

東京工業大学広報センター長  
大谷 清

## 半導体中を秒速 8 万 m で動きまわる電子を撮影

— “見える化” により多様な半導体材料の評価に威力—

### 【要点】

- 半導体材料中の 20 nm スケールの領域に流れる電子を 200 フェムト秒間隔で測定
- 電子が半導体中を秒速約 8 万 m で動きまわる様子の動画撮影に成功
- 半導体の新しいナノ構造の開拓や未来の新材料開発に貢献

### 【概要】

東京工業大学大学院理工学研究科の福本恵紀産学官連携研究員、恩田健流動研究員、腰原伸也教授らは、半導体中を秒速 8 万 m で流れる電子を直接観察し、動画撮影することに成功した。新規レーザーパルス光源と光電子顕微鏡を組み合わせ、電子を 20 ナノメートル (nm, 1nm は 10 億分の 1 m) および 200 フェムト秒(fs, 1fs は 1000 兆分の 1 秒)スケールで可視化できる超高速ストロボ顕微鏡を開発して実現した。

パソコン、携帯電話や太陽電池などに幅広く利用され、必要不可欠となっている半導体材料だが、その動作性能を左右するキャリア(電子)の動きを可視化する手法はなかった。

半導体素子のナノサイズ化が進む中、それにより生じる量子サイズ効果を利用した素子開発(トランジスタ、太陽電池、LED、量子コンピュータ)が注目されている。その電気伝導特性を視覚的に評価できる装置は、今後の半導体素子開発に大きな影響を与えると期待される。

研究成果は 7 日に米国の科学誌「アプライド フィジックス レターズ (Applied Physics Letters)」オンライン速報版で公開された。

## ●研究成果

半導体材料を利用しているパソコンのメモリ、太陽電池やLEDの動作性能は、半導体中を動き回る電荷キャリア（電子と正孔）の動きやすさに依存している。半導体素子は微小化・高速化しつつあるが、その特性を、直接素子内部を動く電流、特に電子を観測することにより評価する手法は存在しなかった。そこで、福本研究員らは、ガリウム・ヒ素半導体中の20nmスケールの空間領域を移動するキャリア(主に電子)の流れを200fs間隔で可視化できる時間分解光電子顕微鏡(用語1)を世界で初めて開発した。

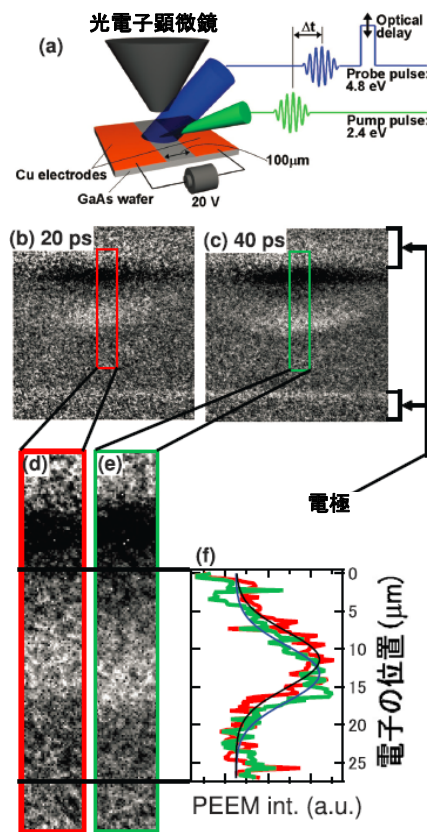


図1: 時間分解光電子顕微鏡による電子移動の動画撮影。(a): 測定手法の概略。(b)と(c): 励起光照射後20ps及び40ps後の光電子顕微鏡像。(d)と(e): (b)と(c)の中央付近の拡大図。(f): (d)と(e)の縦方向の強度プロファイルにより、電子の移動が確認できる。

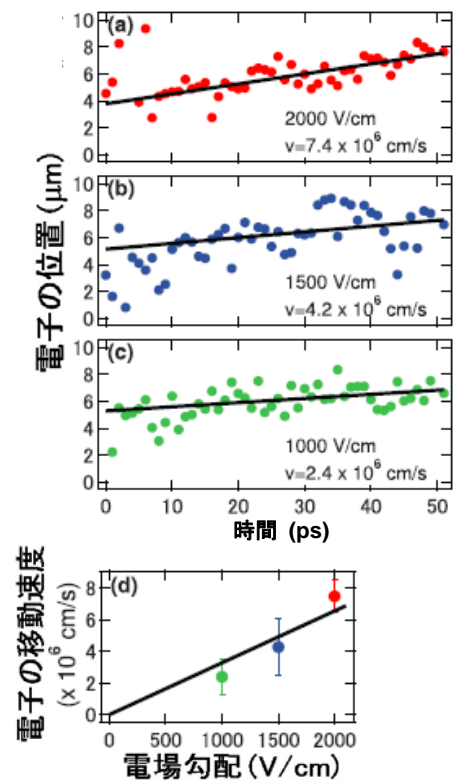


図2: (a), (b), (c)は、異なる電極間の電場勾配(電圧値÷電極間隔)において、電子の移動距離を時間に対してプロット。線形フィットによる傾きから電子の移動速度を算出している。(d)は、電子の移動速度を電場勾配に対してプロット。

高速動作する半導体デバイス内での電子の流れ（電流）を検出するには、100fs程度の極短時間幅のパルス電流を生成・注入し、とらえる必要がある。本研究では、約 100 fs 幅のレーザーパルスを半導体に照射して、光キャリア(用語 2)を生成した。

これを図 1(a)に図示した様に、半導体表面に蒸着した 2 枚の金属電極間に電圧を印加することで動かした。その動く様子を別のレーザーパルス(検出光)を半導体試料に照射し、励起電子の密度に由来する光電子放出強度を光電子顕微鏡で撮影した。励起光と検出光の時間的タイミングを変化させていくことで(ポンプ - プロブ法)、電子の移動過程が動画としてストロボ撮影できる。

励起光照射から 20 ピコ秒 (ps, 1ps は 1 兆分の 1 秒) と 40ps 後の光電子顕微鏡像を図 1(b)と(c)にそれぞれ示す。図中央の楕円形の白く明るいコントラストが励起された電子の分布を表す。図の上下の特に明るい部分は、電子を動かすための電圧を加える 2 つの電極。励起電子の移動を確認するため、図 1(d)と(e)には図 1(b)と(c)の中央付近の拡大図、図 1(f)には図の縦方向の強度分布を示した。ガウス関数でのフィッティングからも分かるように、緑のプロットが赤のプロットより下方にシフトしている。これが電子の移動を表し、20ps の間に約 2 マイクロメートル、秒速約 10 万 m で移動している。

この様な電子分布画像を 1ps 間隔で 50ps まで撮影し、それぞれの図から電子の位置を求めて、時間とともにその位置が変化する様子を示したのが図 2(a)になる。縦軸が電子の位置で横軸が時間。得られたグラフの傾きが電子の移動速度を表し、1 秒間に 7 万 4000 m 移動している。電子を運動させるための電圧を下げると電子の移動速度も遅くなり(図 2(b)と(c))、図 2(d)には、電場勾配(電圧÷電極間距離)を変化させた場合の電子の移動速度の変化を示してしている。この図の直線の傾きが移動度(用語 3)を示している。

半導体中を流れる電流(電子)を動画として再現し、そのスナップショットを図 3 に示した。レーザーパルス(励起光:緑の矢印)を半導体表面に照射し(図 3(a, b))、励起電子を生成 (図 3(c))。左右の電極に電圧を印加することにより、電子を電流として流す。電子が流れている過程、励起光入射から 1, 10, 20, 30, 40, 50 ps の画像を(図 3(c, d, e, f, g, h))に表示した。図 3(e)のスポットライトの様に検出光を照射し、光電効果により試料表面から放出された光電子で結像する。この光電子放出量の空間的な分布が、励起電子の密度分布に対応しており、顕微鏡のスクリーンに映し出される。

検出光入射のタイミングを変化させていくことで、電子の運動をストロボ撮影し、動画として得ることができる。この測定で特筆すべきことは、電子の塊が、50ps の間に 4 マイクロメートル移動したことを直接顕微鏡で観察したことにある。つまり、秒速 8 万 m で運動する電子をストロボ撮影で捉えている。

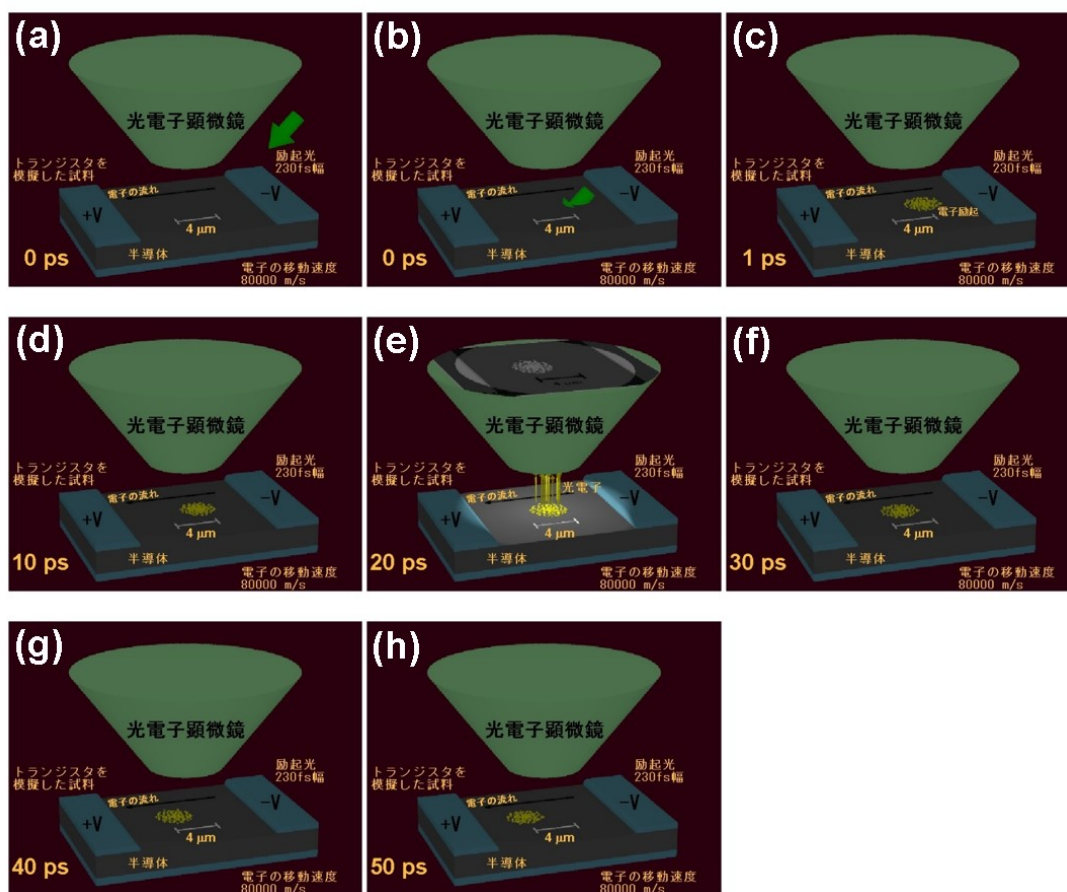


図3：本研究で得られた結果をスナップショットとして再現

近年、ナノメートルとフェムト秒の2つのスケールを融合した顕微鏡の開発が盛んに行われており、金属中のキャリア移動・運動に関する報告はいくつかある。今回の研究において、世界で初めて、電気抵抗率の高い半導体中のキャリア移動を観察することができた。各種電子素子への応用を考えると、半導体中での電子の動きの直接観測への要請は非常に強かったにもかかわらず、これまで達成されなかった理由は、レーザーパルス照射により瞬間的に試料の電子が欠乏し、帯電を起こしてしまうためだった。これにより、電子顕微鏡や本研究で利用した光電子顕微鏡で結像できなくなってしまった。そこで、近年開発された繰り返し周波数が広い領域で可変なレーザーパルス光源を、光電子顕微鏡と世界で初めて組み合わせる先端的、冒険的試みを行い、試料の帯電効果を劇的に減らすことに成功し、観測することができた。

## ●背景と経緯

半導体材料は、我々の生活の至るところで利用されている。これらの性能、つ

まりメモリの動作速度、太陽電池のエネルギー変換効率や発光強度は、半導体内部の電子及び電子の対の関係にある正孔の移動特性に大きく依存している。ここで言う“移動”とは、キャリアの実空間での移動やエネルギー空間での緩和(用語 4)を意味している。

メモリを大容量化するために一つ一つの素子が 20nm 程度まで微細化されたり、太陽光を効率良く吸収したり、各種発光素子を作製するために直径が 2 から 10nm の半導体粒子の作成が試みられるなど、半導体材料の超微細化は今後の半導体技術革新の鍵となっている。開発にあたり、ナノメートル領域内での電子や正孔の移動特性を評価することが必須情報となるが、その運動は非常に高速であるため、時間スケールで 200fs 程度で追跡する必要がある。

“10nm”と“100fs”スケールの 2 つの軸でキャリア移動を測定する必要があるが、これまで、どちらか一方は達成されていた。例えば、走査型電子顕微鏡、走査型トンネル顕微鏡、原子間力顕微鏡など、多くの顕微鏡はナノメートル及びそれ以上の空間分解能を持っているが、100fs スケールでの物質の変化を追跡は困難だった。一方で、通常の光学顕微鏡では超短パルスレーザーが技術の発展により、100fs の時間分解能での測定は困難ではなくなっているが、空間分解能は数 100nm 程度だった。そこで、半導体特性評価のブレークスルーとして、10nm 及び 100fs スケールで半導体中のキャリア・電流を測定できる手法の開発が期待されていた。

## ●今後の展開

半世紀前に半導体素子が利用され始め、その微細化・高速化はとどまることなく進んでいる。ナノメートル加工をされた素子の実用化は間もなく達成されるのは間違いなく、そこでは、量子サイズ効果(用語 5)の発現もあり、ピコ秒レベルで電子や正孔の移動を制御する必要がある。ここで開発した装置は、これらを満たしており、今後、幅広く評価手法として普及することが期待される。

## 【用語説明】

1. 光電子顕微鏡：光照射による試料から放出される電子(光電効果)を 2 次元的に検出できる顕微鏡。検出する光電子放出強度は、様々な電子状態に依存するが、本測定では、伝導帯に存在する電子の密度に比例関係である。

2. 光キャリア: 半導体に光を照射すると, 価電子帯の電子がエネルギーを受け, 伝導帯に励起され, これが自由に動ける電子となり, 電流として流れる(下図). この原理は, 太陽電池が太陽光を受け電気に変換するのと同様である.

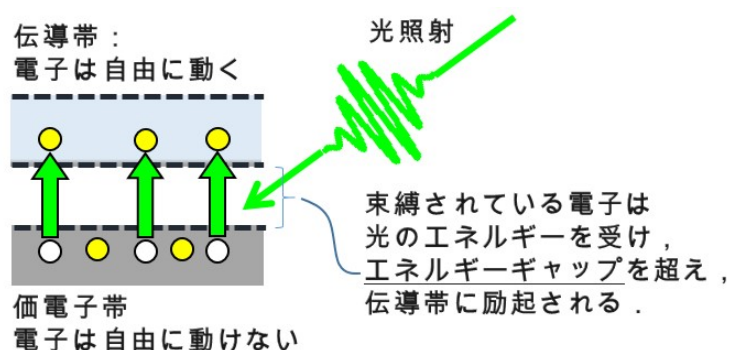


図: 半導体中で電子が光励起される概念図

3. 移動度: 電子の移動速度は印加した電場勾配に依存するため, 電場勾配を考慮した速度を表す.

4. エネルギー空間での緩和: 光励起された電子が元の価電子帯に戻るまでの時間.

5. 量子サイズ効果: 半導体粒の直径が 10 ナノメートル以下になると発現する効果で, 狭い空間への閉じ込めにより電子間のクーロン反発が大きくなり, エネルギーバンド構造が変化する. 例えば, 図 2 におけるエネルギーバンドギャップが大きくなる.

### 【論文情報】

Direct imaging of electron recombination and transport on a semiconductor surface by femtosecond time-resolved photoemission electron microscopy, Keiki Fukumoto, Yuki Yamada, Ken Onda and Shin-ya Koshihara, *Appl. Phys. Lett.* 104, 053117 (2014)

DOI: 10.1063/1.4864279

**【問い合わせ先】**

東京工業大学 大学院理工学研究科 物質科学専攻 産学官連携研究員  
福本恵紀

Email: fukumoto.k.ab@m.titech.ac.jp

TEL: 045-924-5891

FAX: 045-924-5891

東京工業大学 大学院理工学研究科 物質科学専攻 流動研究員  
恩田健

Email: onda.k.aa@m.titech.ac.jp

TEL: 045-924-5891

FAX: 045-924-5891

東京工業大学 大学院理工学研究科 物質科学専攻 教授  
腰原伸也

Email: skoshi@cms.titech.ac.jp

TEL: 03-5734-2449

FAX: 03-5734-2449