

スピン偏極パルス透過電子顕微鏡の開発

桑原 真人*

1. はじめに

透過電子顕微鏡(TEM)や走査電子顕微鏡(SEM)に代表される電子顕微鏡は、これまでにウィルスやナノ構造炭素材料の発見から、元素位置や欠陥、界面構造などの種々の微細構造の解明、さらにはナノデバイスの不良解析に至る幅広い分野へ貢献を果たしている⁽¹⁾⁻⁽³⁾。また近年、電子線用収差補正技術の確立、微分位相コントラストやホログラフィーによる高分解能の位相マッピング、高速・高感度イメージングセンサの発展、クライオ電子顕微鏡と単粒子解析によるタンパク質構造解析の進展など、今後さらに多くの分野への応用・発展が期待される分析手法である⁽⁴⁾⁻⁽⁸⁾。

しかし、プローブ電子をもちいたナノメートルオーダーの局所構造解析では、静的物性またはマイクロ秒程度の時間平均した情報に限られてきた。この要因は、連続的な電子線を利用していること、電子線用イメージングセンサのシャッタ速度の律速によるところが大きい。また、1980年代後半のBostanjogloらによるHigh-speed streak-imaging electron microscopeの開発が進められたものの、電子線偏向器の速度限界により時間分解能は数十ナノ秒程度に限られてきた⁽⁹⁾。

この時間分解能の限界を突破する手法として近年、パルスレーザーと光電効果を利用したパルス電子線源が電子顕微鏡に応用され、ナノ秒から数百フェムト秒の時間分解能を有する電子顕微鏡が開発されている。これらは大きく3つの種類に分別される。一つは時間分解した回折図形取得を行うUltrafast Electron Deflection(UED)、シングルショット撮像によるTEM像取得を行うDynamic TEM(DTEM)、そしてストロボ撮像による時間分解TEMイメージングを実現するUltrafast Electron Microscope(UEM)である。これらの電子源には、熱電子源用チップまたは金属カソードが用いられ、数ナノ秒~数百フェムト秒の時間分解能が実現されている⁽¹⁰⁾⁻⁽¹³⁾。また、金属ターゲットに大強度レーザーを照

射し、電子放出点近傍で既に数MeVの電子エネルギーを有するパルス電子線発生が実現しており、シングルショットUEDへの応用が期待されている⁽¹⁴⁾。一方シングルショット撮像が可能なDTEMは、高い電荷量を持った数十nsのパルス電子線発生により、非可逆過程のTEM観察を可能にする電子顕微鏡である。シングルショットTEM像の時間シリーズは結像レンズ下の静電型高速デフレクター(電子線の進行方向をマイクロ秒以下で変調するための偏向器)により記録素子上に並べられ、物質の反応経過を時系列に撮像する⁽¹⁵⁾。UEMはストロボスコピックな実験手法となり観察対象は可逆過程に限られる。しかし、積算することで撮像に必要な電子数を確保することが可能となり、1パルス当たりの電荷量は小さくて良く、数百フェムト秒までの超短パルス動作が可能となる。UEMの電子源には、LaB₆や銀カソード等に紫外レーザーによる光励起により駆動するものが利用されており、強度の高い紫外光源を必要とすることからパルス駆動のみ可能となっている。このUEMは多方面で精力的に進められており、カルフォルニア工科大学、EPFL、Göttingen大学、Strasbourg大学で既に実現されている⁽¹⁶⁾⁻⁽¹⁸⁾。また現在開発が進められている仏国CEMESではコヒーレントなパルス電子線利用を目指しており、カソードには冷陰極電界放出電子源とレーザーを組み合わせた方式を採用している⁽¹⁹⁾。

これらとは一線を画す方法として我々は半導体フォトカソード電子源を採用したスピン偏極パルス透過電子顕微鏡(SPTEM)を開発し、コヒーレント時間分解TEM像の取得、高いエネルギー分解能を有する時間分解EELSの実現を進めている。この半導体フォトカソードは、負の電子親和性(NEA: Negative Electron Affinity)表面を介して電子放出がなされ、高い量子効率と高いスピン偏極度の両立が可能な方式である。偏極度および量子効率はそれぞれ約90%、0.5%が実現されており、さらに表面電荷制限現象の克服により高い繰返し周波数でサブピコ秒パルスビーム生成が可能

* 名古屋大学 未来材料・システム研究所 附属高度計測実践センター; 准教授(〒464-8601 名古屋市千種区不老町)
Development of Spin-polarized Pulse-TEM; Makoto Kuwahara (Advanced Measurement Technology Center, Institute of Materials and Systems for Sustainability, Nagoya University, Nagoya)
Keywords: *transmission electron microscope, spin, pulse, photocathode*
2019年2月12日受理[doi:10.2320/materia.58.269]

となっている⁽²⁰⁾⁽²¹⁾。また SPTEM を用いて、半導体フォトカソードが高輝度かつ低エネルギー分散の電子波であることが明らかとなってきている⁽²²⁾⁽²³⁾。

2. NEA 表面を有する半導体フォトカソード

(1) 負の電子親和性(NEA)表面

p 型半導体の清浄表面にアルカリ金属を一原子層程度蒸着すると、その真空準位は伝導帯下端のエネルギーよりも低くなる。この表面状態を負の電子親和性(NEA: Negative Electron Affinity)表面といい、伝導帯底に存在する低エネルギー電子を真空中に取り出すことが可能となる。SPTEM では、この半導体部分に GaAs-GaAsP 歪超格子を主に用いている。半導体フォトカソードでは、次の三つの過程を経て電子線が生成される。まず、(i)半導体バンドギャップ程度のエネルギーを持つレーザー光を照射し、活性層の伝導帯に電子を励起する。その後、励起電子は(ii)表面へと拡散し、(iii)NEA 表面を介して真空へ放出される(図1)。金属カソードや LaB₆ を用いた光陰極材料では、近紫外レーザーにより数 eV の真空準位を越えるエネルギーを電子に与え、光電子放出を実現しているのに対して、NEA 表面を有する半導体フォトカソードではバンドギャップ程度の光子エネルギーで光電子放出が可能となる。

(2) 時間応答性能と光-電子変換効率(量子効率)

通常の金属フォトカソードでは、紫外レーザーにより物質中に励起された電子はエネルギー緩和を強く受けながら表面近傍へと拡散してくる。この緩和過程を経てもなお表面の真空準位より大きなエネルギーを持つ一部の電子が電子線として取り出される。このエネルギー緩和過程は数十 fs と早いいため、脱出できる電子の物質内平均自由行程は数 nm と浅い⁽²⁴⁾。このため、金属カソードではフェムト秒の超高速電子パルス生成が容易に可能となる。しかし、エネルギー緩和により励起した電子の殆どが脱出できず、その量子効率は

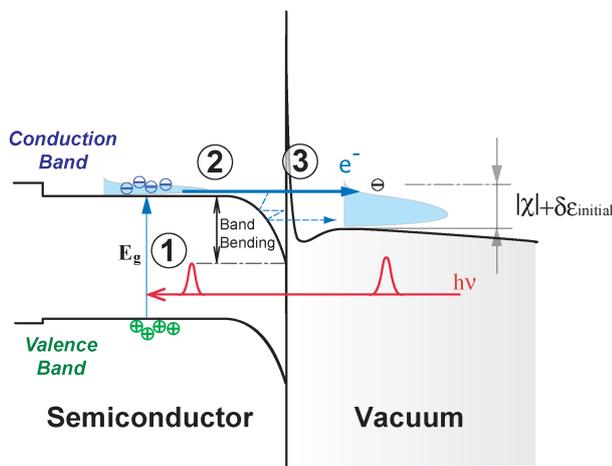


図1 電子放出機構とエネルギー分散幅。

Cu において励起波長 266 nm で $5 \times 10^{-4}\%$ 程度と非常に低い⁽²⁵⁾。

一方、NEA を用いた半導体フォトカソードは、伝導帯下端にエネルギー緩和した電子であっても真空中に取り出すことが可能である。伝導帯下端の電子は再結合により消滅するがその再結合時間は 100 ps 程度と長いため、100 nm の活性層厚の拡散時間が数 ps であることを考慮すると、非常に効率の良い光陰極であることが分かる⁽²⁶⁾。不利な点は拡散時間によりパルス幅が律速されてしまうことである。しかし、活性層の厚みを減らし拡散距離を短くすることで、サブピコ秒パルスの発生が可能となる。実際に、数ピコ秒までの早いパルス生成が確認されており、ほぼ固体内部の拡散速度程度の早さで電子放出が起こっていることが確かめられている⁽²⁷⁾⁽²⁸⁾。

3. 半導体フォトカソードを用いた透過電子顕微鏡

(1) 装置の概要

図2に NEA 表面を有する半導体フォトカソードを搭載した SPTEM の装置構成を示す。電子顕微鏡本体は超高真空対応 300 kV 透過電子顕微鏡 H9000-UHV (日立製作所製) をベースに開発を行った。本装置において NEA フォトカソード型 DC 電子銃から放出された電子は、スピン制御器を介して電子顕微鏡本体へと入射される。この電子銃では、背面照射型フォトカソードを採用することで大きな光収束角を可能にし、励起レーザーのスポット直径 1.8 μm を実現している⁽²⁹⁾。これにより、輝度はショットキー型電子源と同等かそれ以上の性能が期待される。さらに電子銃の引き出し電界は、空間電荷効果を抑制(輝度の低下を抑制)するために、フォトカソード表面上で 4 MV/m の高い電場勾配になるよう設計されている。これにより、高い電荷量を持ったパルス電子線発生が可能となる。また安定的に電子顕微鏡を動作させるために、電子銃の真空度は 10^{-10} Pa 台の極高真空を実現し、NEA 表面劣化を抑制している。電子顕微鏡本体とレーザー光学系は別に設置されており、カソードへのレーザー照射は光ファイバーを用いて行われる。これにより、TEM 鏡体とレーザー光学系との相対的な振動をキャンセルすることができ、安定した電子線光源位置の確保が可能となっている。また、真空外部より試料励起用レーザーを導入可能であり、ポンプ光で物質を励起させプローブ電子で観測するポンプ-プローブ実験が可能となる。電子パルス幅測定にはフェラデーカップ型電流モニターを設けることで、ナノ秒までの電子パルス幅を直接観察する。ピコ秒パルスの場合には、静電型高速偏向器を用いたストリーク法によりパルス幅を測定する⁽²⁸⁾。本装置では記録装置としてシンチレーターを介した CCD カメラ (Gatan 社製 Orius SC200) とエネルギー損失分光装置 (Gatan 社製 ENFINA) を有している。

SPTEM では、連続電子線からピコ秒までの時間変調した電子線の発生が可能であり、広いダイナミックレンジを有する時間分解能が実現される。レーザー光学系はパルス電子線

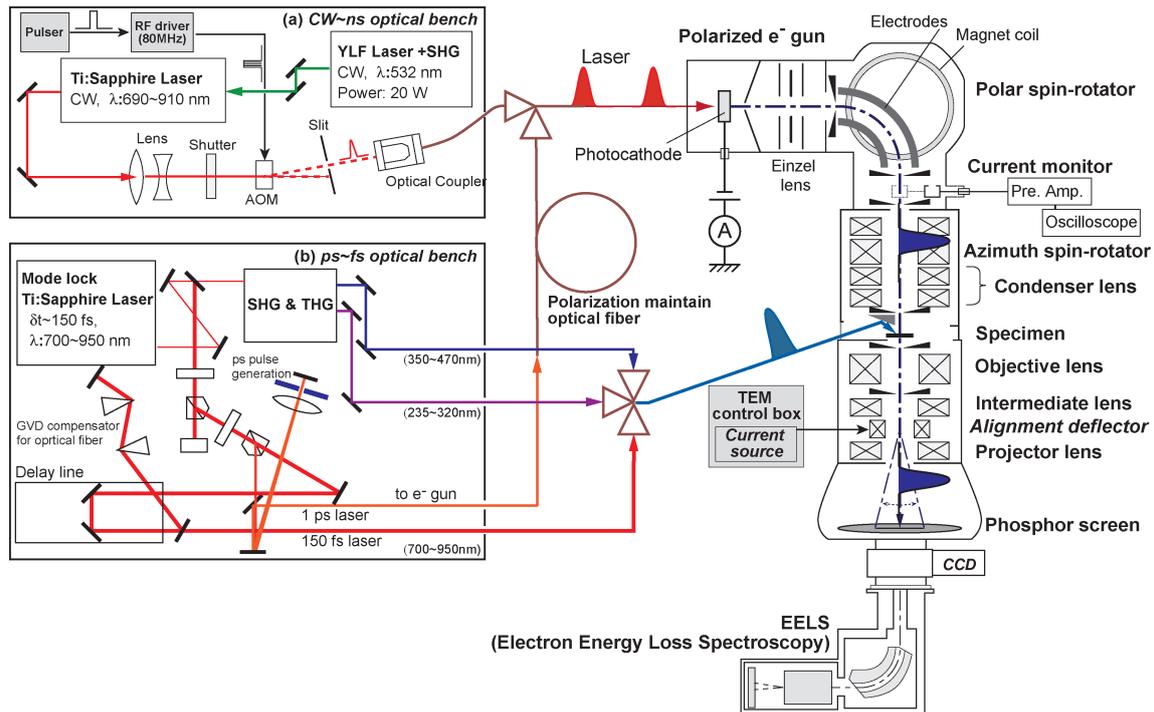


図2 SPTM と電子源駆動レーザーおよび試料励起用レーザーの構成。

のパルス幅により2つの光学台から構成されている。一つは、CWレーザーを音響光学変調器(Acousto-Optic Modulator: AOM) (または電気光学変調器(Electro-Optic Modulator: EOM))で強度変調することにより、連続(CW: continuous wave)モードから2 nsパルス電子線までの電子線発生が可能となる光学系である。もう一つの下段の光学系では20 ps から180 fs のパルス幅が発生できる。またレーザー行路を2方向に分割し、一方に光路差を調整する遅延機構を備えることで、ポンプレーザーとプローブ電子線からなる時間分解測定を可能にしている。また、波長幅選択によるピコ秒パルスレーザー生成系と群速度分散補償系が備わっており、光ファイバー伝送中に発生する群速度分散を相殺し、励起レーザーのパルス幅増大を抑制している。

(2) プローブ電子線の基礎特性

SPTM では連続モードにおいて、TEM 像および回折図形の取得が可能であることを確認し、平面から放出される電子源を用いた初めての例となった。また、電子エネルギー損失分光(EELS)におけるゼロロスピーク幅から現行の最高輝度を有する電界放出型電子源を越える240 meV 以下の狭線幅を有することが確認された(図3)⁽²²⁾。これはEELS分析においてエネルギー分解能に寄与する性能であり、詳細な組成分析や小さなエネルギー分裂を検出することが可能となる。また色収差の低減による分解能の向上、モノクロメータによる極単色化における高輝度電子源として利用が期待される。EELスペクトルにおけるゼロロスピークは非対称なスペクトル形状をしており、正のエネルギー損失側の急峻な立ち下りは低いバックグラウンドの実現につながる。この特

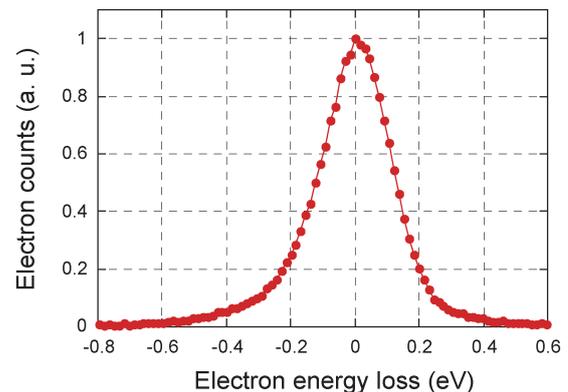


図3 エネルギー損失分光スペクトルにおけるゼロロスピーク形状。

徴は、プラズモンやバンド間遷移などの数 eV 程度の低エネルギー領域で起きるエネルギー損失において分析精度の向上に大きく貢献する。平面の半導体フォトカソードから放出される電子線の輝度を計測した結果、ソース電流2.5 μA において $3.8 \times 10^7 \text{ A cm}^{-2} \text{ sr}^{-1} @ 30 \text{ keV}$ であることを直接測定した。これはビームエネルギー200 keV において $3.1 \times 10^8 \text{ A cm}^{-2} \text{ sr}^{-1}$ に相当し、ショットキー電子源と同等の輝度である⁽³⁰⁾。次に、カソード放出面上でのエミッタンスについても実測を行い、規格化した横方向の運動量拡がりを出した。その結果を図4に示す。これより、30 keV における電子ビームの拡がり角は2 mrad 程度であり、電子が高い平行性を持って半導体フォトカソード表面から放出されることが確認された⁽²³⁾⁽³¹⁾。この横方向の運動量拡がりには、半導体中

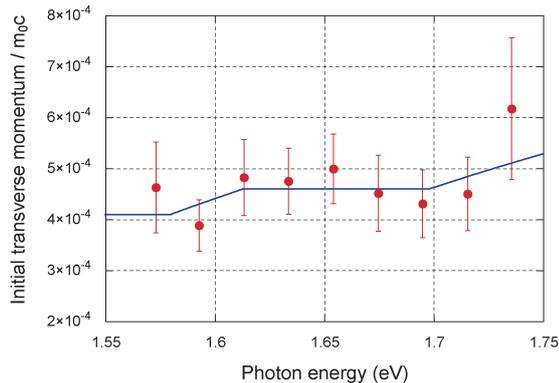


図4 電子線発生時の横方向運動量広がりと励起エネルギー依存性。実線は理論から予想される運動量広がり。

の波数-エネルギー分散特性，輸送中のエネルギー緩和，固体中における電子の有効質量により特性が決定される．近年，市橋らによる角度分解光電子分光(ARPES)測定により，NEA表面を介した光電子のエネルギー分散計測が行われた⁽³²⁾．そのエネルギー分散は伝導帯底付近の波数特性を反映した分散構造を有していることが実測されている．特に，SPTEMで使用している半導体の活性層厚は100 nm程度と薄いため，伝導帯底の波数-エネルギー空間における分散曲線を強く反映する．半導体中における波数の広がりが均一であると過程すると，平面から放出される電子の横方向運動量広がり $\langle p_{\perp} \rangle / m_0c$ は，電子親和度 χ_{NEA} と伝導帯底から見た光励起電子のエネルギー δE を用いて， $\sqrt{\{k_B T + 2(\chi_{NEA} + \delta E) / 3\} / m_0c^2}$ と表される⁽²³⁾．このため，伝導帯底へ励起した電子を活用できるNEAフォトカソードでは，エネルギー幅と横方向運動量分散が同時に小さい状態を実現することが可能となる．この性能は電子波のコヒーレンス特性に重要な意味を持つ．実際に本装置をもちいて電子線バイプリズムにより生成した干渉縞(図5)から，試料面上で150 nm以上の可干渉長を有していること，その平行度は $(1.76 \pm 0.3) \times 10^{-5}$ radであることが確認された⁽²³⁾．これは電子波束が 4×10^{-6} の高い縮退度を有し，高い偏極度，高い輝度，長いコヒーレント長から量子干渉効果(アンチバンチング)の増幅が期待されることを示している⁽³³⁾．

4. パルス電子線発生と時間分解測定への応用

SPTEMでは連続動作とパルス動作において，フォトカソードに照射するレーザー径およびその位置は変化しない．このため，空間電荷効果がない場合，その光源位置およびビームエミッタンスは両動作条件において同じである．このため，電子光学条件を一定にしていれば，試料位置における電子線の干渉性は連続動作とパルス動作で同じになる特徴を持つ．これは，電子源の量子効率が十分に高いため使用するレーザー強度は低くて良く，小型のレーザー光源や光ファイバーによるレーザー輸送が容易にできることが関わっている．

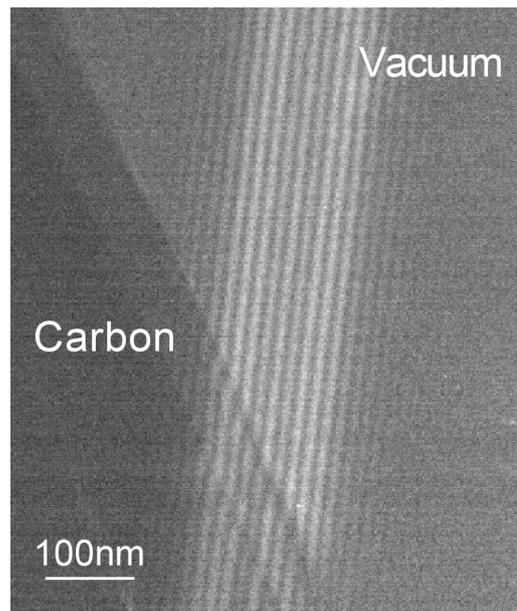


図5 連続電子線による干渉縞の様子．干渉縞は電子線バイプリズムを用いた電子波の重ね合わせにより実現されている．

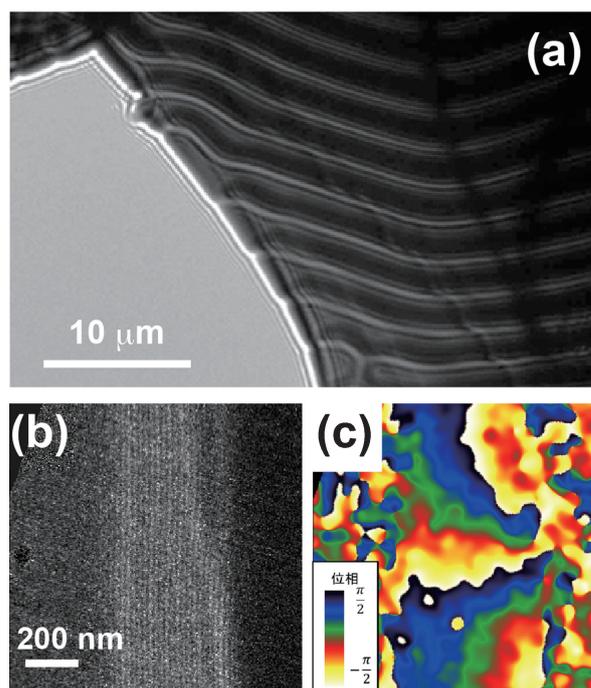


図6 (a)連続電子線による磁区構造観察(ローレンツ顕微鏡像)，(b)ピコ秒パルス電子波による電子線ホログラム．(c)パルス電子線ホログラフィー(b)を用いて抽出した位相像．

連続動作時の干渉実験と同様に，電子線バイプリズムを用いてピコ秒パルス電子線による干渉縞が得られるかを実験し，パルス電子による時間分解位相情報の抽出が可能であることを明らかにした⁽³⁴⁾．図6にパルス動作時における電子線ホログラフィーの一例を示す．試料は $\text{SrFe}_{12}\text{O}_{19}$ をアルゴンイ

オンミリングにより薄片化したものであり、室温において試料内部は迷路状の磁区ドメインを有する。本試料は名古屋工業大学の浅香透准教授よりご提供いただいた。パルス電子線によるホログラフイーには、試料中の磁区構造が真空境界付近まで存在する箇所を用い、真空中に漏れ出す磁場を計測した。図 6(a) にローレンツ像により観察した磁区構造を示す。試料端の磁壁位置のフレネル縞が曲がっていることから磁場が真空中に漏れていることが推察される。図 6(b) は 80 MHz の 16 ps パルス幅の電子線を用い、露光時間 5 秒で取得した電子線ホログラムである。干渉縞は電子線バイプリズムを用いて、漏れ磁場によって変調を受けた電子波(試料の界面付近)と、参照波(真空領域)を重ね合わせることで生成される。フーリエ変換再生法を用いて干渉領域の位相抽出を行った結果、図 6(c) に示す磁場分布を反映した時間分解位相像を得た。ここで、図 6(c) は位相を二倍増幅し位相変化を強調して表している。この等位相線図は試料からの漏れ磁場の分布に対応している。

しかしながら、図 6(b) のホログラムを見て分かる通り、電子線ホログラフイーに利用できる電子線量が連続動作に比べて少ない。これは、パルス電子線のピーク輝度は連続動作時よりも高いが、そのデューティ比(パルス幅とパルス間隔の比)が低いことにより、時間平均したときの輝度は低く見えてしまうことに起因する。一方、パルス動作において電荷量をさらに増やそうとすると、ベルシェ効果を含む空間電荷効果による輝度の低下、パルス幅やエネルギー幅の増大が生じてしまう。このため、パルス当たり詰り込められる電子数には限界が存在する。本装置においても、空間電荷制限現象によりエネルギー幅の増加、干渉性の低下などが実験的に確かめられている⁽³⁵⁾。空間電荷効果を含むシミュレーションにより、空間電荷制限効果は電子源の加速部分で起こっていることが解明されており、その加速電場の改善が問題克服の鍵となる。

5. 高輝度パルス電子線の実現に向けて

TEM においてコヒーレントなピコ秒パルス電子線発生を実現してきた。しかし、電子線発生部における空間電荷効果により、パルス当たりの電子数に制限が生じることも明らかとなった。この制限のため、ストロボ撮像法による時間分解測定では 1 回の像取得に長い時間を要してしまう。さらに、シングルショット撮像法においては像取得に必要な電子数確保と撮像時間(または TEM 像の拡大率)とトレードオフ関係により、非可逆過程の観測における時間分解能が数百ナノ秒程度に留まっている。このため、投影型像取得の強みである非可逆過程の観察を大きく発展させるには、電子線発生部の高性能化による高輝度パルス電子線発生の実現が必要不可欠である。高密度なパルス電子線発生には、高い初期加速電場と速やかな相対論領域への加速が有効であり、図 7 に示すシミュレーション結果もそれを支持している。図 7 は 1 ps パルス幅で電子発生させた時の規格化輝度が、電荷量に

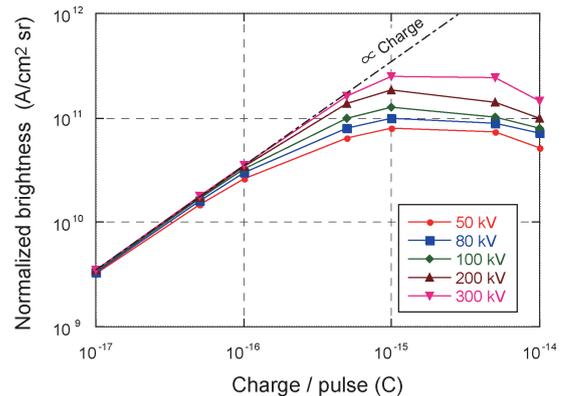


図 7 空間電荷効果を考慮したシミュレーションにより算出した規格化輝度の電荷量依存特性。

応じてどのように変化するか、加速電圧と併せてプロットしたものである。ここで、加速電圧による輝度の増幅を無視するため、電子線進行方向の運動量を m_0c とすることで規格化を行っている。また図中の一点鎖線は輝度が電荷量に比例する場合の直線を表している。このシミュレーションは加速勾配の増加に伴い、線形性から外れる電荷量が大きくなることを示唆している。その結果、最高輝度を実現する電荷量は加速電圧が高い方が大きいことがわかる。一方、装置自体の高度化によっても時間分解能の限界が存在するため、分析機自体の高度化だけではなく、情報学的アプローチによる超低ドーズ量画像処理を組み合わせることが今後必須と考えられる。動的観察では像全体が大きく変化することはなく、その一部分の変化を捉えることが主であるため、データとしてはスパースとなる。このため、圧縮センシングや辞書学習を用いた画像解析の導入が適している⁽³⁶⁾⁽³⁷⁾。量子効率の高いフォトカソードを活用する装置では、連続駆動からピコ秒動作までの広いダイナミックレンジを電子光学系の変更無しで実現できる。これにより、超時間分解測定前後の像取得が可能となるため、十分なコントラストをもつ参照像を取得できる。この特徴を活かすことで、低いコントラストの時間分解測定像それぞれを圧縮センシングにより回復させることが可能となり、超低ドーズ量での時間分解測定が期待できる。このように装置の高度化と新たな画像解析手法の相乗効果により、利用可能な電子線量を余すことなく利用し、電子顕微鏡の時空間分解能の限界を越えていくことが今後の課題となる。

6. おわりに

半導体フォトカソードを利用した SPTEM では、これまでにピコ秒パルス電子線発生とそれを用いた TEM 像、干渉縞観測までを実現した。ここで紹介した時間分解測定結果はすべてストロボスコーピックな測定方法によるものであり、UEM モードでの時間分解測定を可能とする内容である。今後は、局所状態を時間軸で捉えることで過渡現象を含む物質の動的性質を明らかにし、エネルギー損失過程の解明を目指

す。さらにプラズモンポラリトンの高速時間分解測定などへの応用を図り、省エネルギーデバイスの高効率化に寄与する分析手法へと展開していく⁽³⁸⁾⁽³⁹⁾。また、シングルショットイメージングにおいて高い時間分解能を実現し、光励起過程の観察に限られてきた時間分解計測から脱し、高分子材料や生体試料などの電子線損傷を受けやすい試料の構造解析やオペランド観察の実現を目指していく⁽⁴⁰⁾⁽⁴¹⁾。

本内容は、名古屋大学の石田高史助教、齋藤晃教授、宇治原徹教授、田中信夫名誉教授と共同で実施した研究成果をまとめたものである。また、日立製作所中央研究所の品田様、高口様、菅谷様、古川様には透過電子顕微鏡開発におけるサポートに感謝いたします。本研究は、科学研究費補助金(17H02737, 15K13404, 18H05208)およびJST未来社会想像事業(JPMJMI18G2)の補助により推進している。

文 献

- (1) P. Roingard: *Biol. Cell*, **100**(2018), 491–501.
- (2) S. Iijima: *Nature*, **354**(1991), 56–58.
- (3) A. Tonomura, N. Osakabe, T. Matsuba, T. Kawasaki and J. Endo: *Phys. Rev. Lett.*, **56**(1986), 792–795.
- (4) N. Shibata *et al.*: *Nature Comm.*, **8**(2017), 15631.
- (5) T. Tanigaki *et al.*: *Scientific Reports*, **7**(2017), 16598.
- (6) D. Contarato, P. Denies, D. Doering, J. Joseph and B. Krieger: *Nucl. Instr. and Meth. A*, **635**(2011), 69–73.
- (7) E. J. Boekema, M. Folea and R. Kouril: *Photosynth Res.*, **102**(2009), 189–196.
- (8) M. Liao, E. Cao, D. Julius and Y. Cheng: *Nature*, **504**(2013), 7478.
- (9) O. Bostanjoglo, R. P. Tornow and W. Tornow: *Ultramicroscopy*, **21**(1987), 367–373.
- (10) O. Bostanjoglo, B. Elschner, Z. Mao, T. Nink and M. Weingartner: *Ultramicroscopy*, **81**(2000), 141–147.
- (11) R. J. D. Miller: *Science*, **343**(2014), 1108–1116.
- (12) B. Siwick and E. Collet: *Nature*, **496**(2013), 306–307.
- (13) P. Zhu, H. Berger, J. Cao, J. Geck, Y. Hidaka, R. Kraus, S. Pjerov, Y. Shen, R. I. Tobey and Y. Zhu: *New J. Phys.*, **17**(2015), 063004.
- (14) S. Tokita, M. Hashida, S. Inoue, T. Nisyoji, K. Otani and S. Sakabe: *Phys. Rev. Lett.*, **105**(2010), 215004.
- (15) M. R. Armstrong, B. W. Reed, B. R. Torralva and N. D. Browning: *Appl. Phys. Lett.*, **90**(2007), 114101.
- (16) H. S. Park, J. S. Baskin and A. H. Zewail: *Nano Lett.*, **10**(2010), 3796.
- (17) L. Piazza, D. J. Masiel, T. LaGrange, B. W. Reed, B. Barwick and F. Carbone: *Chem. Phys.*, **423**(2013), 79–84.
- (18) A. Feist, E. Echternkamp, J. Schauss, S. V. Yalunin, S. Schäfer and C. Ropers: *Nature*, **521**(2015), 200–203.
- (19) F. Houdellier, G. M. Caruso, S. Weber, M. Kociak and A. Arbouet: *Ultramicroscopy*, **186**(2018), 128–138.
- (20) T. Nishitani, T. Nakanishi, M. Yamamoto *et al.*: *J. Appl. Phys.*,

- 97**(2005), 094907.
- (21) K. Togawa, T. Nakanishi, T. Baba *et al.*: *Nucl. Instr. and Meth. A*, **455**(2000), 118.
- (22) M. Kuwahara, S. Kusunoki, X. G. Jin *et al.*: *Appl. Phys. Lett.*, **101**(2012), 033102.
- (23) M. Kuwahara, S. Kusunoki, Y. Nambo, K. Saitoh, X. G. Jin, T. Ujihara, H. Asano, Y. Takeda and N. Tanaka: *Appl. Phys. Lett.*, **105**(2014), 193101.
- (24) D. R. Penn: *Phys. Rev. B*, **35**(1987), 482–486.
- (25) H. Sugiyama, H. Kobayakawa, Y. Takeda, Y. Takashima and K. Naniwa: *J. Japan Inst. Metals*, **69**(2005), 493–496.
- (26) R. Shinohara, K. Yamaguchi, H. Hirota, Y. Suzuki, T. Manago, H. Akinaga, T. Kuroda and F. Minami: *Jpn. J. Appl. Phys.*, **39**(2000), 7093.
- (27) K. Aulenbacher, J. Schuler, D. V. Harrach *et al.*: *J. Appl. Phys.*, **92**(2002), 7536.
- (28) Y. Honda, S. Matsuba, X. G. Jin, T. Miyajima, M. Yamamoto, T. Uchiyama, M. Kuwahara and Y. Takeda: *Jpn. J. Appl. Phys.*, **52**(2013), 086401.
- (29) X. G. Jin, N. Yamamoto, Y. Nakagawa *et al.*: *Appl. Phys. Express*, **1**(2008), 045002.
- (30) L. Reimer and H. Kohl: *Transmission Electron Microscopy* (Springer, New York), 5th edition(2008), Chap. 4.
- (31) P. W. Hawkes and H. Kasper: *Principles of Electron Optics* (Academic Press, London), Vol. 2(1989), Chap. 48.
- (32) F. Ichihashi, X. Dong, A. Inoue, T. Kawaguchi, M. Kuwahara, T. Ito, S. Harada, M. Tagawa and T. Ujihara: *Rev. Sci. Instr.*, **89**(2018), 073103.
- (33) M. P. Silverman: *Phys. Lett. A*, **120**(1987), 442.
- (34) 桑原真人, 宇治原 徹, 浅野秀文, 齋藤 晃, 田中信夫: *顕微鏡*, **50**(2016), 151.
- (35) M. Kuwahara, Y. Nambo, K. Aoki, K. Sameshima, X. G. Jin, T. Ujihara, H. Asano, K. Saitoh, Y. Takeda and N. Tanaka: *Appl. Phys. Lett.*, **109**(2016), 013108.
- (36) E. J. Candes and T. Tao: *IEEE Trans. Inform. Theory*, **56**(2010), 2053–2080.
- (37) S. Ono: *IEEE Transactions on Image Processing*, **26**(2017), 1554–1564.
- (38) N. Yamamoto and H. Saito: *Opt. Express*, **22**(2014), 29761.
- (39) A. L. Koh, A. I. Fernandez-Dominguez, D. W. McComb, S. A. Maier and J. K. W. Yang: *Nano Letters*, **11**(2011), 1323.
- (40) J. M. Yuk, J. Park, P. Ercius, K. Kim, D. J. Hellebusch, M. F. Crommie, J. Y. Lee, A. Zettl and A. P. Alivisatos: *Science*, **336**(2012), 61.
- (41) A. Merk, A. Bartesaghi, S. Banerjee, V. Falconieri, P. Rao, M. I. Davis, R. Pragani, M. B. Boxer, L. A. Earl, J. L. S. Milne and S. Subramaniam: *Cell*, **166**(2016), 1698–1707.



桑原真人

★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★
 2007年 名古屋大学大学院理学研究科博士課程後期修了
 主な略歴
 2007年 JST 博士研究員
 2012年 名古屋大学 助教
 2015年– 現職
 専門分野：電子顕微鏡
 ◎次世代電子顕微鏡の開発と応用に従事。高輝度パルス電子線の応用やスピン偏極電子線を利用した新規分析手法の開拓を進めている。
 ★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★