



2025 年 4 月 9 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）

半導体デバイスの動作中に内部構造の可視化に成功

～半導体を評価する新しい手法の提案～

本研究成果のストーリー

●Question

半導体デバイスの中心的な役割を担う p 型と n 型半導体を接合した pn 接合界面が発見されて以来約 70 年間、pn 接合界面が直接観察されることはなかった。

●Findings

福本氏が開発した半導体中の伝導電子が可視化できる装置を発展させることで、pn 接合界面に形成される電子が空乏化した領域の実空間およびエネルギー空間観測に成功した。

●Meaning

この手法は、画像を用いた半導体デバイスの評価を可能にし、あらゆる半導体デバイスに適用できることから、半導体産業の発展に貢献することが期待される。

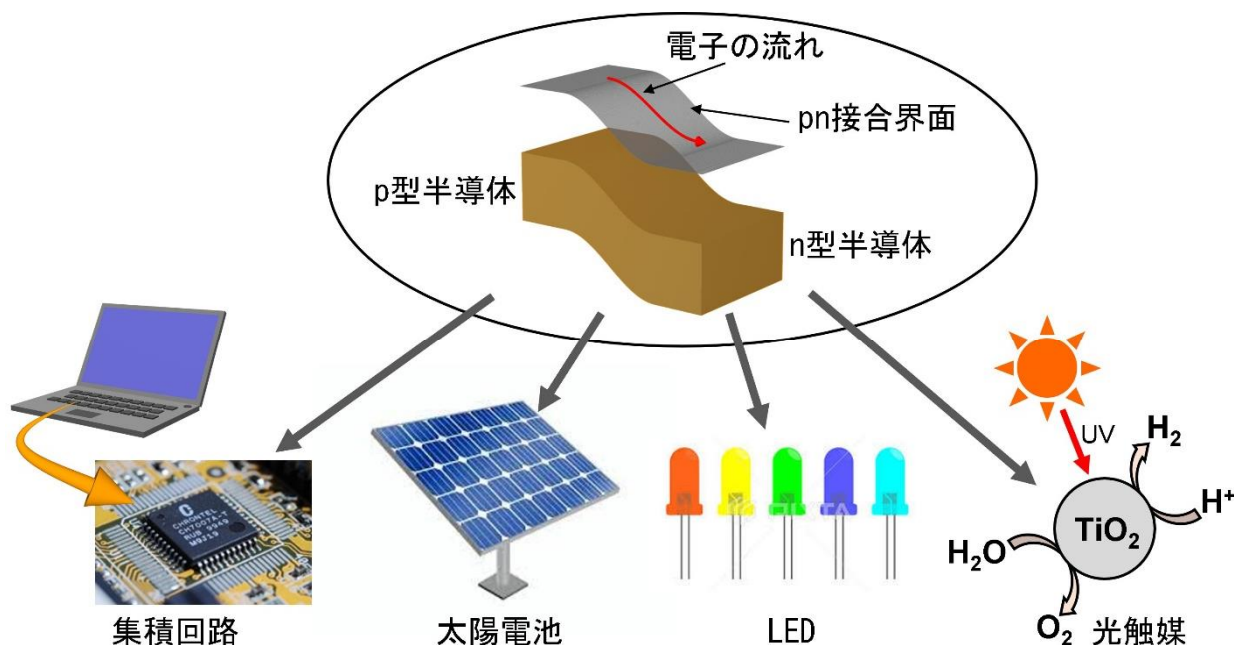


図 1 半導体デバイスは、p 型と n 型の 2 種類の半導体を貼り合わせた界面に形成される pn 接合界面が電流の流れを制御し、機能している

120文字 サマリー

半導体デバイスのひとつであるトンネルダイオード（※1）が動作する環境下で、電流の流れを制御する仕組みの可視化に、世界で初めて成功した。この手法は、トランジスタや太陽電池など様々な半導体デバイスの性能評価や開発への応用が期待される。

※1. トンネルダイオード

トンネルダイオードは量子トンネル効果を利用し、電流を一方向にのみ流す半導体ダイオードの一種で、逆方向の電圧を印加することで、トンネル電流が流れる。

概要

高エネルギー加速器研究機構 物質構造科学研究所に設置されているフェムト秒パルスレーザーを光源とする光電子顕微鏡装置(フェムト秒光電子顕微鏡)（※2）を用いて、半導体デバイスの動作下において、pn 接合界面に形成され、電流の制御に重要な役割を担う空乏層（※3）の形状のイメージングに成功しました。この手法は、半導体デバイスの性能を評価しながら、その内部の様子が可視化できる新たな手法として、ダイオード、トランジスタ、太陽電池、LED など様々な半導体デバイスへの利用が期待されます。

※2. フェムト秒光電子顕微鏡

励起光を試料に照射して、放出する光電子を投影する顕微鏡（図 2）。超短パルスレーザーを光源とすることで、光子エネルギーが近赤外、可視、紫外光の領域で自在に変換となる。これにより、効率良く伝導電子の観測が可能となる。

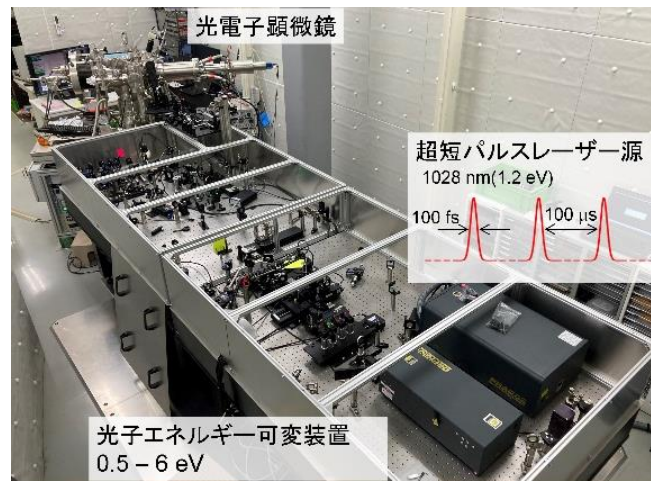


図 2 実験装置(フェムト（1000 兆分の 1）秒（fs）光電子顕微鏡)の外観写真。
100fs というとても短い時間だけ、パルスレーザーを照射した。照射と照射の間は 100μs（マイクロ（100 万分の 1）秒）空けた。

※3. 空乏層

p 型半導体と n 型半導体を接合すると、正孔が多い p 型半導体の価電子帯と電子が多い n 型半導体の伝導帯のエネルギーレベルが揃うように、エネルギーレベルが傾斜をもつ。これにより、電荷キャリアである電子と正孔が存在しない領域（空乏層）が形成される。通常のダイオードでは、順方向に外部電圧を印加すると、傾斜が小さくなり、電荷が流れる。逆方向では、傾斜が大きくなり、電流が流

れない。トンネルダイオードでは、空乏層をトンネルするように逆方向バイアスの印加で p 型半導体の価電子帯から n 型半導体の伝導帯に電子移動する。

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 物質構造科学研究所

ピアテンコ エリザベス 研究員

野澤 俊介 准教授

福本 恵紀 特任准教授

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

物理現象を画像として直接捉えることで、これまで気が付かなかった情報を得ることができます。これまでの半導体の常識を覆すような装置開発を目指しています。

なぜこの研究を始めたのですか

1948 年に、William Shockley は、p 型と n 型半導体を接合すると、外部から印加する電圧の極性によって、電流が流れたり、流れなかったりする、電気整流性（ダイオード）を発見しました。それ以来、半導体の教科書には、必ずと言っていいほど、Shockley が描いた空乏層のエネルギー構造の図が載せられています。しかし、この図は、電氣的な計測と理論計算から推測されたものです。半導体デバイスの性能を直接評価するには、pn 接合界面を可視化すること、つまりデバイスの断面を観測することが重要となりますが、そこには高いハードルがありました。ひとつは、光電子顕微鏡を利用してミリメートル以下の小さい試料を観測する場合、試料端は構造欠陥となり膨大な量の光電子が放出されることです。これにより観測したい領域からの光電子が効率良く検出できなくなります。さらには、試料端から発生する電場が光電子軌道を歪めることで空間分解能の著しい低下を招くことも測定を困難にしている要因です。今回、半導体デバイスが動作している環境で、デバイス断面を観測したことで、pn 接合界面に形成される空乏層の構造変化が明らかとなりました。

ひらめいたところはどこですか

2014 年頃、偶然、半導体中を動く電子をイメージングできる手法を発見しました [Fukumoto et al., Applied Physics Letters 104, 053117 (2014)]。電子が見えるのであれば、電子が存在しなくなった、空乏層が見えるのではないかと発案しました。

努力したところはどこですか

新しい発見には、いくつかの手段で、何度も確認のための測定が必要になります。手間のかかる実験では、再現性の確認が大変な作業になります。何度も繰り返し測定ができるように、実

験装置を動作するためのプログラミング、さらには、取得する膨大な量の画像を解析するためのプログラミングを丁寧に作り上げ、簡便に実験ができる環境の構築を行いました。これまでに、およそ 10 年かけて進めてきた装置開発ひとつひとつの積み重ねによる成果となります。

何がわかったのですか

pn 接合界面は半導体デバイスの心臓部であり、界面に形成される空乏層が外部電圧の印加により形状変化することで、電流の流れを制御するバルブの役割を担います。今回、パルスレーザーを光源とする光電子顕微鏡を利用して、半導体デバイスのひとつであるトンネルダイオードが動作する環境下で pn 接合界面における空乏層の形状変化、さらには、トンネル電流のイメージングが可能であることを実証しました（図 3）。この手法は、様々な半導体デバイスに適用できるため、今後のデバイス開発への貢献が期待されます。

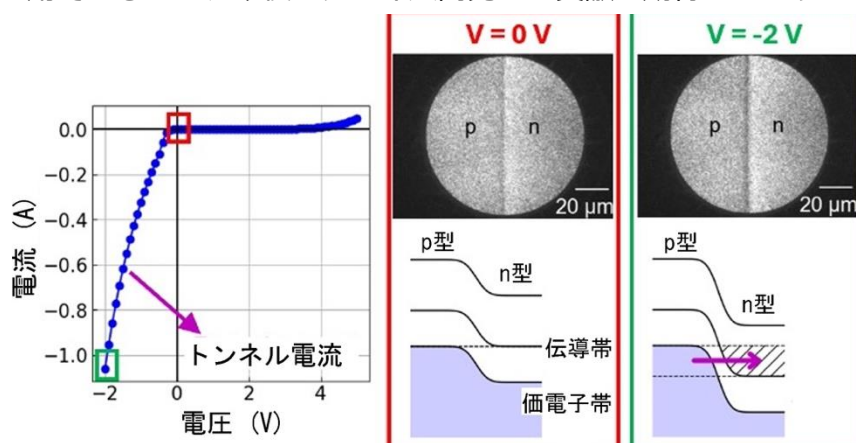


図 3 （左）トンネルダイオードの電流-電圧曲線。（中・右）印加電圧に依存する光電子顕微鏡像とエネルギーレベル。p 型と n 型半導体が異なるグレイスケールで可視化されている。それらの界面には空乏層が形成され、-2V ではその幅が広がっていることが見て取れる。さらに、同時に取得したスペクトルから n 型半導体のエネルギーレベルが下方向へシフトすること、および、トンネル電流が流れていることを観測した。

それで世界はどう変わりますか

空乏層は、今回測定したトンネルダイオードだけでなく、ほとんどの半導体デバイスにおいて中心的な役割を担っています。本手法は、半導体デバイスの新たな評価方法として、幅広い半導体業界への応用が期待されます。また、デバイス内部の空乏層を直接観察することで、新しい材料やデバイスの設計・開発の効率化が図られ、次世代の高性能半導体デバイスの実現に寄与することが期待されます。



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、JSPS 科研費 15K17677、21H01752、23H00269 の助成を受けて実施されました。

論文情報

「Imaging p-n Junctions Using Operando Photoemission Electron Microscopy (日本語名：オペランド光電子顕微鏡による pn 接合界面の可視化)」
雑誌名「Nano Letters」 volume 25 (オンライン版 4 月 9 日)
DOI: <https://doi.org/10.1021/acs.nanolett.5c00513>

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
e-mail: [keiki\[at\]post.kek.jp](mailto:keiki[at]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
加藤 豪
Tel : 03-5214-7276
e-mail: [souhatsu-inquiry\[at\]jst.go.jp](mailto:souhatsu-inquiry[at]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\[at\]g.ecc.u-tokyo.ac.jp](mailto:atto-office-group[at]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\[at\]kek.jp](mailto:press[at]kek.jp)

科学技術振興機構 広報課

Tel: 03-5214-8404 Fax : 03-5214-8432
e-mail: [jstkoho\[at\]jst.go.jp](mailto:jstkoho[at]jst.go.jp)