PRESS RELEASE

報道関係各位

2026 年 10 月 21 日
大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構
国立研究開発法人科学技術振興機構（JST）

「存在する」から「見える」へ。
半導体中を流れる伝導正孔の可視化に初めて成功

本研究成果のストーリー

●Question
電子の海に埋もれた「正孔」は、どうすれば見えるのか？

●Findings
伝導正孔は、伝導電子と同様に半導体デバイスを動作させる重要な電荷キャリア。伝導正孔の観測に必要な条件を初めて特定。

●Meaning
これまで見えなかった電荷キャリアの動きを捉え、半導体デバイスの動作を評価する新たな手法に。

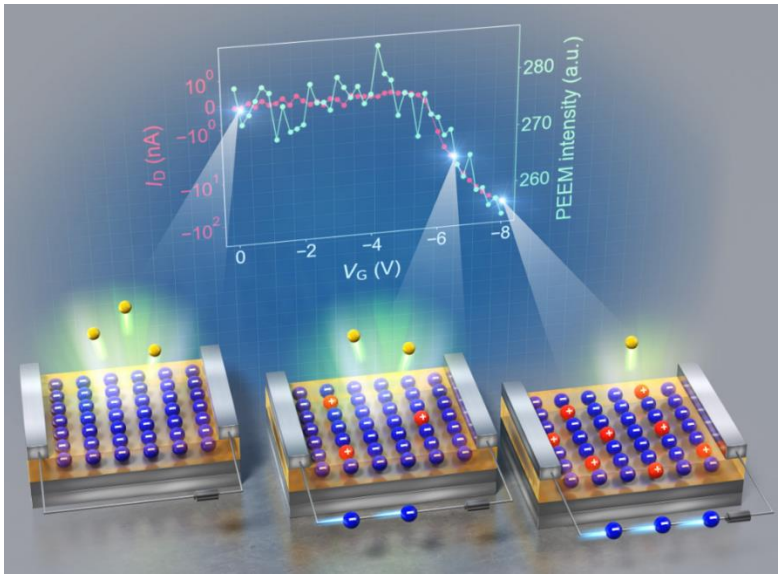


図 1　半導体デバイスは、電子と正孔、または、どちらかが電荷キャリアとして動くことで機能している。本研究では、トランジスタが動作する環境下で正孔の可視化に成功。

120文字サマリー

「存在する」けれど「見えなかった」伝導正孔を、可視化することに初めて成功した。装置とデータ解析手法の開発により、観測に必要な条件を特定し、半導体デバイスの動作を電荷キャリアの動きから捉える新たな評価手法につながる成果である。

概要

高エネルギー加速器研究機構（KEK）物質構造科学研究所の福本 恵紀 特任准教授、筑波大学の吉川 康介氏は、半導体デバイスの動作において、伝導電子と同様に重要な電荷キャリアである伝導正孔の可視化に成功しました（図 1）。正孔は、ルドルフ・パイエルス博士がホール効果（※１）を量子力学的に導出する際にも導出された正の電荷です。これまでに、電気計測による素子全体の平均的な情報として伝導正孔の振る舞いが観測されてきましたが、実験的な制約により、電荷キャリアとして半導体デバイスの動作に「機能する伝導正孔」の空間的な分布を観測した例はありませんでした。今回、パルスレーザーを光源とする光電子顕微鏡（フェムト秒光電子顕微鏡（図 2））を利用して、電界効果トランジスタ（※２）が動作する環境下で正孔の直接観測に成功し、観測のためのレシピを詳細に解説しました。この成果は、ホール効果などトランジスタ全体の平均として伝導正孔の流れを電気的に計測する従来手法に対し、イメージング法を用いることで、トランジスタ内の膜厚などの不均一性が正孔観測に影響することを特定した画期的な発明となりました。ダイオード、トランジスタ、太陽電池、発光デバイス、光触媒などあらゆる半導体デバイスの評価・開発など幅広い応用が期待されます。

なお、本成果は、物質構造科学研究所 ピアテンコ エリザベス 研究員（当時）、筑波大学 山田洋一教授、清水好葉氏、物質・材料研究機構（NIMS）早川竜馬主幹研究員、若山裕グループリーダーとの共同研究による成果です。

本研究成果は、10 月 21 日（水）01:00（現地時間）に米国の学術誌「Applied Physics Reviews」に掲載されました。

※１．ホール効果
電流が流れている物質に垂直な磁場をかけると、電流と磁場の両方に直交する方向に電圧が生じる現象である。古典物理学では磁場中の電荷が受ける力（ローレンツ力）として説明されるが、1929 年にルドルフ・パイエルスが量子力学（バンド理論）を用いて理論的に導出した。その際、エネルギーバンドが電子でほぼ満たされている状態において、電子の抜け穴である空席が「プラスの電荷を持った粒子（正孔）」としてホール効果に寄与することが数学的に示された。本研究の観測が成功するまでは、主にこのホール効果などの電気的計測によって間接的に正孔の振る舞いが評価されてきた。

※２．電界効果トランジスタ
ソース、ドレイン、ゲートと呼ばれる 3 つの電極からなる半導体デバイスである。ゲート電極に電圧をかけて生じる「電界効果」によって、ソース・ドレイン間に正孔が流れる通り道が形成され、電流が流れることで「オン状態」になる。電圧の制御のみで簡便かつ高速に電流のオン・オフができるため、演算素子やメモリなど、現代のあらゆる半導体デバイスの基本構成要素として使用されている。

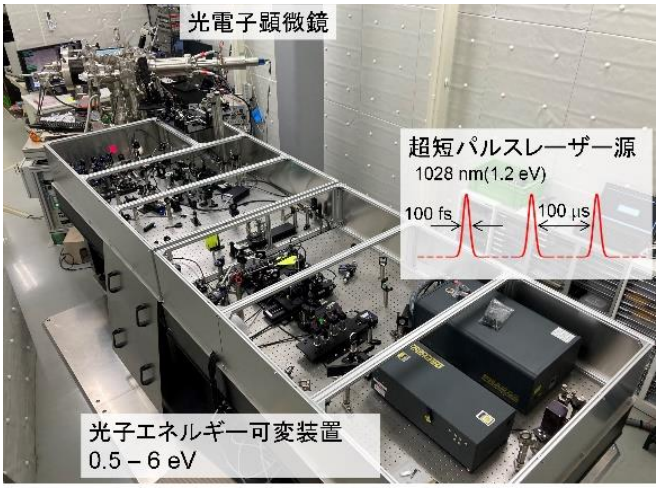


図２　フェムト秒幅のパルスレーザーを光源とする光電子顕微鏡（フェムト秒光電子顕微鏡）の外観写真（1 フェムト秒は 1000 兆分の 1 秒）。短い時間幅のレーザーパルスを利用することで、光のエネルギーを近赤外光から紫外光領域（0.5～6 eV）まで自在に変化させることができる。

研究グループ

大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構（KEK）　物質構造科学研究所
　福本　恵紀　特任准教授
　ピアテンコ　エリザベス　研究員（当時）

筑波大学　数理物質系
　山田　洋一　教授
筑波大学　数理物質科学研究群応用理工学学位プログラム　電子・物理工学サブプログラム
　吉川　康介　修士課程 2 年
　清水　好葉　修士課程 2 年（当時）

国立研究開発法人物質・材料研究機構　ナノアーキテクトニクス材料研究センター　半導体材料分野　半導体機能デバイスグループ
　早川　竜馬　主幹研究員
　若山　裕　グループリーダー

研究者からひとこと



KEK 物質構造科学研究所の福本 恵紀 特任准教授

装置開発と機械学習を駆使して、見えなかったものを見えるようにする研究を進めています。これまでに、半導体中を伝搬する電子ダイナミクス、pn 界面に形成される空乏層の観測に成功していましたが、今回、電子と同様に重要な電荷キャリアである伝導正孔の観測に成功しました。

なぜこの研究を始めたのですか

半導体中の伝導電子を観測することを目的とし、フェムト秒光電子顕微鏡を開発してきました。レーザーの光子エネルギーを自在に変えることができるシステムを構築したことで、効率よく伝導電子を観測できる他にはない装置が完成しています。この手法を応用することで、電子と同様に重要な電荷キャリアである正孔も観測できるのでは？と発想しました。

ひらめいたところはどこですか

光電子分光法は、材料の物性を計測する一般的な手法の一つです。今回、正孔を観測するにあたり、光電子分光法の原理、計測を制限する要素、さらには、計測に要求される材料特性をゼロから調べました。筑波大学・修士課程 2 年の吉川氏は、光電子分光法の原理から試料の厚さの制御が必要であると考えました。トランジスタ内で厚さの異なる領域を機械学習により識別することで、埋もれた界面に蓄積された伝導正孔が観測可能であることを発見しました。

努力したところはどこですか

光電子分光計測では、試料から光電効果で放出される電子の量を信号として検出します。しかし、その信号量は、試料または測定手法に由来する多くの要素が影響するため、電子で満たされた空間に正孔が注入されたことによる信号量の減少だけでは、正孔観測の確証が得られません。そこで、光電効果の仕組みと光電子顕微鏡の動作原理、さらには、トランジスタの動きを総合して理解し、他の要因を排除することで、初めて正孔観測を達成しました。

何がわかったのですか

正孔は、電子と同様に重要な電荷キャリアです。本成果では、その正孔を観測するためのレシピを明らかにしました。

それで世界はどう変わりますか

存在するが見えなかったものを見えるようにすることは、古くから重要な役割を果たしてきました。肉眼では見えない小さな世界を顕微鏡で捉え、遠く離れた天体を望遠鏡で見ることで、私たちはこれまで知らなかった世界を発見してきました。「見えるようにする」ことは、新たな発見や理解を生み出す科学の原動力です。半導体の世界でも同じことが言えます。半導体デバイスの中では、電子や正孔が動くことで電気が流れ、さまざまな機能が生み出されています。しかし、これまで正孔がデバイスの中でどのように分布し、どのように動いているのかを直接見ることは困難でした。今回、私たちはその「見えなかった正孔」を直接可視化することに成功しました。

半導体デバイスの動作中において、伝導電子だけでなく、伝導正孔がどのように動いているかを可視化することで、デバイスの高性能化につながる指針を得ることができます。本成果は、半導体材料やデバイスの評価手法の一つになりうるもので、デバイスの性能向上への利用が期待されます。

謝辞

本研究は、文部科学省光・量子飛躍フラッグシッププログラム（Q-LEAP）JPMXS0118068681、科学技術振興機構（JST）創発的研究支援事業 JPMJFR203P、日本学術振興会（JSPS）科研費 JP15K17677、JP21H01752、JP23H00269、JP25H01260 の助成を受けて実施されました。



論文情報

「Imaging conducting holes in field-effect transistors
（日本語名：トランジスタの動作下で伝導正孔の可視化）」
雑誌名「Applied Physics Reviews」（オンライン版 10 月 21 日）
DOI：https://doi.org/10.1063/5.0335842

お問い合わせ先

＜研究内容に関すること＞
大学共同利用機関法人 高エネルギー加速器研究機構
物質構造科学研究所 特任准教授 福本 恵紀
Tel: 029-864-5200 ext. 4802
e-mail: keiki@post.kek.jp

＜JST 事業に関すること＞
国立研究開発法人科学技術振興機構 創発的研究推進部
酒井 重樹
Tel: 03-5214-7276
e-mail: souhatsu-inquiry@jst.go.jp

＜Q-LEAP ATTO 部門に関すること＞
国立大学法人 東京大学アト秒レーザー科学研究機構
特任教授 機構長 山内 薫
Tel: 03-5841-4627
e-mail: atto-office-group@g.ecc.u-tokyo.ac.jp

＜報道担当＞
大学共同利用機関法人 高エネルギー加速器研究機構 広報室
Tel: 029-879-6047
e-mail: press@kek.jp

科学技術振興機構 広報課
Tel: 03-5214-8404
e-mail: jstkoho@jst.go.jp