

## 時空間オペランド X 線吸収分光を用いた GaN-HEMT のアクセス領域におけるキャリア・ダイナミクスの時空間解析

### Spatio-temporal Analysis on Carrier Dynamics in Access Regions of GaN-HEMT by using Spatio-temporal Operando X-ray Absorption Spectroscopy

大美賀 圭一<sup>a</sup>, 舘野 泰範<sup>b</sup>, 河内 剛士<sup>b</sup>, 大沢 仁志<sup>c</sup>, 大河内 拓雄<sup>c</sup>, 吹留 博一<sup>a</sup>  
Keiichi Omika<sup>a</sup>, Yasunori Tateno<sup>b</sup>, Tsuyoshi Kochi<sup>b</sup>, Hitoshi Osawa<sup>c</sup>, Takuo Okouchi<sup>c</sup>,  
Hirokazu Fukidome<sup>a</sup>

<sup>a</sup>東北大学電気通信研究所, <sup>b</sup>(株)住友電気工業, <sup>c</sup>(公財)高輝度光科学研究センター,  
<sup>a</sup>RIEC, Tohoku University, <sup>b</sup>Sumitomo Electric Industries, <sup>c</sup>JASRI,

局所電界集中による表面準位の電子捕獲に起因するコラプス現象は、次世代通信デバイスである GaN-HEMT の動作不安定性を招く。この電流コラプス現象を解明するために、BL25 の時分割 PEEM を用いて、オペランド時分割 PEEM による GaN-HEMT 表面の時空間観察を行った。その結果、局所電界集中による正に帯電した表面準位の電子捕獲のダイナミクスを捉えることにはじめて成功した。

キーワード： キャリア・ダイナミクス、オペランド、時分割 PEEM、GaN-HEMT

#### 背景と研究目的：

【意義】情報通信分野において、情報通信量の爆発的増大が危機的状況をもたらしている。伝送速度の高速化は、通信の大容量化と低消費電力の両立を可能にする有効策である。以上のことから、次世代通信デバイス材料として、今まで基礎学的興味から盛んに研究されてきた二次元電子系の実用化に向けた研究が本格化している。GaN/AlGaIn 界面の（擬）二次元電子系を用いた高周波デバイス（GaN-HEMT）は、大出力かつ高周波（>100GHz）動作が可能であることから盛んに研究されており、実際 X 帯（～数百 MHz）での携帯基地局用として早くも一部実用化されている。

【問題点】しかし、更なる高周波帯、ミリ波帯への応用に向けては、コラプス現象「高電圧印加による表面準位による電子捕獲」によって引起される出力不安定性が大きな壁となっている（図 1）。

【これまでの研究】デバイスの表面準位の観察には、我々が BL17SU に設置されている PEEM や BL07LSU に設置されている 3D nano-ESCA を用いて（DC）電圧印加下で電子状態を観察するオペランド顕微 X 線分光が適している[1,2]。

このような背景から、コラプス現象を引き起こす表面準位の 3D nano-ESCA のオペランド顕微分光による直接観察に、我々のグループ（東北大・住友電工・東大・NIMS・東京理科大学）が世界に先駆けて成功した。

但し、この観察においては、DC 電圧下での観察であった為、実際の動作条件下（非 DC 電圧印加下）とは異なる可能性が高い。特に問題となるのが、このコラプス現象は、時間スケール（ナノ秒・マイクロ秒・ミリ秒）によりその挙動が変化し得るという点である。

今回の実験は、マイクロ秒オーダーでコラプス現象を引き起こす化学種の同定を、時間分解オペランド PEEM（顕微 X 線吸収）を用いることにより、100 nm・1 μs の高分解能観察により行うことを目的として行った。

#### コラプス現象 （界面準位の電子捕獲）

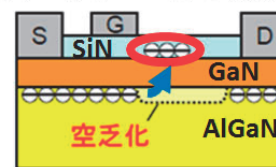


図 1 コラプス現象の概略図

**実験：**

用いた試料は、世界で初めて GaN-HEMT の商用化に成功した住友電工により提供された GaN-HEMT 試料を用いた。この試料の高信頼性は、実験の再現性を保証するものである。

オペランド時分割 PEEM 実験は、セベラルバンチ・モードのパルス化された放射光をプローブとして、BL25 に設置されている時分割 PEEM を用いて行った。元素吸収端近傍で X 線を照射した時に発生される Auger 二次電子によるイメージングを用いて、表面敏感な狙った場所・時間での X 線吸収測定を行った。本研究においては、Ga 及び N の X 線吸収スペクトルを測定した。スペクトル測定の際には、超高真空対応 X 線チョッパーと放射光を同期させ、電圧印加後の異なる時間ドメインでスペクトル測定が行えるようにした、

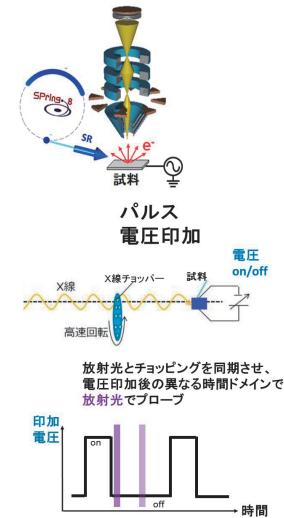
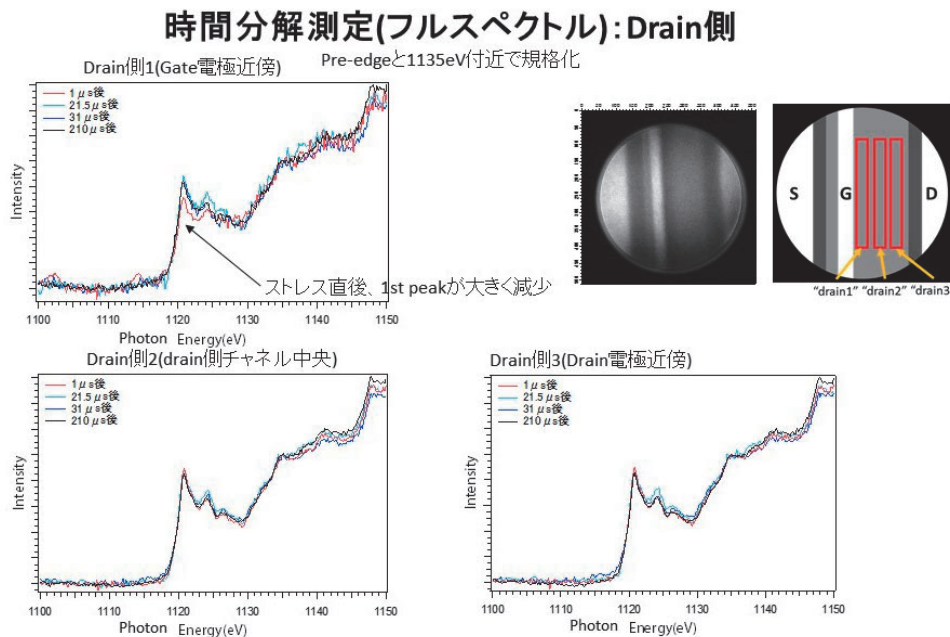


図 2 オペランド時分割 PEEM 測定系の概略。

**結果および考察：**

時間分解能：マイクロ秒・空間分解能：100nm でゲート電圧・ドレイン電圧印加下での GaN 表面のオペランド時空間分解 X 線吸収スペクトルの測定に成功した (図 3)。その結果、ゲート電極近傍のドレイン側の電圧印加直後の 1 マイクロ秒のスペクトルにおいてのみ、Ga の吸収端ピークが変化することを発見した。理論計算によると、このピークは、s 軌道と p+d 軌道の混成に由来する状態密度を反映していることが明らかにされている。さらには、その強度は共有結合性 (イオン結合性) に由来することが示されている。この理論計算から今回の実験結果を解釈すると、ゲート電極近傍のドレイン側において生じている局所電界集中により正に帯電したドナー型表面準位へ電子が捕獲され中性化されていく様子を、今回の時空間オペランド顕微 X 線分光により初めてとらえられたと推論される。



ゲート近傍、1μ秒後のスペクトルにおいて、第一ピークが弱い (broadening)

図 3 時空間分解 Ga-L edge X 線吸収スペクトル。

#### 今後の予定：

デバイス・シミュレーションにより局所電界強度を定量的に計算し、今回の観察結果と比較検討する。また、測定試料の高速電気測定評価結果との比較を行う予定である。その後、急ぎ、論文のかたちにもとめて投稿する予定である。

#### 参考文献

- [1] **H. Fukidome**, M. Kotsugi, K. Nagashio, R. Sato, T. Ohkouchi, T. Itoh, A. Toriumi, M. Suemitsu and T. Kinoshita, *Scientific Reports* **4** (2014) 3713.
- [2] **H. Fukidome**, K. Nagashio, N. Nagamura, K. Tashima, K. Funakubo, K. Horiba, M. Suemitsu, and M. Oshima, *Applied Physics Express* **7** (2014) 065101.