

## 高速デバイス材料の瞬間的な状態を可視化する走査電子顕微鏡技術を開発

走査電子顕微鏡とフェムト秒レーザーを組み合わせ、物質の瞬間的な状態を観察できる超高速時間分解走査電子顕微鏡計測装置を開発しました。これを用いて、半導体 GaAs（ガリウムヒ素）基板のデバイス上の金属電極の周囲の電位変化の様子を、43 ピコ秒の時間分解能で可視化することに成功しました。

今日の社会を支えているさまざまな電子デバイスは、年々その動作速度が向上し、5G バンドの次の世代（Beyond 5G）を想定したデバイス開発研究が活発に行われています。このような次世代の超高速半導体デバイスを開発するためには、デバイス内での電位や電子移動などの様子を精密に計測し、デバイスの動作状況を客観的に理解することが不可欠です。

本研究グループでは、この課題に対して、走査電子顕微鏡（SEM）とフェムト（1000 兆分の 1）秒レーザーを組み合わせ、デバイス材料内の電位変化を高い時間分解能で計測する手法を開発しました。これを用いて、半導体 GaAs（ガリウムヒ素）基板上に形成した光伝導アンテナデバイス上の金属電極周囲の電位変化を計測し、43 ピコ秒（1 ピコ秒=1 兆分の 1 秒）の時間分解能で SEM 画像として観察することに成功しました。これは 5G 通信でよく使われる周波数帯よりも広い 23 GHz の帯域で電気回路の性能を測定できることに相当します。

本技術により、電位が動的に変化するようなデバイス構造において、任意の点の電位変化を、非接触で高速、かつ立体的に計測することが可能となり、次世代デバイス開発のための重要な計測ツールとして貢献すると期待されます。

### 研究代表者

筑波大学数理物質系

藤田 淳一 教授

嵐田 雄介 助教

## 研究の背景

私達の身の回りの生活や文化はさまざまな通信技術によって支えられ、携帯電話の電波は 5G バンドが普及しつつありますが、研究分野では、さらに次の世代 B5G に向けての研究が活発化しています。その根幹となるのが半導体エレクトロニクスであり、そこに使われるデバイスの情報処理を、より短時間かつ低消費電力化することが求められています。これらを解決する方法の一つに、デバイスサイズの小型化が挙げられます。しかしながら、微細化・高速化が進歩した結果、従来の電氣的な測定方法では、デバイスの動的特性を精密に測定することが困難になってきました。そのため、高速で動作する電子デバイスの局所電位を、より正確かつ直接的に観察できるような新しい手法の創出が望まれています。

走査型電子顕微鏡法 (SEM)<sup>注1)</sup> はナノスケールの材料やデバイスの空間画像を撮影する方法として知られています。この方法では対象試料に電子線を照射した際に放出される二次電子を計測し、電子線の照射位置を走査させた時の二次電子の強度分布から、試料の形状や電位分布の画像が得られます。本研究グループでは、照射する電子線が数 10 ピコ秒という非常に短い時間の間だけ多数の電子を含むようにパルス化<sup>注2)</sup>し、瞬間的な試料の状態を反映した SEM 画像を取得できる走査型超高速電子顕微鏡法 (SUEM: Scanning ultrafast electron microscopy) を開発しており、今回、この SUEM を電子デバイスの性能評価に用いることを試みました。

## 研究内容と成果

SUEM の鍵は、電子線をごく短い時間の間だけ生じさせることです。そのために、フェムト (1000 兆分の 1) 秒レーザー (フェムト秒スケールの時間の間だけ強い光を生じるレーザー光源) として、時間幅 300 フェムト秒の近赤外線パルスを使用しました。この光をビームスプリッターで分割し、片方を非線形光学結晶<sup>注3)</sup>を用いて紫外線パルスへと波長変換し、SEM の電子源へと照射すると、紫外線によって電子源の先端で光電効果<sup>注4)</sup>により電子パルスが発生します。この電子パルスが、電子源の下方に設置された直径 0.7 mm の穴が開いたミラーを通過して試料まで到達し、瞬間的な SEM 像を取得することができます (図 1)。また、試料に変化を引き起こすための光として、非線形光学結晶による波長変換により試料が吸収しやすい可視光パルスを使用しました。この光には予め光学遅延 $\tau$ を付与し、電子パルスより早く試料に入射させました。これにより、光励起から $\tau$ だけ時間が経過した後の SEM 像を取得することができます。

まず、試料として光伝導アンテナデバイスを作製しました (図 2)。半導体 GaAs (ガリウムヒ素) 基板上に金のクシ型電極が対向して配線されており左側を陰極、右側を陽極として通常の SEM 観察を行いました。このデバイスは光の照射によって導通するスイッチとして知られており、電氣的な操作によるスイッチよりも高速に動作します。両極が同電位の場合、電位が等価なので陽極も陰極も同じ明るさに見えますが、3V の電位差を印加すると、陽極に対して陰極が明るくなっている様子が観察されました。すなわち、陽極と陰極の電位が異なることを反映して二次電子の測定量に変化していました。

次に、このデバイスに対して、SUEM による時間分解観察を行いました (図 3)。可視光パルスを照射すると、半導体基板が光を吸収し電気抵抗が減少します。すると、電極間に充電されていた電荷が流れ、陽極と陰極は短い時間の間だけ同電位になります。この時の様子を、可視光パルスの照射からの経過時間ごとに観察しました。すると、可視光パルスの照射前 ( $\tau$ =ピコ秒) では、まだ充電された状態であるため陰極が明るく見えますが、照射した瞬間から充電が減り、50 ピコ秒経過後には両極が同じ信号強度を示し、充電が完全に解消したことが分かりました。また、光照射から 625 ピコ秒が経過すると陰極がわずかに明るくなりました。これは、基板が電気を流さない半導体に戻り、再充電が始まったことを意味し

ています。陰極部分の電位の時間変化をプロットしたところ、光照射から 43 ピコ秒で充電が解消され、その状態が 500 ピコ秒ほど継続した後に再充電が始まる様子を連続的に捉えることに成功しました。

### 今後の展開

SUEM を用いることで、電子デバイスの電位分布の超高速変化を可視化し、従来の測定方法よりも直接的に、デバイスの動作を理解することが可能となります。今後、電子デバイス開発のさらなる加速や、新しい原理のデバイスの創出などへの応用が期待されます。

### 参考図

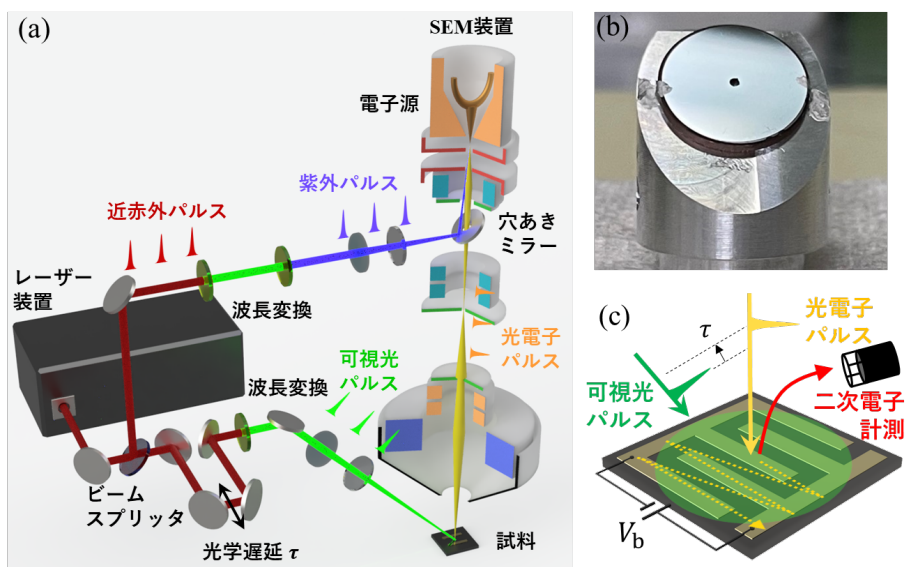


図1 本研究に用いた実験系

(a) 開発した実験装置の概要図。レーザー装置、波長変換を行う光学系、走査型電子顕微鏡 SEM で構成される。(b) SEM 装置内に置かれた穴あきミラー（中央の穴の直径 0.7 mm）。紫外線パルスを電子源の方向に反射させ、電子源で生じた電子パルスを中央部の穴に透過させる。(c) 時間分解 SUEM の概念図。電圧 ( $V_b$ ) が印加された光伝導アンテナデバイスの状態を可視光パルス（緑色矢印）で変化させ、 $\tau$ だけ時間が経過したあとに光電子パルス（黄色矢印）を照射し、二次電子の量を計測することで、瞬間的に変化する SEM 画像を取得する。

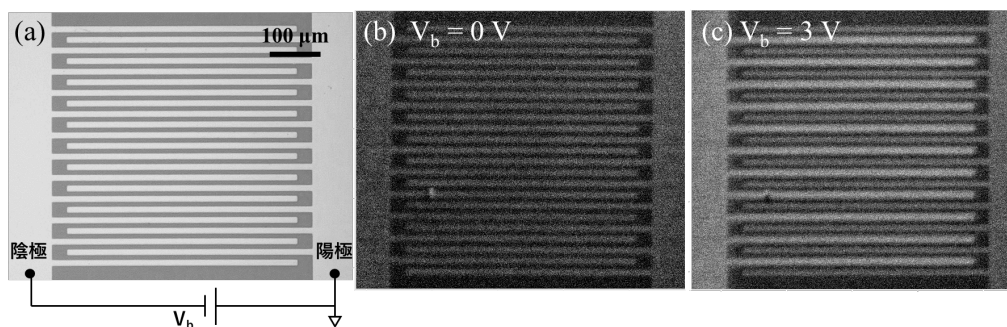


図2 (a)試料に用いた光伝導アンテナデバイスの写真。半導体 GaAs 基板の上に金でできたクシ型の陽極と陰極が配置している。(b) 陽極と陰極を同電位 ( $V_b = 0V$ ) に置いて測定した SEM 画像。(c)  $V_b = 3V$  として測定した SEM 画像。陰極から多くの信号が得られているため明るく見える。

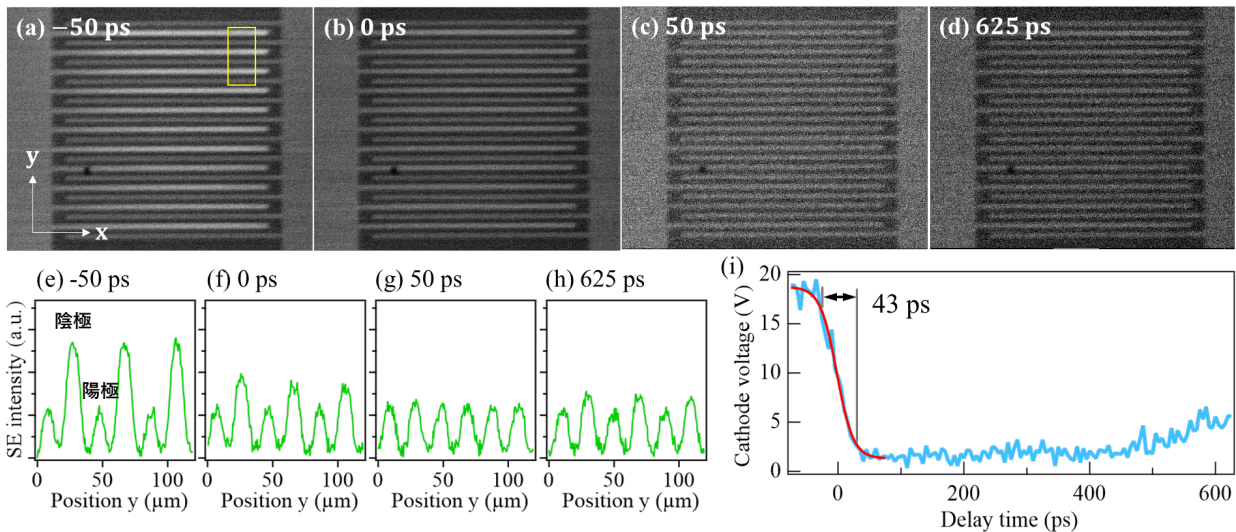


図3 光パルスと電子パルスの遅延時間を (a) -50 ps (ピコ秒)、(b) 0 ps、(c) 50 ps、(d) 625 ps と変化させた際の時間分解 SUEM 画像。(a)の黄色の範囲の断面図が(e)であり、同様に、(b)と(f)、(c)と(g)、(d)と(h)が、それぞれ対応する。(i) 陰極の電位の遅延時間依存性の結果。

### 用語解説

#### 注1) 走査電子顕微鏡法 (SEM)

電子線を使った顕微鏡法の一つ。測定対象に照射する電子線の位置を走査しながら二次電子の量を観察することで、光学顕微鏡よりも細かい範囲の画像を得ることができる。小さなサイズの方法や電子デバイスの形状測定などに広く用いられている。

#### 注2) パルス

ごく短い時間だけ生じる光や電子を指す。可視光の場合は紫外パルス、電子の場合は電子パルスと呼ぶ。

#### 注3) 非線形光学結晶

固体結晶の1種。レーザーのような強い光を照射すると、異なる色の光を生じる。本研究では波長 1030 nm の近赤外光を照射することで波長 257 nm の紫外線を発生させている。

#### 注4) 光電効果

紫外線などの高いエネルギーの光を物質に照射した際に、そのエネルギーを吸収した電子が、物質中から真空中へ飛び出る現象。

### 研究資金

本研究は、防衛装備庁防衛装備庁安全保障技術研究推進制度 JPJ004596、および、科研費による研究プロジェクト (19H00847、22H00289) の一環として実施されました。

### 掲載論文

【題名】 Visualizing the transient response of local potentials on photoconductive antennas using scanning ultrafast electron microscopy (走査型超高速電子顕微鏡による光伝導アンテナの局所電位の過渡応答の可視化)

【著者名】 Yusuke Arashida, Samuel Jeong, Kouhei Kawasaki, Yuga Emoto, Godai Noyama, Masaki Hada, Yoshiya Kishibe, Hidemi Shigekawa, Keishi Akada, Shoji Yoshida, and Jun-ichi Fujita

【掲載誌】 ACS photonics



【掲載日】 2024年5月8日

【DOI】 10.1021/acsphotonics.3c01532

問合わせ先

【研究に関すること】

嵐田 雄介（あらしだ ゆうすけ）

筑波大学 数理物質系 助教

URL: <https://www.bk.tsukuba.ac.jp/~nanofab/index.html>

【取材・報道に関すること】

筑波大学広報局

TEL: 029-853-2040

E-mail: [kohositu@un.tsukuba.ac.jp](mailto:kohositu@un.tsukuba.ac.jp)