

オペランド時間分解マイクロビーム HAXPES を用いた GaN-HEMT の解析 Analysis on GaN-HEMT Using Operando Time-Resolved Microbeam HAXPES

吹留 博一^a, 米村 卓巳^b, 河内 剛士^b, 由比 圭一^b, 館野 泰範^b, 池永 英司^c, 保井 晃^c,
大沢 仁志^c

Hirokazu Fukidome^a, Takumi Yonemura^b, Tsuyoshi Kouchi^b, Yui Keiichi^b, Tateno Yasunori^b,
Eiji Ikenaga^c, Akira Yasui^c, Hitoshi Osawa^c

^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時間分解マイクロビーム硬 X 線光電子分光観察を BL47XU にて実施し、実際に時空間分解光電子スペクトルの取得に成功した。その結果、電圧印加のプロセスで表面のバンド湾曲が変化していく過程が観察された。

キーワード： 硬 X 線光電子分光、オペランド、時空間分解

背景と研究目的：

GaN-HEMT は、マイクロ波帯において実用化された高速通信トランジスタである。今後は、さらなる高周波数(ミリ波)、高出力化、高利得化、高効率化、低歪み化が必要とされている。そのためにはトランジスタ動作原理の深い理解が不可欠である。特に、GaN 系トランジスタにおいては、ドレイン電流が時間変動を起こす電流コラプスと呼ばれる現象の解決が非常に重要である。ここで、ドレインに瞬間的に高電圧ストレスを印加すると、高電界となったゲート・ドレイン間の GaN/SiN 界面付近に電子が捕獲され、いわゆる”仮想ゲート”を形成し、チャンネルの電子ポテンシャルを変化させ、ドレイン電流を減少させてしまう。捕獲されている電子は、時間とともに徐々に放出されていき、やがては、当初の電流値まで回復していく。以上が世上流布している電流コラプスの大まかな推定原因であるが、実のところ、本当に電子捕獲が原因なのか、どこに捕獲されているのか等は、未解明である。各社・各研究機関とも、SiN 保護膜の膜質や成膜条件、SiN 成膜前の GaN 表面処理条件を色々変えたり、AlGaN/GaN エピ構造や、電極構造・電極配置を変える等の試みを行い、電流コラプス特性を改善してきた。ただし、いずれも、対症療法に過ぎないために根本的な解決には至っていない。このような試行錯誤的なアプローチでは膨大な実験回数を要し、GaN/Si 界面状態に関しても科学的知見は得られない。

(DC 電圧印加オペランド顕微 X 線分光を用いた我々の先駆的な成果)

学理に基づくデバイス開発を目指して、東北大学・東京大学放射光連携機構・住友電工は、NEDO 産学連携プロジェクトや基盤研究(S)等による支援を受け、放射光を用いたグラフェン及び GaN-HEMT の共同研究を行っている [1, 2]。3D nano-ESCA により、GaN-HEMT にバイアスを印加した状態で、GaN 表面の化学結合状態や、Ga 束縛エネルギーの局所の変化を捉えることに成功している。GaN-HEMT に高電圧ストレスを印加したところ、ゲート電極近傍で、Ga 束縛エネルギーが低い領域(電子ポテンシャルが高い領域)が形成されていることを突き止めた。これは、前述の電流コラプスのメカニズムとして提唱されてきた仮想ゲート形成の初めての分光学的直接観察である。

(残された課題)

但し、これまでのオペランド顕微 X 線分光には、二つの問題点があった；

- ①主に軟 X 線を用いていたため、表面の観察に限られていた
- ②主に DC 電圧下で、時間変化の追跡は出来ていなかった

(研究目的)

BL47 に設置されている、マイクロビーム X 線利用・時間分解可能である硬 X 線光電子分光装置を用いて、表面及び埋もれた AlGaIn/GaN 界面二次元電子系の電子状態の時空間的観察を行い、GaN-HEMT の高速化・高信頼性化の設計指針を得る。

実験：

(試料名) AlGaIn/GaN 界面二次元電子系を電子輸送層とする GaN-HEMT

(放射光利用条件) セベラルバンチモード(Dモード)を用い、JASRI の大沢博士が設置した X 線チョッパーにより所望の X 線パルスを切り出す。

(使用装置) BL47 に設置されている硬 X 線光電子分光装置

(X 線集光) 1 ミクロン幅にまで X 線を KB ミラーにより集光

結果および考察：

(実験系の構築)

大沢博士が設置した X 線チョッパーを用いて切出された放射光パルスを、GaN-HEMT に印加させたパルス電圧と同期させた。この同期の様子をオシロスコープで確認した。その結果を図 1 に示す。図 1 から分かるように、放射光パルスと GaN-HEMT への印加電圧パルスの同期が上手く取れていたことが分かる。

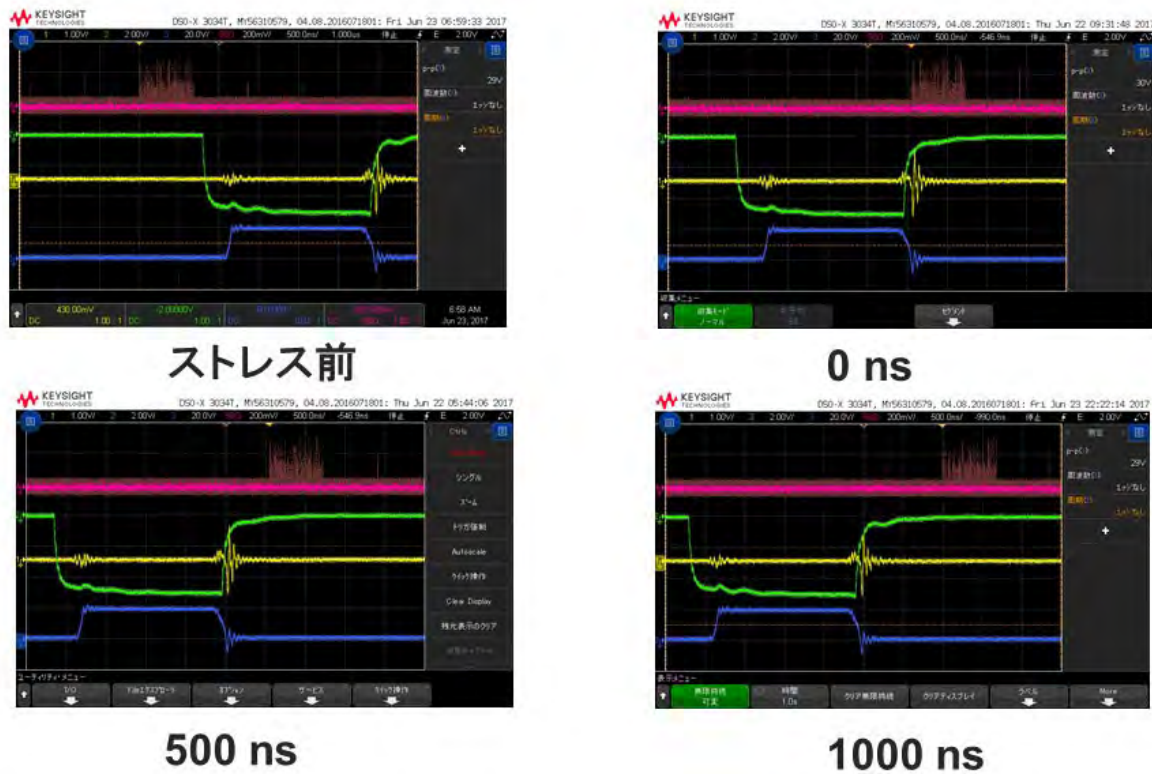


図 1. 放射光パルスと印加電圧パルスの同期の様子

(時空間分解スペクトルの取得)

図 2 に典型的な角度積分 Ga2p のプローブのタイミング依存性を示す。

この図から、分かるように、電圧印加前、電圧印加後でスペクトルの半値幅や形状が大きく変化していることが明らかとなった。この変化は、電圧印加による深さ方向のバンド湾曲の変化に起因するものと考えられる。すなわち、表面近傍のバンド湾曲が元々 GaN/AlGaIn 界面にあった二次元電子を表面準位が捕獲したことに起因することを考えると、電圧印加により表面準位に捕獲された電子が、電圧印加を切った後に放電していく過程のダイナミクスがスペクトル形状の変化の様子を今回の実験において追跡出来たと結論される。同様の傾

向が、表面 GaN 層の下の AlGaN に由来する Al1s スペクトルにおいても観察されている。

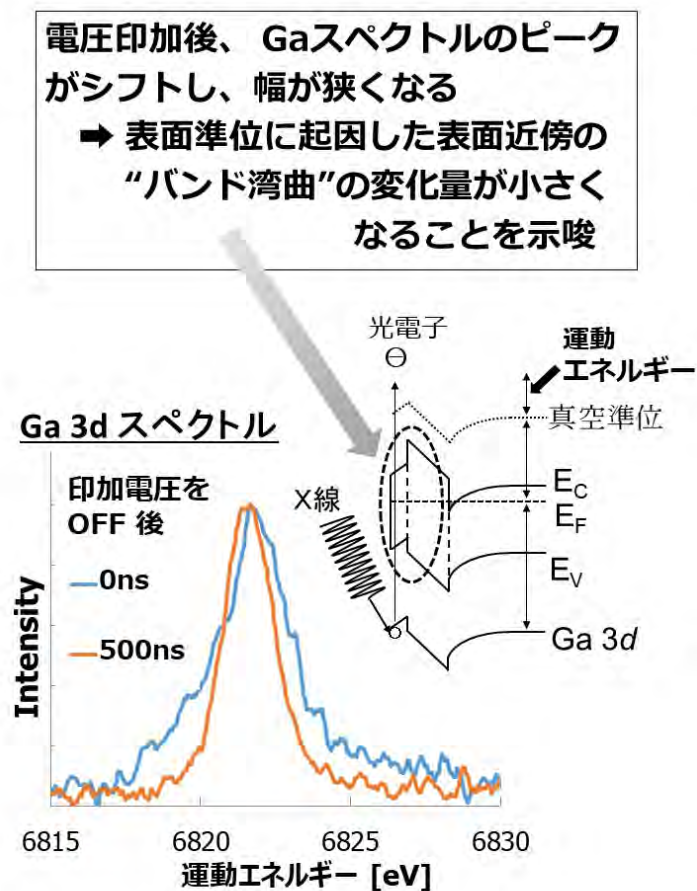


図 2. 取得した(角度積分)時空間分解硬 X 線光電子スペクトルの例

今後の課題：

深さ分解スペクトルについても詳細な解析を行い、GaN-HEMT の電流コラプス現象をもたらす表面界面でのキャリア・ダイナミクスを解明し、以て、GaN-HEMT の高信頼性技術につなげる所存である。

参考文献：

- [1] H. Fukidome et al. *Sci. Rep.* 4(2014) 3173.
- [2] H. Fukidome et al. *APEX*(2014) 065101.