



東北大学
TOHOKU UNIVERSITY



東京理科大学
TOKYO UNIVERSITY OF SCIENCE

平成 30 年 9 月 14 日

報道機関 各位

東北大学電気通信研究所
住友電気工業株式会社
東京理科大学

GaN 無線通信用高速トランジスタの表面電子捕獲の ナノスケールその場分析

～超スマート社会を支える次世代無線通信デバイスの出力を向上～

【発表のポイント】

- 社会的弱者を含めたあらゆる人々が快適に暮らすことができる超スマート社会にとって、GaN を用いた高速トランジスタ (GaN-HEMT※1) はキーデバイスの一つであり、日本が世界を先導している数少ないエレクトロニクス分野の一つです。
- 今回の研究は、GaN-HEMT の出力低下をもたらす表面電子捕獲のナノスケールの定量分析および、その抑制機構の解明にはじめて成功したものです。
- 得られた成果は、GaN-HEMT の更なる高出力化・高速化につながるものであり、当該分野における日本の優位性を支えるものとなります。

【概要】

東北大学電気通信研究所の吹留博一准教授らのグループは、住友電気工業、東京大学放射光分野融合国際卓越拠点、物質・材料研究機構、高エネルギー加速器研究機構、および東京理科大学と共同で、デバイス表面電子状態の定量的な微視的分析を可能にするオペランド顕微 X 線分光※2を用いて、超スマート社会の基盤インフラとなる超高速情報通信の中核を担う GaN を用いた無線通信用高速トランジスタ (GaN-HEMT) の産学連携共同研究を行いました。その結果、GaN-HEMT の出力を低下させる表面電子捕獲の定量的なナノスケール分析にはじめて成功し、さらに、その分析結果に基づいて表面保護膜による表面電子捕獲の抑制機構を解明しました。本研究の成果は、GaN-HEMT の更なる高出力化をもたらすものです。

【詳細な説明】

<背景>

日本において急速に進む少子高齢化に関わる諸問題の解決のために、超スマート社会の実現が希求されています。そのため、超スマート社会の技術インフラとして、超高感度センサーや超高速デバイスなどの開発に加えて、それらのデバイス同士やそれらのデバイスと人をつなぐ超高速情報通信技術の研究開発が喫緊の課題です。

GaN と AlGaIn 界面に電子輸送層として用いたトランジスタ (GaN-HEMT) は、X バンド (数 GHz) やミリ波帯 (数十 GHz) で動作する有望な超高速通信用トランジスタです。GaN とその上に成長させた AlGaIn の界面では、電子は二次元的に閉じ込められており、高速で動きます。さらに、GaN はバンドギャップが大きいいため、大出力化が可能です。このような優れた特性を有する GaN-HEMT は、次世代通信技術のキーデバイスの一つとなっています。GaN-HEMT に関し、住友電気工業は世界トップシェアを誇ります。

東北大学と住友電気工業は、GaN-HEMT や炭素の二次元結晶であるグラフェンなどの二次元電子系を利用した電子デバイスの共同研究を行ってきています。GaN-HEMT は実用化されていますが、未だ解決されていない問題を抱えております。最大の問題が、GaN-HEMT の出力を低下させる電流コラプス現象です。電流コラプス現象をもたらしている大きな原因の一つが、デバイス動作のために発生するゲート電極近傍の大きな局所問題に起因したデバイス表面の電子捕獲でした。表面電子捕獲は、産業的にも重要であるばかりでなく、Bell 研によるトランジスタ発明の際に勃興した表面物理学における核心的な研究課題です。通常、半導体デバイスの動作機構の解明には、巨視的な電気測定評価法が用いられます。しかし、電気測定評価法では、局所的な情報が得られないため、今回の GaN-HEMT の電流コラプス現象に関与する表面電子捕獲の機構を解明することは困難です。

SPring-8※3 に設置されている東京大学アウトステーションでは、動作しているデバイスの表面状態を高空間分解能 (70 nm) で観測する手法であるオペランド顕微 X 線光電子分光が確立されています。例として、電圧が印加されたグラフェン・トランジスタの微視的な電子状態の観察に成功しています (図 1)。このような特徴を有するオペランド顕微光電子分光は、デバイス表面の電子状態観察に最適である手法です。

<成果の内容>

今回、電流コラプス現象の原因となっている表面電子捕獲の機構を解明する目的で、GaN-HEMT のオペランド顕微 X 線光電子分光観察を、東北大学、住友電気工業、東京大学放射光分野融合国際卓越拠点、物質・材料研究機構、高エネルギー

ギー加速器研究機構、および東京理科大学と共同で研究を行いました。

本研究で用いたオペランド顕微光電子分光装置は、電圧印加下で電子状態観察が行える仕様となっています。また、分光測定と同時に電気特性の評価が可能です。

実際に得られた、Ga_N-HEMT の表面電子捕獲に関するオペランド顕微 X 線分光を用いた研究結果を図 2 に示します。ここで、ゲート電極に-5V、ドレイン電極に 30V が印加されています。図 2 に、ゲート電極とドレイン電極間の Ga_N 表面の、Ga 3d 内殻準位光電子スペクトルを示しています。この結果から明らかのように、Ga 3d スペクトルのピークは強い場所依存性を示します。さらに、図 2 に、詳細なピーク位置の場所依存性を示しています。この場所依存性が、ゲート電極およびドレイン電圧にだけに因るものだとすると、Ga スペクトルが変化する領域は、ゲート電極端から数百 nm の領域に限定されるはずですが、実際には、それよりも広い数千 nm にもわたる領域で緩やかに変化しています。このピーク位置の変化は、定性的には、表面電子捕獲によるバンド湾曲変化が関係していると推論されます。この推論に基づき、デバイス・シミュレーターを組み合わせで解析しました。その結果、表面電子捕獲が起こっている領域と表面捕獲電子密度の定量分析に成功しました。このような成果は、通常の巨視的な電気特性評価法や X 線分光では困難な、オペランド顕微 X 線光電子分光法でしか得られません。

さらに、Ga_N 表面の表面電子捕獲を低減すると推測されている Si₃N₄ 表面保護膜の効果についても、オペランド顕微 X 線光電子分光を用いて研究いたしました(図 3)。その結果、デバイス・シミュレーションとの組み合わせにより、表面電子捕獲の定量分析に成功いたしました。その結果、Si₃N₄ に比して、表面電子捕獲量が低減し、また、ゲート電極近傍での表面電子捕獲の増大が見られませんでした。

以上のように、オペランド顕微光電子分光を用いて、これまで困難だった、Ga_N-HEMT の表面電子捕獲の定量分析に成功し、さらには、表面保護膜の役割を定量的に理解することが出来ました。

<今後の展望>

今後は、さらに、デバイス特性に大きな影響を及ぼす表面電子状態に関して、空間的な電子状態変化だけでなく、時間的な変化についても研究を行う予定です。これにより、エレクトロニクスにおいて、いまや数少なくなった世界を先導する分野である高速通信デバイスの学理に基づく研究開発を産学連携で活発に行っていく所存です。

本研究は正式に承認された東北放射光光源計画において利用可能なさらに微細で強力な軟 X 線ナノビームを用いた産学連携共同研究のまさに魁となる研究であり、高輝度軟 X 線用の東北放射光光源の必要性を強く示すものです。

本研究の詳細は、Scientific Reports (Springer Nature)に 9月5日にオンライン掲載予定の論文において報告されます。

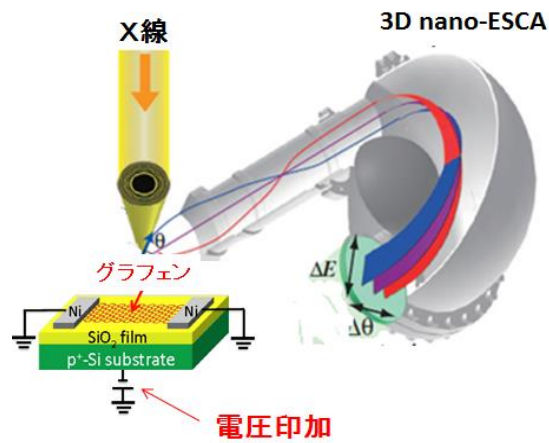
(著者) Keiichi Omika, Yasunori Tateno, Tsuyoshi Kouchi, Tsutomu Komatani, Seiji Yaegassi, Keiichi Yui, Ken Nakata, Naoka Nagamura, Masato Kotsugi, Koji Horiba, Masaharu Oshima, Maki Suemitsu, and Hirokazu Fukidome

(タイトル) Operation Mechanism of GaN-based Transistors Elucidated by Element-Specific X-ray Nanospectroscopy

(掲載雑誌) Scientific Report (2018), accepted.

(DOI: 10.1038/s41598-018-31485-4)

本研究の一部は、NEDO 産学連携プロジェクトや科学研究費補助金などにより支援されました。また、オペランド顕微光電子分光は、東京大学アウトステーション BL07LSU にて行われた研究成果です。



Fukidome et al. APEX (2014)

図1 オペランド顕微 X 線光電子分光法の概略

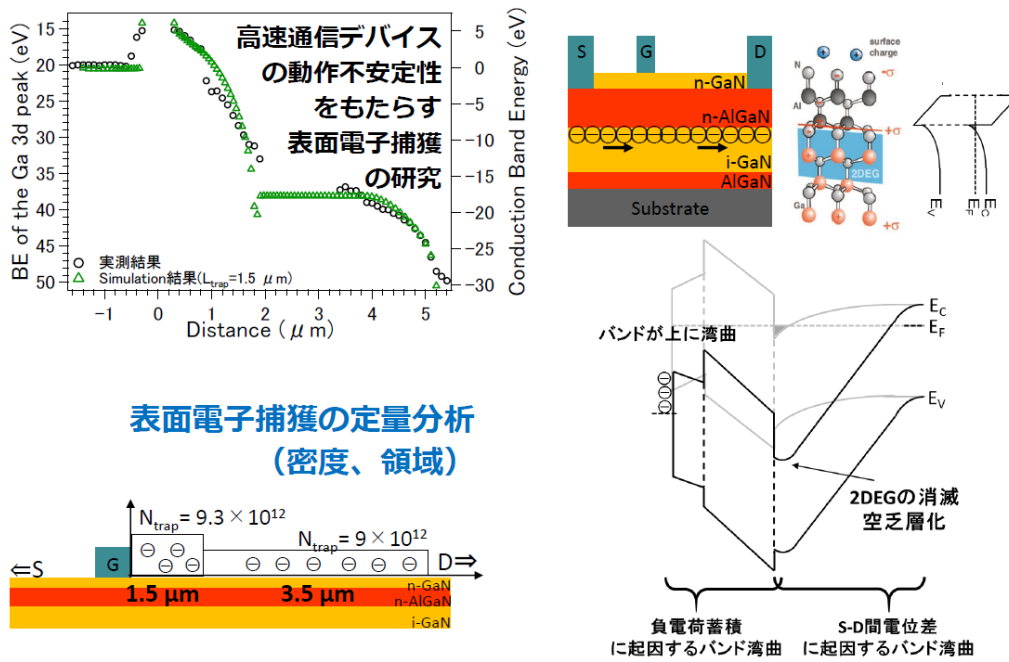


図2 オペランド顕微光電子分光による GaN-HEMT の表面電子捕獲の機構解明

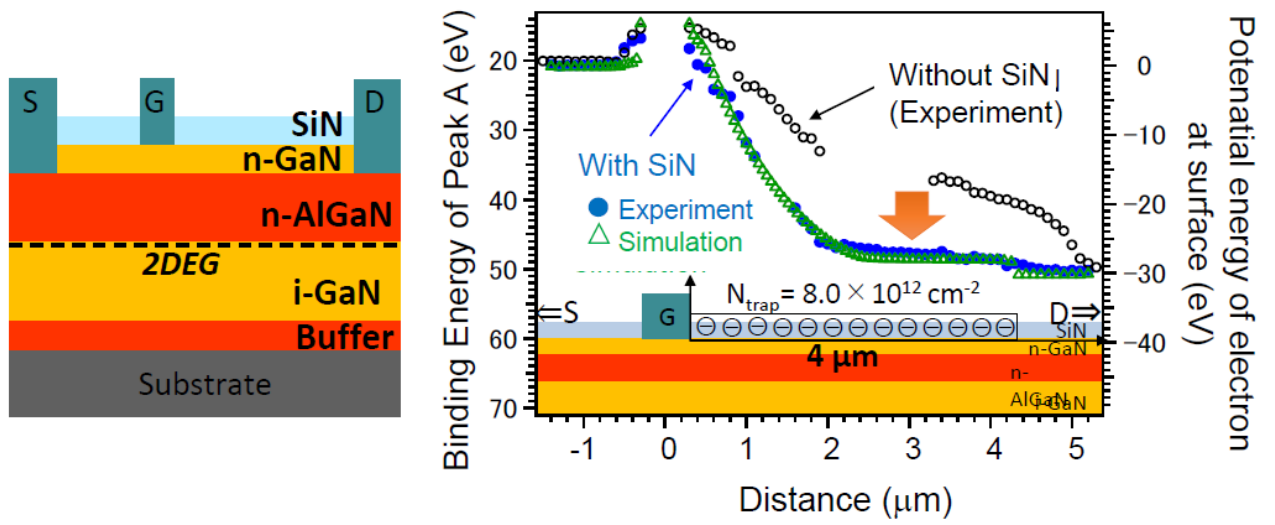


図 3 オペランド頭微光電子分光を用いた SiN 保護膜の役割の解明

<用語解説>

1) GaN-HEMT

GaN 上に AlGaN を成長させたときに生じる界面のポテンシャルにより二次元的に閉じ込められた電子が、高速に動くことを利用した高速通信用トランジスタです。GaN のバンドギャップが大きいことから、大きな電圧を印加することが出来ることから、高速性だけでなく、高出力性も兼ね備えています。GaN-HEMT の携帯基地局用応用などに関し、住友電気工業は世界トップシェアを誇っています。

2) オペランド顕微光電子分光法

オペランド顕微光電子分光とは、光電子分光法に高い顕微機能（分解能：70 nm）を持たせ、デバイス動作下で行う分光法のことです。これにより、従来、膜の状態でした測定出来なかった電子状態が、実際に動作している状態で機能部位毎に調べることが可能となりました。このような特徴を持つオペランド顕微光電子分光は、基礎科学的だけでなく、産業界からも注目されています。なお、本研究で用いたオペランド顕微光電子分光装置は、東京大学が SPring-8 に建設した世界最先端の軟 X 線分光用ビームライン BL07LSU に設置されているものです。このオペランド顕微光電子分光を用いた研究は、GaN-HEMT、グラフェン・トランジスタ、SiC パワーデバイス、さらには電極用材料までにわたる幅広い研究分野まで展開しています。

3) 大型放射光施設 SPring-8

兵庫県の播磨科学公園都市にある、世界最高の放射光を生み出す理化学研究所の施設。その管理運営は高輝度光科学研究センターが行っている。SPring-8 の名前は Super Photon ring-8GeV に由来。放射光とは、電子を光とほぼ等しい速度まで加速し、電磁石によって進行方向を曲げた時に発生する、細く強力な電磁波のこと。SPring-8 ではこの放射光を用いて、ナノテクノロジー、バイオテクノロジーや産業利用まで幅広い研究を行っている。

【問い合わせ先】

東北大学電気通信研究所

担当:吹留博一 准教授

電話番号/FAX:022-217-5484

E-mail:fukidome@riec.tohoku.ac.jp