「固体表面における超高速ダイナミックイメージングの最前線」 解説小特集号によせて

小栗 克弥

日本電信電話(株) NTT物性科学基礎研究所 (〒243-0198 神奈川県厚木市森の里若宮3-1)

Preface to Topical Papers on the Cutting Edge of Ultrafast Dynamic Imaging Technology on Solid Surface

Katsuya OGURI

NTT Basic Research Laboratories, NTT Corporation, 3-1 Morinosato Wakamiya, Atsugi-shi, Kanagawa 243-0198

(Received April 10, 2012)

“高速で動いているものを目に見るようにしたい”という欲求は、100年以上も前からあったらしい。ものの本によると、1878年、エドワード・マイブリッジというイギリス人の写真家が、当時一般的であったばね方式から電気式の高速シャッターに改造した12台ものカメラを並べて、疾走中の馬の撮影に成功したのが、世界初の“連続写真”と言われている。1826年に最初の写真が発明されて、およそ50年の後、写真は静止画から動画への第一歩を踏み出した。それからおよそ130年後の今日、この“連続写真による可視化”というコンセプトは、物質中の電子や原子の動きを捉え、化学反応や相転移といった瞬時に変化する物理過程を、まさに目で見えるように直観的に理解したいという研究者の欲求の中に脈々と引き継がれている。これを可能とする技術が、本小特集号でとりあげる、超短パルス光源技術とイメージング技術を融合させた技術、すなわち“超高速ダイナミックイメージング”とも呼ぶべき超高速光技術である。

この超高速ダイナミックイメージング技術は、“高速シャッター”に相当する超短パルス光源技術と、“カメラ”に相当するイメージング技術、そして両者を最適につなぐ組合せ技術から成る。超短パルス光源技術の最近の進展は目覚ましいものがあり、シャッタースピードに相当するパルス幅がついにアト秒領域に突入し、波長もX線自由電子レーザーの登場でフェムト秒X線パルスが使えるようになってきた。さらに、高機能かつ安定なピコ秒・フェムト秒レーザー装置も比較的安価に入手できるようになってきている。一方、光学顕微鏡を嚆矢とする顕微イメージング技術の発展も同様であり、空間分解能はナノメートル領域に到達し、すでに物性研究において欠くことのできないツールになってきている。そして、現在、これら2つの要素技術を最適かつ独自の発想で組み合わせ、固体から気体、プラズマなど様々な物理

系における“連続写真”を撮影し、目では見えない超高速現象を可視化する研究が注目されており、新たな融合領域分野として認知されつつある。しかしながら、この超高速ダイナミックイメージング技術による物性研究は、幅広い研究分野でそれぞれの進化を遂げてきていることから、全体像が見えにくい。残念ながら、それらすべての研究を取り上げるのは一特集号では到底無理である。そこで、本小特集号では、それら多様な対象の中から、特に固体の表面を計測対象とした研究に焦点を合わせ、それぞれの超高速ダイナミックイメージング技術の原理と、それが明らかにする最先端固体物性研究の面白さを、読者が広く俯瞰できるように企画した。

さて、本特集は、6つの解説からなる。前半の3つは、フェムト秒レーザーとナノイメージング技術を組み合わせた超高速ダイナミックイメージング技術による最新の固体表面研究の解説である。まず、走査型トンネル顕微鏡(STM)とフェムト秒レーザーを組み合わせたナノスケールポンププローブ法による半導体ナノ構造局所キャリアダイナミクスの実時間イメージングの研究を取り上げる。本研究では、原子レベルの空間分解能とフェムト秒の時間分解能を合わせ持つ時間分解STM技術を実現しており、微細化が進む半導体ナノ構造における新機能の発現やメカニズムを探る強力な手法としてその発展が期待される。次の2つは、光と金属の相互作用により多方面の光デバイス応用が期待されているプラズモニクスに関する研究を取り上げる。プラズモニクスの進展は、ナノ空間分解能とフェムト秒時間分解能を兼ね備えた技術の開発が重要な鍵となるが、ここでは、近接場光学顕微鏡とフェムト秒レーザーを組み合わせた時間分解近接場顕微法による金属ナノ構造における表面プラズモン動的近接場イメージングの研究と、光電子顕微鏡(PEEM)とフェムト秒レーザーを組み合わせた時間分解PEEM法

による表面プラズモン波束の伝搬イメージングの研究の2つのアプローチを紹介する。前者は、ナノ微粒子やナノ孔といった金属ナノ構造と光の相互作用による電界増強を利用した超高感度光センサーなどに応用が期待される、局在型表面プラズモンのダイナミクス計測に関して威力を発揮する。後者は、ナノメートルサイズの極微小光回路の実現に不可欠な、金属表面を伝搬する表面プラズモンの波束ダイナミクスや金属ナノオブジェクトによる表面プラズモン伝搬の制御に関して極めて有効である。

後半の3つは、それぞれ計測対象、超短パルス光源、計測スキームに特徴をもった超高速ダイナミックイメージング研究についての解説である。まず、計測対象として半導体の電子スピンのダイナミクスに注目した、時間分解カー効果イメージングで観る半導体電子スピンダイナミクスの研究を取り上げる。新たなエレクトロニクス分野として大きな注目を集めているスピントロニクスにおいて電子スピンの運動を計測し制御することは必要不可欠である。本研究では、走査型光学顕微鏡と短パルスレーザーを組み合わせたカー効果走査型顕微鏡により電子スピンをイメージングし、表面弾性波による制御を実現しており、表面弾性波によるスピン輸送の研究に欠かせない技術として発展が期待されうる。次に、特徴ある超短パルス光源として、波長13.9 nmのプラズマ軟X線

レーザーを用いたアブレーション表面形状イメージングの研究を紹介する。可視領域のレーザー干渉計はすでに広く利用されているが、本研究では、この干渉計を波長が格段に短い軟X線レーザーで実現し、レーザーアブレーションにおける固体表面のナノスケール形状の動的変化を捉えることに成功している。パルスレーザーの応用として広く利用されているレーザー加工の研究において、極めて有効なツールになることが期待できる。最後は、以上の研究とは少し視点を変え、量や大きさが十分に無い試料における不可逆な過程など繰り返し測定に不向きな物理現象に対して威力を発揮するシングルショット時間・周波数イメージング法という新たな計測スキームを紹介する。本研究では、時間軸を空間軸に置き直したシングルショットベースの時間・周波数イメージング手法を開発し、フォノンポラリトンのダイナミクス計測を実現しているが、従来の光物性研究では対象としにくかった不可逆過程への展開が期待できる手法である。

本小特集号が、最先端の超高速ダイナミックイメージング技術による固体光物性研究の理解を深め、レーザー研究者と物性研究者双方における今後の研究のヒントになれば、望外の喜びである。最後に、本企画の趣旨に賛同し、御多忙の中、この分野になじみのない読者にもわかり易く解説して頂いた諸先生方に心より感謝を申し上げます。