

深さ分解・時空間分割 XAFS による GaN-HEMT のオペランド解析 Operando Analysis on GaN-HEMT using Depth and Spatio-temporally-resolved XAFS

大美賀 圭一^a, 米村 卓巳^b, 河内 剛士^b, 飯原 順次^b, 館野 泰範^b,
大沢 仁志^c, 吹留 博一^a

Keiichi Omika^a, Takumi Yonemura^b, Tsuyoshi Kouchi^b, Junji Iihara^b, Tateno Yasunori^b,
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 の動作劣化の機構解明を企図したオペランド深さ分解・時空間分解 XAFS 観察を BL39XU にて実施し、実際にスペクトルの取得に成功した。その結果、当初推測していた逆ピエゾ効果よりもむしろ界面化学構造がデバイス特性と密接に関連していることが示唆された。

キーワード： XAFS、オペランド、時空間分解、深さ分解

背景と研究目的：

【背景】

(産業基盤技術としての高速通信デバイスの位置付け)日本国の 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危機的状況をもたらしている。有効な解決策として、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ある。従来の Si デバイスを用いては、更なる伝送速度の高速化は困難である。故に、次世代通信デバイスとして、GaN/AlGaN 界面の二次元電子系を用いた高速デバイス(GaN-HEMT)やグラフェン超高速トランジスタ(GFET)が有望である。GaN-HEMT は、高速かつ大出力可能な通信・パワーデバイスとして世界で熾烈な開発競争が行われている。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 X バンド(数 GHz)までに限られている。しかし、利用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。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的重要性)GaN-HEMT の大きな課題が、ミリ波帯でのデバイス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「GaN デバイスの表面準位に関わる現象」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。

(これまでの取組み状況)BL07LSU 及び BL17SU の光電子顕微鏡(PEEM)を用いた動作条件下で行うというオペランド顕微分光は申請者らと JASRI・東大のグループが共同で世界に先駆けて開拓し [1,2]、GFET の高周波動作の阻害要因が「意図しないキャリア・ドーピング」であることを見出した。このオペランド顕微分光は、基礎的にも応用的にも評価されている手法となっている(招待講演 20 件、受賞 1 件)。

この研究を発展させ、我々は、GaN-HEMT に関するオペランド顕微 X 線分光研究を東北大学と住友電工間の NEDO プロジェクトの一環として 2015 年度から開始した。具体的には、2015B 期から非 DC 電圧印加下での GaN-HEMT の電子状態の時空間的变化を、BL25SU の時間分解 PEEM を用いたオペランド観察により解明することを狙った。その結果、驚くべきことに、非 DC 電圧印

加下では、DC 電圧印加下とは異なる現象の時空間的变化の観察に成功した。すなわち、非 DC 電圧印加下では、ゲート電極近傍のパルス電圧印加後 $<1 \mu\text{s}$ の時間スケールで、表面 Ga 原子の電子軌道の混成具合が変化していることを示唆するデータを得た。このことは、圧電効果が誘起され易いウルツ鉱型の結晶構造を GaN が持つことに起因した、逆圧電効果「ゲート電極近傍に局所集中した電界により誘起された GaN の歪」によるものと推論される(図 1 下)。

(残された課題)上記の研究は、軟 X 線を用いた研究である。ゆえに、検出深さは表面から精々 5 nm の深さまでである。従って、商用の GaN-HEMT において用いられるような「 10 nm 以上の厚さを有する保護膜(SiN)がある状態で、その下にある GaN との埋もれた界面」結合状態を調べることは出来ない。

(目的)硬 X 線を用いた「微小領域(ゲート電極近傍の数百 nm)・短時間(<1 マイクロ秒)で起こる GaN-HEMT における SiN 薄膜と GaN との埋もれた界面の逆圧電効果のダイナミクスを解明する」ことを狙う(図 1 下)。

実験：

(試料)測定に用いる GaN-HEMT 試料のゲート長は数マイクロメートル、ゲート幅数十マイクロメートル。この GaN-HEMT について、保護膜として極薄 SiN(厚さ： $>10 \text{ nm}$)をゲートとソース/ドレイン間に形成させた試料を測定する(図 1 下及び図 2 左上)。加えて、対照試料として、SiN 保護膜無しの GaN-HEMT を用いる。

(用いる光のエネルギー)Ga-K 吸収端の測定をカバーする 10 keV 程度の硬 X 線。(検出器)図 2 左上に示すようなチョッパーやマイクロビーム形成光学系を含む BL39XU の高空間分解能(数百 nm)・高時間分解能(<1 マイクロ秒)な XAFS 検出系を用いる。

(時空間分解斜出射 XAFS 測定)上記二つの試料に関して、下記二つの測定を行う。これにより、保護膜の存在の有無による逆圧電効果の変化を、micro-XAFS により解明する。

1)GaN-HEMT 試料にドレイン電圧($20 \text{ V} \sim 30 \text{ V}$)及びゲート電圧($0 \text{ V} \sim -5 \text{ V}$)をパルスの($10 \mu\text{s}$ 程度)に印加する。次に、 0 V に戻すという周期的な電圧印加を行う(図 2 右上)。

2)このパルス電圧と放射光パルスを同期させることにより、パルス電圧を切った後の電子状態及び化学結合状態変化を、過去に共同実験者の館野らが用いたのと同様な BL39XU の硬 X 線 XAFS の顕微システムを用いて測定する。

3)Micro-XAFS は、ゲート電極近傍、ソース電極近傍、ドレイン近傍、の計三領域で微視的測定を行う。更に、各領域点において、異なる時間(電圧印加前、電圧印加直後、 1 マイクロ秒後、 10 マイクロ秒後、 20 マイクロ秒後、 100 マイクロ秒後)の、計 6 点データを取得する。

結果および考察：

1)He で満たされたセル中で GaN-HEMT をセットし、ソース・ストレス電圧印加をパル的に印加することに成功した。ここで、試料表面の状態を変化させないための、最適な He ガス流量の最適化にも成功した。

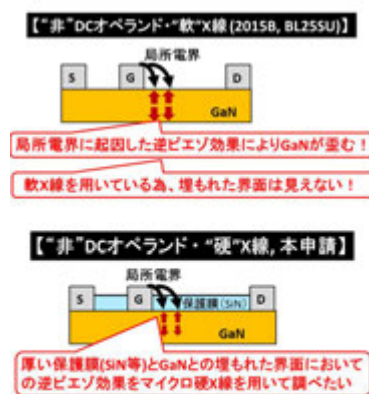


図 1. 本研究でターゲットとする GaN 界面構造

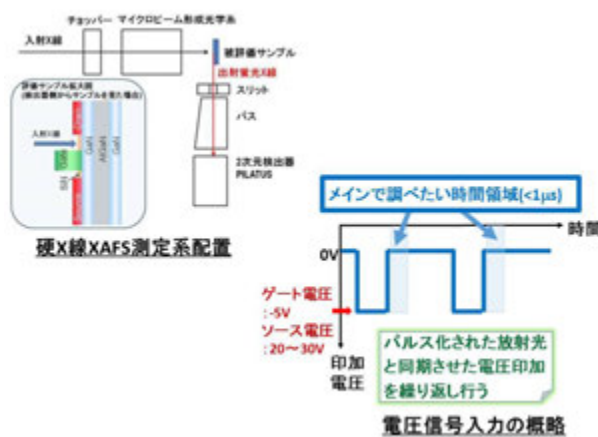


図 2. 測定システムの概略。

2)このようにしてセットした状態で、パルス電圧と X 線チョッパーを通して整えられたパルス化された放射光の同期に成功した(図 2 下)。なお、本実験におけるパルス電圧とパルス化 X 線の同期させた間隔は、1 マイクロ秒程度になるようにした。

3)1)と 2)の作業を経て、時間分解かつ深さ分解された斜出射 XAFS オペランド・スペクトルの取得に成功した(図 3)。

4)得られたスペクトルが膨大にあるため、結論は出ていないが、表面近傍の化学種の違いがあるかないかを見出すことが可能であると考えられる。

5)4)に関してだが、前回似たような実験を行った際に示唆された界面化学結合(例えば)の変化こそがデバイス劣化の原因となっており、今回狙った逆ピエゾ効果はマイナーな効果である可能性が高いかもしれないと推測している。

まとめ：

今後は、スペクトルの解析を速やかに終え、動作している GaN-HEMT の表面及びバルクの結合状態の違いを解明する。更には、表面修飾の違いによる動作出力の変化を物理化学的な見地から解明する。

参考文献：

[1] H. Fukidome et al., *Sci. Rep.* 4 (2014) 3173.

[2] H. Fukidome et al., *APEX* (2014) 065101.

時分割+深さ分解されたGaN-HEMT表面のGa吸収端ピーク



図 3. GaN-HEMT のデバイス中央部付近で取得した時分割+深さ分解 Ga 吸収端スペクトルの例。(縦軸は強度、横軸は光のエネルギー)