプローブ光源の短パルス化

PHz 波で駆動される固体電子系の挙動を計測するためのアト秒時間分解分光技術において、アト秒パルスの時間幅はその時間分解能を制限する要因である。本課題では、既に達成している 200 as 以下の時間幅を有する単一アト秒パルスの高効率発生を目標とし、まず我々のドライバレーザであるチタンサファイアマルチパス増幅器からの出力の圧縮によりモノサイクル化を図り、単一アト秒パルス発生を試みる。

#### (2) 単一アト秒パルスを用いた光波誘起電子分極応答の実時間計測法の提案と、絶縁体におけるアト秒時間分解吸収分光

我々の構築したアト秒吸収分光法は、ポンプ光で励起した固体サンプルに単一アト秒パルスを透過させ、単一アト秒パルスのスペクトルを計測しその遅延時間変化を計測するという極めてシンプルな方法である。しかしながら、ポンプ光の光子エネルギーは 1~2 eV 領域にある一方、プローブ光のアト秒パルスの光子エネルギーは数 10 eV 領域にあるというポンプ-プローブ光のエネルギー差が極めて大きく、ポンプ光に誘起された固体電子系の変調がどのようにアト秒パルスの吸収に影響するのか必ずしも明らかではなかった。本課題では、実験結果に基づき、固体電子系を極めて単純化したモデルでアト秒吸収分光法のスキームを直観的に理解し易い描像を構築する。更に、この手法を別のワイドギャップ物質に適用し、サンプルを拡張することを試みる

#### (3) 超高時間分解プローブ角度分解光電子分光法の開発と、人工二次元結晶電子系アト秒ダイナミクス計測

我々の構築したアト秒吸収分光法は、アト秒時間分解能を有するものの得られる情報は、ポンプ光で変調された電子状態が、プローブするアト秒パルスの吸収スペクトルの変化に転写されたものであり、電子状態を直接計測するものではない。時間分解 ARPES という手法は、近年、100-200 fs クラスの時間分解能で物性計測に利用され始めている新しい計測法であるが、本課題ではこの時間分解能を光の 1 周期と同程度の時間スケール(アト秒~数フェムト秒)に飛躍的に向上させることを試みる。

#### (4) 超高感度アト秒反射率計測法の開発

我々の構築したアト秒吸収分光法は、透過型配置をとるため、極端紫外領域のアト秒パルスを固体サンプルに透過させるために、FIB 等で一部を超薄膜化する加工を施すなどサンプルを自由に選択できないという問題点があった。また、吸収スペクトルを計測するために 2 次元検出器を用いているため、単純な積算検出しか対応できず、データの S/N 比を高めるためにできる

ことは、本質的に積算回数を増やす(測定時間を延ばす)ことのみであった。本課題では、上記 2 つの問題点を克服し、サンプルの薄膜化という工程を無くし、これまでのアト秒時間分解分光法では検出することが困難であった微弱な信号をより短時間で計測可能な手法を開発するため、アト秒パルス列による時間分解反射率計測法の実現を試みる。

#### 4. 研究成果

##### (1) アト秒パルスプローブ光源の短パルス化

本実験では、20 fs パルス幅、3 mJ パルスエネルギー、3 kHz 繰返し周波数を有する CEP 安定化チタンサファイアチャープパルス増幅システムを用いた。レーザーからの出力を圧力約 1 気圧の Ne ガスを注入している中空ファイバ(長さ 1 m、内径 400  $\mu\text{m}$ )に集光し、自己位相変調効果によりスペクトル広帯域化を行った。波長 400 nm から 1000 nm の帯域 600 nm に反射帯域並びに群速度分散制御可能帯域を有する超広帯域チャープミラー対で分散補償し、パルス圧縮をした結果、800 nm 帯におけるバンド幅 139 nm、パルス幅 4.1 fs、パルスエネルギー 1 mJ を有する 1.6 サイクルの準モノサイクルパルスの発生に成功した。上記の CEP 安定化準モノサイクルパルスを、長さ 1 mm の Ne ガスセルに集光させることによりアト秒パルスを発生させた。焦点距離 100 mm という比較的短焦点の球面鏡を用いて集光させることにより、ピーク強度  $3 \times 10^{15} \text{ W/cm}^2$  まで集光させ、カットオフエネルギーの高エネルギー化を図った。また、基本波の光路には、厚み 250  $\mu\text{m}$  及び 480  $\mu\text{m}$  の水晶板、そして厚み 140  $\mu\text{m}$  の BBO 結晶を組み合わせた二重光学ゲート(DOG)法用光学素子を配置した。

図 1(a)に、準モノサイクルパルスと DOG 法を組み合わせ発生させたアト秒パルスの典型的なスペクトルを示す。アト秒パルス列に特徴的な櫛状スペクトルではなく、コンティニュームであることがわかる。スペクトルのピークは、およそ 140 eV に位置し、ちょうど Zr フィルターの最大透過波長エネルギー領域に一致している。低エネルギー側は、Zr フィルターによりフィルタリングされている。コンティニュームの半値全幅は、およそ 70 eV に到達し、10 パーセント強度比のエッジ部分の幅は 100 eV を超えた。この帯域幅は、フーリエ変換限界パルスを仮定した場合には、32 as のパルス幅に相当する(図 1(b))。このように、準モノサイクルパルスと DOG 法を組み合わせることによって、サブ 50 as のパルス幅をサポートするコンティニュームが比較的低エネルギー領域で実現できた。

また、計測されたアト秒コンティニュームが単一アト秒パルスであることを裏付けるため、スペクトルの CEP 依存コンティニュームの CEP(相対値)依存性をした(図 1(c))。CEP を変化させることは、基本波のピーク電界を変化させることに対応するため、アト秒コンティニュームのエネルギー分布が CEP に依存して変化していく。その結果、このようなスペクトルの周期的変化を引き起こす。また、DOG 法における二色ゲートの効果により、基本波は反転対称性を失い、非対称な電界になっている。そのため、アト秒コンティニューム変化は CEP の  $2\pi$  の周期性を有している。

##### (2) 単一アト秒パルスを用いた光波誘起電子分極応答の実時間計測法の提案と、絶縁体におけるアト秒時間分解吸収分光

アト秒時間分解吸収分光法は、高次高調波発生過程により発生させたアト秒時間幅を有する極端紫外・軟 X 線領域の超短パルスをプローブ光として、可視・近赤外領域にあるポンプ光パルス電場によって励起されたサンプルの吸収スペクトルをポンプ光・プローブ光の遅延時間の関数として計測するものである。本計測をモデル化するために、測定すべき対象は半導体・絶縁体のようなバンドギャップを有する物質を仮定した。図 2(a)は、価電子帯・伝導帯の 2 バンドに簡略化された半導体のバンド構造の模式図である。ポンプ光の光電界(LWP)は、価電子帯・伝導帯間に作用することで、バンド間の双極子遷移を誘起する。ここでプローブ光であるアト秒パルス(IAP)を入射し、その吸収スペクトルをポンプ光・プローブ光間の遅延時間差  $\Delta t$  の関数として測定することを考える。アト秒パルスは、EUV 領域にあることから、伝導帯における比較的高エ

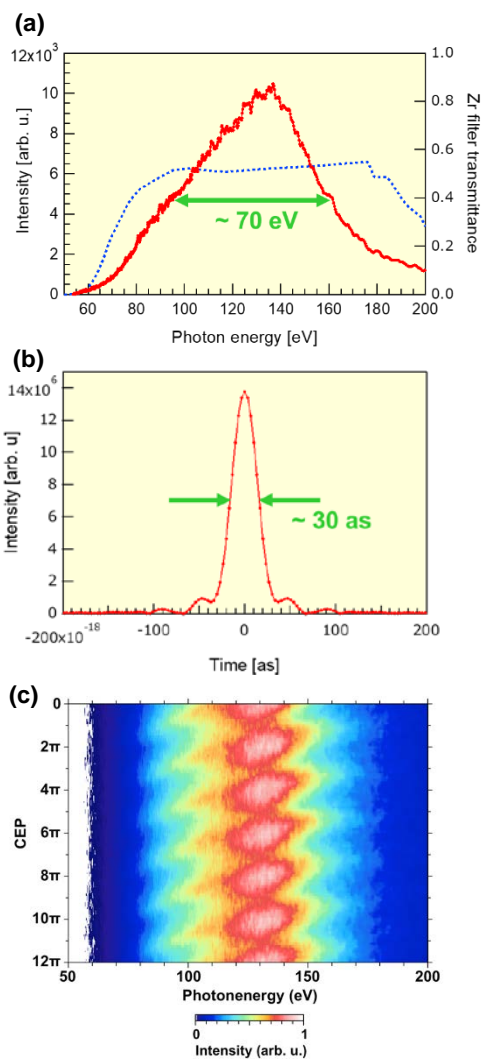


図 1. 1.6 サイクル(4.1 fs)準モノサイクルパルスで発生したアト秒パルスのスペクトル(a)と、そのスペクトルをフーリエ変換した波形(b)。アト秒パルスのスペクトルの CEP 依存性(c)。

エネルギーにあるバンドに吸収されると仮定する。また、ここでは内殻準位からの遷移による吸収を無視するため、プローブ光のアト秒パルスの光子エネルギーは 20 eV 程度を想定した。ここで、簡単化のため、価電子、伝導、アト秒パルス吸

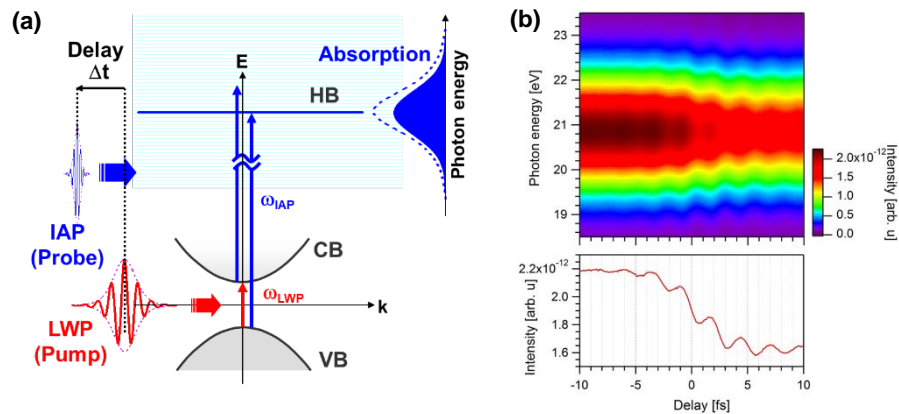


図 2. 半導体におけるアト秒時間分解吸収分光法をモデル化したバンド図(a)。価電子(VB)から伝導帯(CB)に光パルス(LWP)で励起すると同時にアト秒パルス(IAP)でプローブする。アト秒パルスが誘起する電子分極の虚部の大きさを LWP と IAP の遅延時間の関数としてプロットしたものの(b)。

収バンドを 3 準位に置き換えると、3 準位間の光学的ブロッホ方程式に帰着する。デコヒーレンスやエネルギー緩和は、現象論的に取り込んだ。ここでは、半導体として GaAs を念頭に、ポンプ光のエネルギーとバンドギャップがほぼ等しい共鳴条件の場合のシミュレーション結果を示す。ポンプ光電場による価電子帯-伝導帯間の遷移により、ポンプ光電場と等しい振動周期を有する双極子振動が誘起され、マクロスコピックには、コヒーレントな電子分極が形成されている。上記のような双極子振動が誘起されている時、各遅延時間のタイミングで照射されたアト秒パルスが誘起する電子分極の虚部の大きさをプロットしたものが図 4(b)である。吸収の大きさが時間領域で振動していくことがわかる。この振動構造の周期は、2.6 fs と見積もられ、双極子振動の周期と同じである。これにより、アト秒パルスの吸収プロファイルにおいて、価電子帯-伝導帯間遷移における電子分極の情報が転写されていることがわかった。このモデルを、価電子帯-伝導帯間を共鳴ではなく、3 光子過程で共鳴する条件に変更すると、GaN の実験結果 (Mashiko, Oguri et al., Nature Physics 12, 741 (2016)) を概ね再現することが明らかになった。

このようにアト秒時間分解吸収分光法は、価電子帯-伝導帯間に共鳴的・非共鳴的に励起される双極子振動を反映することが理解できたため、実験ではバンドギャップが 3.2 eV の GaN から、約 9 eV のサファイアにサンプルを変えて測定した。図 2(c)がその振動スペクトルとそのフーリエ変換を示している。複数の振動モードが見えているが、最低次の 4 次から 7 次までの振動があることがフーリエ変換にて確認できる。7 次のモードの周波数は 2.7 PHz に到達し、固体物質で確認された最高周波数の現象であることを確認した。

### (3) 超高時間分解プローブ ARPES の開発と、人工二次元結晶電子系アト秒ダイナミクス計測

図 3(a)に時間分解 ARPES 用の光学系を示す。チャープパルス増幅器から出射したパルスをビームスプリッター (BS) で 8:2 の強度比で分ける。前者を高次高調波発生用のプローブ光として、後者を試料のダイナミクスを起こすポンプ光とする。プローブ光用のパルスは軸外し放物面鏡 (f=300 mm) で Ar ガスが封入されたガスセル (金属製チューブ、開口径 1 mm、セル径 3 mm) に集光し、高次高調波発生を行う。発生した高次高調波は SiC/Mg 多層膜鏡によって、27 次高調波 (光子エネルギー:42.5 eV) の成分のみを切り出し、後段の同じ多層膜構造の凹面鏡で試料に集光する。ARPES 計測には静電半球型電子分析器 (Scienta omicron R3000) を用いた。試料は真空中で軸の回転及び、面内回転、傾斜回転機構がついており、真空中で様々な方向のバンド構造計測が可能になっている。

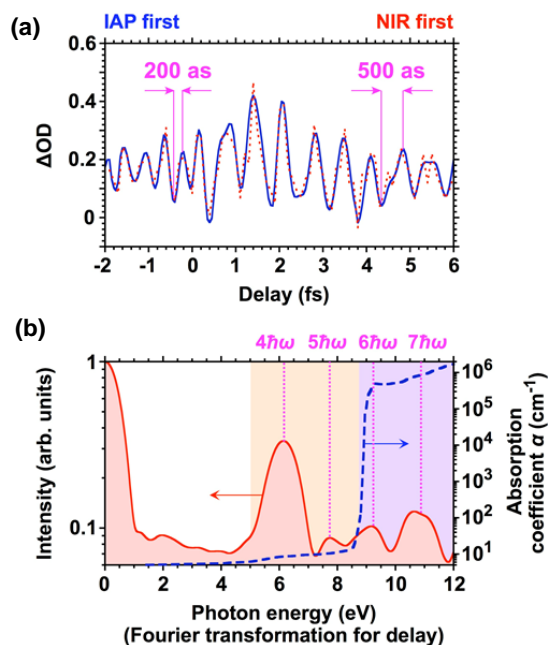


図 3. サファイアにおけるアト秒時間分解吸収分光。吸光度の遅延時間依存性(a)とそのフーリエ変換(b)。振動構造には、異なる周波数成分が含まれていることがわかる。



本装置を用いて、高配向熱分解グラファイト(HOPG)並びに単層 n 型グラフェンを測定試料として時間分解 ARPES 計測を行い、時間分解 ARPES 装置の評価及び、グラファイト・グラフェンの超高速ダイナミクス計測を行った。図 3(b)に、単層 n 型グラフェンにおける $\Gamma$ -K 方向の $\pi$ バンドの ARPES スペクトルを示す。この方向で計測した時には、よく知られた光電子の干渉効果によって $\pi$ バンドは片方のブランチのみ計測される。ポンプ光よりもプローブ光が先行している場合( $\Delta t = \infty$ )ではポンプ光の影響がないため、K 点付近の ARPES スペクトルはポンプ光を入れていないものと同じように観測される。次にポンプ光とプローブ光が重なった状態では( $\Delta t = 15$  fs)、K 点よりも高エネルギー側に電子分布が見え始める。さらに、500 fs 程度後は、励起された電子分布はほとんど緩和している。励起された電子分布のカウントを遅延時間の関数としてプロットすると、2つの指数関数から成る緩和曲線でプロットされた。緩和時定数は、速い成分 28 fs、遅い成分 166 fs 程度とフィッティングされ、それぞれ電子-電子散乱と、電子-格子散乱に由来する緩和定数であると考えられる。一方、HOPG の時間分解 ARPES 実験では、特に光照射直前・直後のダイナミクスに注目し、実験を行った結果、光照射直後の電子分布の立ち上がりから、プローブ光のパルス幅は 5 fs 以下程度あることがわかった。この結果は、本計測が世界最短であるサブ 5 fs のプローブ時間分解能を有する ARPES であることを示している。また、励起直後のダイナミクス計測に注力した結果、光励起直後の伝導帯内の超高速電子分布変化を計測することに成功した。このようなサブ 5 fs レベルの時間分解 ARPES の実現は、次のステップである ATTO-ARPES に向けた大きなマイルストーンを達成したことになる。なお、HOPG の実験結果は現在論文準備中であることから、図面等の詳細は不掲載とする。

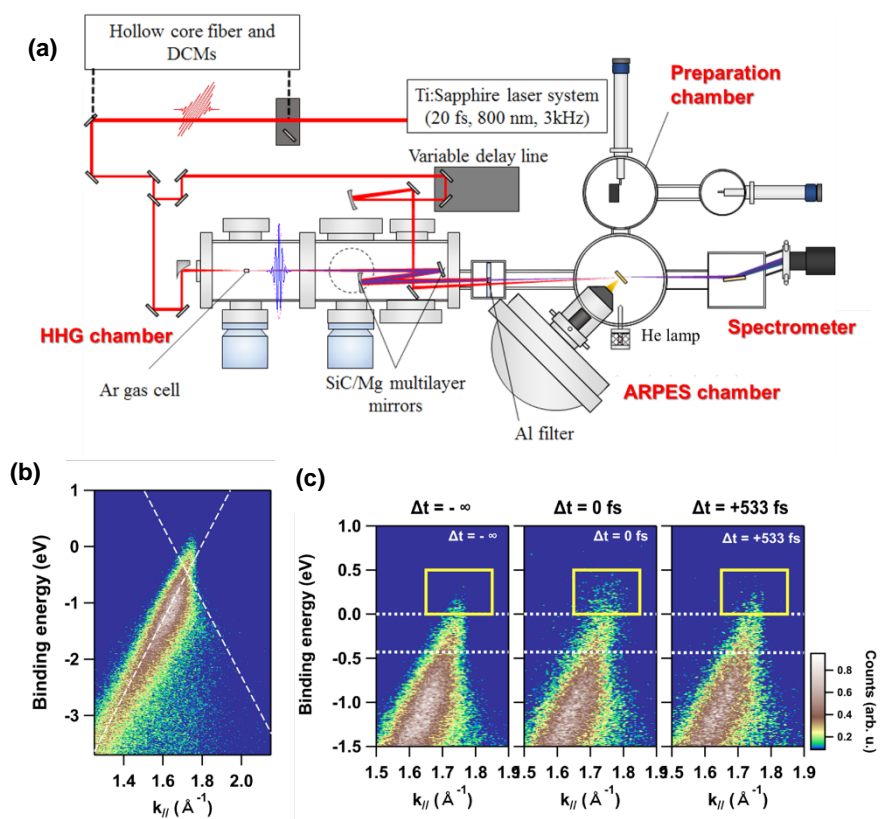


図 4. 27 次高調波(42.5 eV)をプローブ光とした時間分解 ARPES 装置(a)。本装置で計測した n 型 SiC エピタキシャルグラフェンの ARPES スペクトル(b)と、そのポンプ・プローブ遅延時間依存性。ポンプ光の強度は  $4 \times 10^{10} \text{ W/cm}^2$ 。

#### (4)超高感度アト秒反射率計測法の開発

本課題では、13 次から 17 次までのアト秒パルス列をプローブ光として用いた時間分解反射率計測法を実現した。高感度検出を実現するために、光電子増倍管を検出器として用いたロックイン検波技術のアト秒パルス時間分解測定に応用した。高感度検出法で知られるロックイン検波技術は、通常のレーザー分光ではよく知られた手法であり、繰返し周波数の低いレーザーをベースとするアト秒時間分解測定において本検出技術を初めて適用した。エピタキシャル成長した Bi(111)の薄膜サンプルの反射率の時間変化を計測すると、 $\Delta R/R \sim 10^{-4}$  程度の微小反射率変化の振動が明瞭に計測できていたことがわかった。この振動構造は、光によって誘起されたコヒーレントフォノン振動に対応している。本データは、1 回の遅延時間掃引に要する時間が 80 秒であり、それを 3 回平均化したものであり、合計でわずか 240 秒の測定時間の結果である。現状のアト秒時間分解分光技術では、測定時間が少なくとも数時間以上かかるのが一般的である。そのため、アト秒時間分解分光技術では、例えばポンプ光の強度依存性を計測するといったパラメータ依存性を計測することすら難しく、精密な物性計測技術としてはまだまだ未成熟な点が多い。我々が開発したアト秒時間分解反射率計測技術は、高感度かつ測定時間の大幅な短縮が実現できるため、新しい分光技術として有望である。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計10件（うち査読付論文 9件 / うち国際共著 1件 / うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Hiroki Mashiko, Ming-Chang Chen, Kouji Asaga, Akihiro Oshima, Ikufumi Katayama, Jun Takeda, Tadashi Nishikawa, and Katsuya Oguri	4. 巻 28
2. 論文標題 Spatially resolved spectral phase interferometry with isolated attosecond pulse	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Optics Express	6. 最初と最後の頁 21025-2103
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) <a href="https://doi.org/10.1364/OE.393922">https://doi.org/10.1364/OE.393922</a>	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 Ryoichi Makino, Shogo Mizuno, Hiroyuki Kageshima, and Hiroki Hibino	4. 巻 13
2. 論文標題 Controlled CVD growth of lateral and vertical graphene/h-BN heterostructures	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Applied Physics Express	6. 最初と最後の頁 065007-1-5
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) <a href="https://doi.org/10.35848/1882-0786/ab9169">https://doi.org/10.35848/1882-0786/ab9169</a>	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 Keiko Kato, Hiroki Mashiko, Youji Kunihashi, Hiroo Omi, Hideki Gotoh, and Katsuya Oguri	4. 巻 28
2. 論文標題 Highly sensitive transient reflection measurement in extreme ultraviolet region for tracking carrier and coherent phonon dynamics	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Optics Express	6. 最初と最後の頁 1595-1602
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) <a href="https://doi.org/10.35848/1347-4065/ab7a48">https://doi.org/10.35848/1347-4065/ab7a48</a>	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 小栗克弥, 増子拓紀, 後藤秀樹	4. 巻 54
2. 論文標題 半導体の光電場駆動ベタヘルツ電子応答	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 固体物理	6. 最初と最後の頁 173-185
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	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 K. Oguri, H. Mashiko, A. Suda, and H. Gotoh	4. 巻 118
2. 論文標題 Lightwave-driven electronic phenomena in solids observed by attosecond transient absorption spectroscopy	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Progress in Ultrafast Intense Laser Science XIV, Springs Series in Chemical Physics	6. 最初と最後の頁 219-239
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/978-3-030-03786-4	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 該当する

1. 著者名 H. Mashiko, Y. Chisuga, I. Katayama, K. Oguri, H. Masuda, J. Takeda, and H. Gotoh	4. 巻 9
2. 論文標題 Multi-petahertz electron interference in Cr:Al2O3 solid-state material	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Nature communications	6. 最初と最後の頁 1468
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41467-018-03885-7	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 Katsuya Oguri, Hiroki Mashiko, Tatsuya Ogawa, Yasutaka Hanada, Hidetoshi Nakano, and Hideki Gotoh	4. 巻 112
2. 論文標題 Sub-50-as isolated extreme ultraviolet continua generated by 1.6-cycle near-infrared pulse combined with double optical gating scheme	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Applied Physics Letters	6. 最初と最後の頁 181105
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) <a href="https://doi.org/10.1063/1.5027135">https://doi.org/10.1063/1.5027135</a>	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 -

〔学会発表〕 計50件 (うち招待講演 21件 / うち国際学会 23件)

1. 発表者名 K. Oguri, K. Kato, and H. Mashiko
2. 発表標題 Time-resolved ARPES of sub-10-fs intraband electric redistribution in graphite
3. 学会等名 Conference on Laser and Synchrotron Radiation Combination Experiment 2020 (LSC2020) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1 . 発表者名 H. Hibino and R. Makino
2 . 発表標題 Growth and structural analysis of 2D materials and heterostructures
3 . 学会等名 12th International Symposium on Advanced Plasma Science and its Applications for Nitrides and Nanomaterials (ISPlasma 2020) (招待講演)(国際学会)
4 . 発表年 2020年

1 . 発表者名 K. Oguri, H. Mashiko, K. Kato, and H. Gotoh
2 . 発表標題 Attosecond electron dynamics in solids -toward Petahertz-scale solid state technology
3 . 学会等名 vInternational Conference on Ultrafast Optical Science (ULTRAFASTLIGHT 2019)(招待講演)(国際学会)
4 . 発表年 2019年

1 . 発表者名 K. Oguri, K. Toume, H. Mashiko, K. Kato, Y. Sekine, H. Hibino, A. Suda, and H. Gotoh
2 . 発表標題 Time-resolved ARPES observation of nonthermal relaxation process in graphite at extreme time scales
3 . 学会等名 The 10th Shanghai-Tokyo Advanced Research Symposium on Ultrafast Intense Laser Science (STAR10)(招待講演)(国際学会)
4 . 発表年 2019年

1 . 発表者名 K. Oguri, K. Toume, Y. Hasegawa, H. Mashiko, K. Kato, Y. Sekine, H. Hibino, A. Suda, T. Nishikawa, and H. Goto
2 . 発表標題 Dirac electron dynamics of graphene related systems towards petahertz-scale solid state technology
3 . 学会等名 The 9th Shanghai-Tokyo Advanced Research Symposium on Ultrafast Intense Laser Science (STAR9)(招待講演)(国際学会)
4 . 発表年 2018年



1 . 発表者名 K. Oguri
2 . 発表標題 Petahertz solid state technology by attosecond high-harmonic-based spectroscopy
3 . 学会等名 Special Symposium on laser matter interaction Sinica IAMS (招待講演) (国際学会)
4 . 発表年 2019年

1 . 発表者名 K. Oguri, H. Mashiko, T. Ogawa, Y. Hanada, and H. Gotoh
2 . 発表標題 Carrier-envelope phase dependence of 70-eV attosecond continuum generated by double optical gated sub-two-cycle pulse
3 . 学会等名 The 8th Shanghai-Tokyo Advanced Research Symposium on Ultrafast Intense Laser Science (STAR8) (招待講演) (国際学会)
4 . 発表年 2017年

1 . 発表者名 K. Oguri, H. Mashiko, and H. Gotoh
2 . 発表標題 Broadband isolated attosecond pulse generation and its application to PHz-wave and electron interaction dynamics in solid
3 . 学会等名 The 2nd International Symposium on Attosecond Science (招待講演) (国際学会)
4 . 発表年 2017年

1 . 発表者名 K. Oguri, H. Mashiko, K. Kato, and H. Gotoh
2 . 発表標題 New trend of ultrafast EUV spectroscopy towards petahertz-scale solid state technology
3 . 学会等名 Conference on Laser and Synchrotron Radiation Combination Experiment (LSC2018) (招待講演) (国際学会)
4 . 発表年 2018年

〔図書〕 計0件

〔出願〕 計1件

産業財産権の名称 分光計測装置	発明者 加藤景子、増子拓紀、小栗克弥、後藤秀樹	権利者 同左
産業財産権の種類、番号 特許、PCT/JP2019/033652	出願年 2019年	国内・外国の別 外国

〔取得〕 計0件

〔その他〕

<p>報道発表 “アト秒パルス光源を用いた世界最高速の電子振動現象および減衰過程の観測”、2018年4月17日。          日経産業新聞5面 2018年04月19日記事掲載          日刊工業新聞9面 2018年04月19日記事掲載          通信興業新聞2面 2018年04月23日記事掲載</p>
--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

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	増子 拓紀  (Mashiko Hiroki)  (60649664)	日本電信電話株式会社NTT物性科学基礎研究所・量子光物性研究部・特別研究員   (92704)	
研究分担者	加藤 景子  (Kato Keiko)  (40455267)	日本電信電話株式会社NTT物性科学基礎研究所・量子光物性研究部・主任研究員   (92704)	
研究分担者	日比野 浩樹  (Hibino Hiroki)  (60393740)	関西学院大学・理工学部・教授   (34504)	
研究分担者	関根 佳明  (Sekine Yoshiaki)  (70393783)	日本電信電話株式会社NTT物性科学基礎研究所・機能物質科学研究部・主任研究員   (92704)	

## 6. 研究組織（つづき）

	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	石澤 淳  (Ishizawa Atsushi)  (30393797)	日本電信電話株式会社NTT物性科学基礎研究所・量子光物 性研究部・主任研究員    (92704)	
研究 協力者	日達 研一  (Hitachi Kenichi)  (60564276)	日本電信電話株式会社NTT物性科学基礎研究所・量子光物 性研究部・主任研究員    (92704)	
研究 協力者	佐々木 健一  (Sasaki Kenichi)  (50396511)	日本電信電話株式会社NTT物性科学基礎研究所・機能物質 科学研究部・主任研究員    (92704)	
研究 協力者	中野 秀俊  (Nakano Hidetoshi)  (90393793)	東洋大学・理工学部・教授    (32663)	
連携 研究者	後藤 秀樹  (Goto Hideki)  (10393795)	日本電信電話株式会社NTT物性科学基礎研究所・量子光物 性研究部・所長    (92704)	