

軟 X 線時間分解 PEEM を用いた GaN-HEMT のオペランド解析 Operando Analysis on GaN-HEMT using Soft X-ray Time-resolved PEEM

大美賀 圭一^a, 河内 剛士^b, 館野 泰範^b, 大河内 拓雄^c, 大沢 仁志^c, 吹留 博一^a
Keiichi Omika^a, Tsuyoshi Kouchi, Tateno Yasunori^b, Takuo Okochi^c, Hitoshi Osawa^c, Hirokazu Fukidome^a

^a東北大学, ^b住友電気工業, ^c(公財)高輝度光科学研究センター,

^aTohoku University, ^bSumito Electric Industries, ^cJASRI

東北大学・住友電気工業・高輝度光科学研究センターの間での産官学連携研究として、次世代通信デバイスの本命と目されている GaN-HEMT の動作機構解明を企図したオペランド時分割光電子顕微鏡(tr-PEEM)観察を行った。その結果、高周波電圧印加下では、DC 電圧印加下とは異なり、ゲート電極の極近傍のみに電流コラプス現象(表面電子捕獲)が起こることが明らかとなった。

キーワード： オペランド、光電子顕微鏡(PEEM)、時間分解

背景と研究目的：

【産業基盤技術としての高速通信デバイスの位置付け】日本の GDP の一割を占める情報通信分野において、情報通信量の爆発的増大が深刻な課題となっている。通信の大容量化と低消費電力の両立を可能にするデータ伝送速度の高速化が有効な解決策である。故に、次世代通信デバイス：GaN/AlGaIn 界面二次元電子系を用いた高速デバイス(GaN-HEMT)の熾烈な開発競争が世界中で行われている。本課題に参加している住友電工は世界初で GaN-HEMT の商用化に成功しているが、利用周波数帯は数 GHz 程度に限られている。しかし、周波数帯がミリ波帯(30 GHz~300 GHz)まで拡張されれば、携帯電話基地局用途に加え、自動運転用の車載レーダーや衛星通信等へ広がる。このようなミリ波デバイス市場は、年成長率 5%で急成長している(2018 年：1000 億円)。

【産業基盤技術としての GaN-HEMT における表面キャリアダイナミクス研究の重要性】GaN-HEMT の大きな課題が、ミリ波帯でのデバイス動作の高信頼性の確保である。高信頼性を阻む、すなわち動作不安定性をもたらすものとして「表面準位が関わる現象(コラプス現象)」が挙げられる。従来の 1GHz 程度の携帯基地局用デバイスでは、ゲート構造の工夫等によりこの現象による動作不安定性を回避出来ていた。しかし、ミリ波帯では、そのようなデバイス構造の工夫による動作不安定性の回避は困難である。ゆえに、GaN デバイスの高信頼性のためには、表面準位に関わるキャリア・ダイナミクスの解明が重要である。

【これまでの取り組み】

2015A 期から BL07LSU にて行っている 3D nano-ESCA による DC operando 測定[1]から高電圧ストレス印加中の GaN-HEMT 表面の電子状態観察から負電荷蓄積状態が明らかになった。しかし、実際に電流コラプス現象として問題になるのは高周波動作下での高電圧ストレス直後にも捕獲されたままとなっている負電荷の存在である。時間分解 operando 測定による高電圧ストレス直後の GaN-HEMT 表面の電子状態観察が必要不可欠である。

【研究目的】

ストレス電圧 off 直後の GaN-HEMT 表面、特に、電流コラプス現象が起こり易いゲート電極近傍に特に注目して、GaN 表面の電子状態を解明することを目的とした実験を行った。

実験：

- ・ 試料名：GaN-HEMT
- ・ 実験方法：時間分解光電子分光を用いた時空間分解 X 線吸収分光
- ・ SPring-8 BL25SU に設置されている時間分解能 50 ps、空間分解能 100 nm を有する TR-PEEM を用いた。
- ・ GaN-HEMT へのストレス電圧印加条件はどちらの試料でも、①ストレス電圧印加なし、②ゲートとドレインの両方に $(V_G_Stress, V_D_Stress) = (-5, 30)$ V のストレス電圧を印加、の2条件である。また、ストレス電圧印加時間は 4 μsec と 100 μsec とした。また、測定周期は放射光のパルスによって決まる。本測定では、バンチモード H モードを用いた。測定には 1.5 μsec の電子バンチ(集団)を入射光として用いる。また、このままの放射光を用いると測定周期が 5 μsec となってしまうので、Fig. 1 に示すような X 線チョッパーを用いて約 20 周に 1 回電子が通るように、すなわち、周期が約 200 μsec となるように設定した。

結果および考察：

ストレス電圧 off 直後の GaN-HEMT の表面電子状態を観察するために、 $V_G_Stress = -5$ V、 $V_D_Stress = 30$ V のストレス電圧を 4 μsec と 100 μsec 印加し、その後の過渡応答を SiN 保護膜無しと有りについてそれぞれ観察した。まず、SiN 保護膜無しの試料において得られた Ga L3-edge の PEEM 像をそれぞれ Fig. 2 に示す。その結果、ストレス電圧印加時間が 4 μsec の時ゲート電極端から 0.8 μm 程度の領域でピークの強度が弱くなっている部分が見受けられる。また、ストレス電圧印加時間を 100 μsec に伸ばすことで、その領域は 1.0 μm に拡大した。このピーク強度が弱い領域では負電荷の蓄積が発生していると考えられる。すなわち、ストレス電圧 off 直後に 0.8~1.0 μm 程度の仮想ゲートの形成が明らかとなった。また、この領域はストレス電圧印加によって電界が集中する領域と一致する。すなわち、高周波動作条件下で、ストレス電圧印加により局所電界集中領域で仮想ゲートが形成されることが分光学的に初めて明らかにした。

得られた結果を、我々が BL07LSU にて行っている DC 電圧下での観察結果と比較すると大きな違いがある。それは、高周波電圧下では、ゲート電極の極近傍のみ電流コラプス現象が観察されているという点である。このことから、実デバイスの動作機構解明には、時間分解能が賦与されたオペランド顕微 X 線分光が非常に有効であることが示された。

参考文献：

- [1] H. Fukidome et al.,
APEX (2014) 065101.

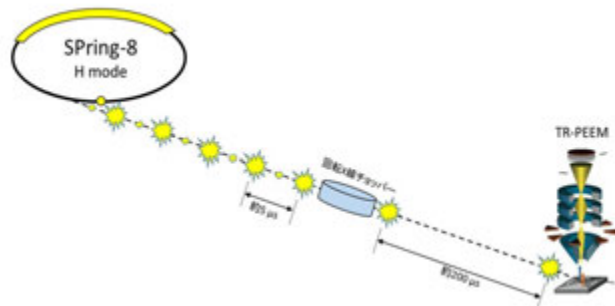


Fig. 1. 実験系の概略。

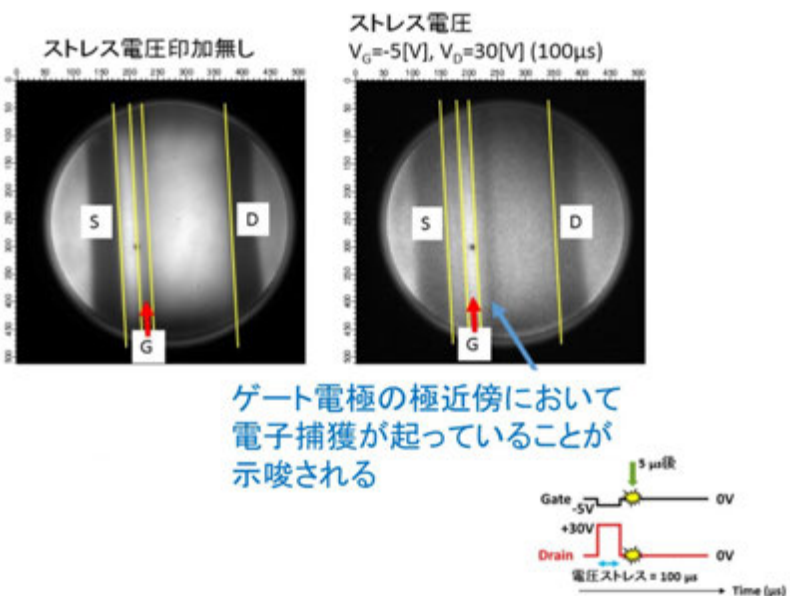


Fig. 2. オペランド観察結果