

# 動作しているデバイスの埋もれた層の電子状態 観察法の確立と超高速デバイスへの応用

所属： 東北大学電気通信研究所

助成対象者：吹留 博一

## 概要

GaN をベースとした高速トランジスタ (GaN-HEMT) は、5G のキーデバイスである。GaN-HEMT の大きな課題の一つが、表面準位による電子捕獲 (SET) に起因した電流コラプス現象である。我々は、高輝度放射光を光源とした光電子顕微鏡を用いて、SET の直接観測をはじめて試みた。その結果、SET の直接観測に成功し、電圧印加直後 ( $\sim 1 \mu\text{s}$ ) に、ゲート電極近傍 (数百 nm) においてのみ、正に帯電した表面準位が電子を捕獲することにより中性化することを明らかにした。

## Abstract

Gallium nitride (GaN)-based transistors are promising for realizing ultralow latency of wireless information communications that are indispensable for smart societies. However, surface states have slow time constants of (de)trapping electrons and delay electrical signal responses of the transistors, which prevents the ultralow latency. To clarify the mechanism of surface electron trapping (SET) of GaN-based transistors, which varies spatiotemporally, we studied the dynamics of the SET by using spatiotemporally-resolved x-ray spectroscopy. We directly observed that neutralization of donor-like surface states occurs only near the gate edge in the drain side just after switching off the bias. We found that the large local electric field formed by the bias application induces site- and time-specificity in the SET which leads to the delayed responses. Our proposed mechanism will be useful for optimizing the transistor structure to achieve the ultralow latency.

## 研究内容

### 【背景】

地球環境問題とウイルス禍が、我々を存亡の機に立たせている。未来を拓くには、あらゆるウイルスに効く万能ワクチンの開発に加え、十分な社会的距離と活発な社会経済活動の両立を担保する



図 1 必要とされる通信技術のイメージ

「どこからでも瞬時にアクセスでき、高臨場にコミュニケーションできる」通信技術の創出が求められる。後者の技術創出に必要な科学技術の一つ、超高速・超低消費電力化された通信の実現は、我々に課せられた使命の一つと言えよう。

この実現に資するデバイスが、GaN をベースとした高電子移動度トランジスタ (GaN-HEMT) である。この GaN-HEMT は、住友電工から 4G・5G 用の基地局用として世界に先駆けて商用化されている [1]。更なる性能向上のための大きな課題の一つが、表面電子捕獲 (SET) に起因する電流コラプス現象である。

SET の機構を解明するために、応募者は、世界に先駆けて創出したデバイス動作下 (オペランド) で高分解能 (水平方向 70 nm、垂直方向 0.1 nm) で電子状態・化学状態を観測するオペランド顕微 X 線分光を開拓した [2]。この研究から、代表者は、SET の空間分布の直接観測に、世界で初めて成功した。ただし、この研究においては、DC 電圧下であった。そのため、GaN-HEMT が実際に動作する高周波動作下において、SET がどのような挙動をしているのかは詳らかにされていなかった。

【目的】高い時空間分解能を有する ST-XANES を用いて、GaN-HEMT の動作中に SET に関わる表面の電子状態・化学状態がどのように変化するかを解明することを、本研究の目的として設定する。

### 【実験】

試料として、住友電工・伝送デバイス研究所から提供された GaN-HEMT を用いた (図 1)。本研究では、SPring-8 の BL25SU に設置されている光電子顕微鏡を用い、光源としては、

パルス化された X 線を用いた (図 1)。この X 線パルスと電圧印加を精密に同期させ、さらに 25,000 回繰り返し測定することにより、S/N 比が高い、時空間分解 X 線吸収端分光スペクトル (ST-XANES) を得た [3]。

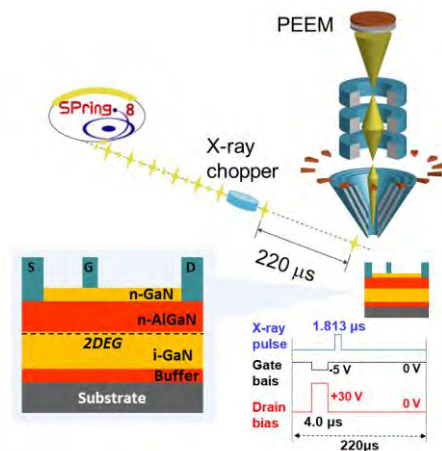


図 2 本研究における実験系の概略

【結果および考察】

GaN-HEMT 表面における SET の時空間変化を調べるために、表面 Ga 原子の  $L_3$  吸収端の ST-XANES を測定することで、GaN-HEMT 表面の電子状態・化学状態を調べた。このスペクトルは、Ga  $2p_{3/2}$  内殻準位から  $3d$  空軌道への電子遷移を反映したものであり、Ga 原子の電子状態および化学状態の詳細を与えてくれるものである。

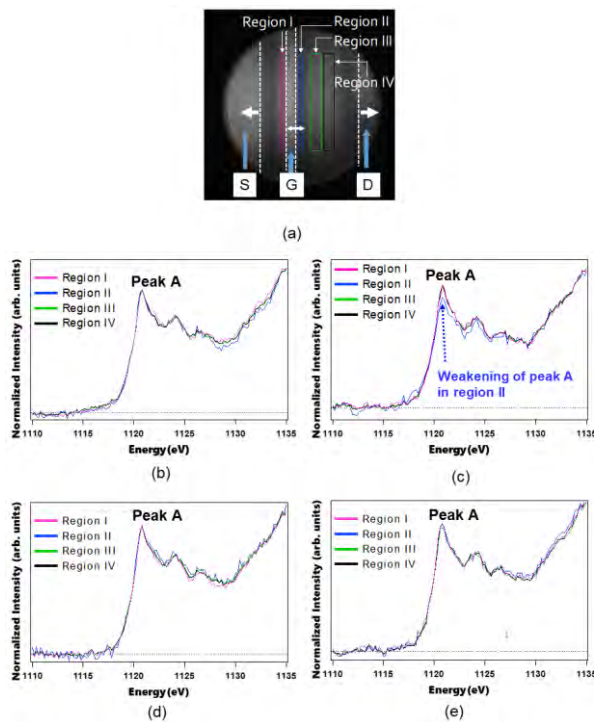


図 3 GaN-HEMT の SET の ST-XANES による測定結果

この Ga-L<sub>3</sub> 吸収端の ST-XANES の時空間変化を、図 2 に示す。図 2 から分かることは、印加電圧を切った直後 (<1 μs) でゲート電極近傍のドレイン側においてのみ、ST-XANES の変化、具体的には peak A が変化している点である。peak A は、s-軌道およびそれと混成している d 軌道に由来するものであり、Ga-N の共有結合性と関連しているものである。

この peak A の変化は、電圧印加によるものであると考えられる。その証拠として、電圧印加時の電場分布をシミュレーションした (図 4)。その結果、ゲート電極近傍のドレイン側において、大きな局所電界が発生していることが明らかとなった。よって、peak A の変化は、ゲート・ドレイン電圧印加により発生する局所電界により誘起されたものであると結論される。

この peak A の変化は、正に帯電している表面準位に関係しているとして推論される。Peak A は、Ga が電氣的に中性化すると弱化することが理論計算により示されている。このことから、我々は、peak A の変化は、正に帯電した表面準位が、ゲート・ドレイン電圧印加により形成される大きな局所電界により、中性化することを反映しているとして結論した。

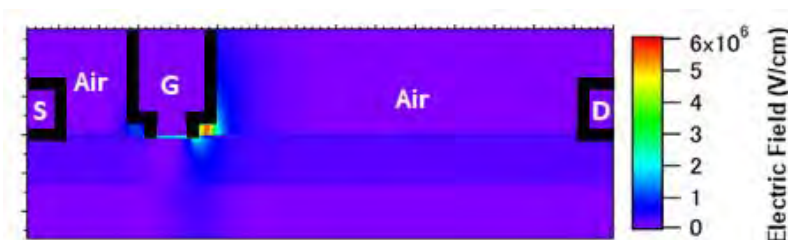
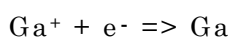


図 3 表面局所電場のシミュレーション結果。

すなわち、次式のような反応が GaN-HEMT 表面で起こるということである。



次に、得られた結果について考察する (図 5)。そのために、DC 電圧下で、代表者と住友電工・伝送デバイス研究所による DC 電圧印加下でのオペランド観察結果と比較する [2]。今回の結果においては、ゲート電圧印加から 200 μs の間の短い時間における SET の挙動を観測しており、SET はゲート電極近傍においてのみ起こっていた。それに対して DC 電圧下では、ゲート電極近傍だけでなく、ゲート電極から離れたドレイン側においても、SET が観測されていた。これらの実験を踏まえると、電圧印加直後にゲート電極近傍で捕獲された表面電子が、時間とともに、ドレイン電極の方へ拡散していくことが明らかとなった。このような SET はこれまで直接観測されたことはなく、我々が世界で初めて観測したものであると言える。

## 【今後】

筆者がデバイス・インフォマティクス (DI) と呼ぶ手法の創成である。DI とは、膨大なオペランド計測データの中から機能発現に本質的に関与する物性・構造

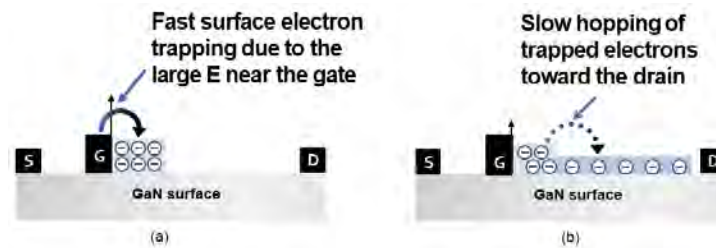


図 4 SET の時空間的挙動の模式図

の時空間ダイナミクスを抽出し、それとマクロに出力されるナノデバイス機能を結び付ける定量可視化した数理モデル（例：等価回路モデル）を機械学習の援用により導出し、機能発現機構を精密に解明する手法のことである。DIを用いて、等価回路モデリングの予測までできるようになれば、デバイスに留まらず、その上の階層である回路とナノ表面界面物性・構造を定量的に結び付けることができるようになる。

## 引用文献

- [1] A. Kawano, N. Adachi, Y. Tateno, S. Mizuno, N. Ui, J. Nikaido, and S. Sano, APMC 2005 Aisa-Pacific Conference Proceedings 3, 4 (2005). (DOI: 10.1109/APMC.2005.1606618)
- [2] K. Omika, Y. Tateno, T. Kouchi, T. Komatani, S. Yaegassi, K. Yui, K. Nakata, N. Nagamura, M. Kotsugi, K. Horiba, M. Oshima, M. Suemitsu, and H. Fukidome: Sci. Rep. **8**, 13268 (2018).
- [3] K. Omika, K. Takahashi, A. Yasui, T. Ohkochi, H. Osawa, T. Kouchi, Y. Tateno, M. Suemitsu, H. Fukidome, being submitted.

## 本助成に関わる成果物

### [論文発表]

K. Omika, Y. Tateno, T. Kouchi, T. Komatani, S. Yaegassi, K. Yui, K. Nakata, N. Nagamura, M. Kotsugi, K. Horiba, M. Oshima, M. Suemitsu, and H. Fukidome: Sci. Rep. **8**, 13268 (2018).

現在、もう一件、Applied Physics Letters 誌に投稿し、査読中。

### [口頭発表]

下記、いずれも招待講演。

- 1) 動作しているデバイスの表面準位の時空間ダイナミクスの局所電界による制御  
第 36 回表面科学会講演大会，名古屋国際会議場，2018.11.19.

吹留博一

- 2) オペランドナノ X 線分光の利用を特徴とする産官学連携次世代デバイス研究開発  
東北大学多元物質科学研究所放射光産学連携準備室ワークショップ「次世代放射光が拓く多元物質科学の先端」，東北大学多元物質科学研究所，2018.11.30.

吹留博一

- 3) 実デバイスの産学連携オペランド顕微軟 X 線分光分光と埋もれた界面の観察に向けて  
ISSP 短期研究会「軟 X 線放射光科学のアップシフト」，東京大学物性研究所，2018.12.1.

吹留博一

- 4) オペランド・ナノ X 線分光を用いた精密動作解析を特徴とする次世代無線通信デバイス研究開発  
表面科学会 放射光表面科学研究部会・表面科学会 プローブ顕微鏡研究部会合同研究会，物質・材料研究機構，2019.3.5.

吹留博一

- 5) オペランドナノ X 線分光を用いた二次元電子系デバイスの研究開発  
科学技術交流財団・実用エネルギー材料開発のオペランド解析研究会，科学技術交流財団研究交流センター（愛知県名古屋市），2019.3.6.

[その他]

2018 年に三件報道

1. GaN 無線通信用高速トランジスタの表面電子捕獲のナノスケール分析に成功  
日本経済新聞 Web 刊
2. GaN 無線通信用高速トランジスタの表面電子捕獲のナノスケール分析に成功  
日刊工業新聞
3. GaN 無線通信用高速トランジスタの表面電子捕獲のナノスケール分析に成功  
EETIMES