

## HAXPES による GaN-HEMT のバンド構造解析 The Energy Band Structure Analysis for GaN-HEMT by HAXPES

舘野 泰範<sup>a)</sup>, 米村 卓巳<sup>a)</sup>, 駒谷 務<sup>b)</sup>, 河内 剛志<sup>a)</sup>, 市川 弘之<sup>a)</sup>, 由比 圭一<sup>a)</sup>, 吹留 博一<sup>c)</sup>  
Yasunori Tateno<sup>a)</sup>, Takumi Yonemura<sup>a)</sup>, Tsutomu Komatani<sup>a)</sup>, Tsuyoshi Kochi<sup>a)</sup>,  
Hiroyuki Ichikawa<sup>a)</sup>, Keiichi Yui<sup>a)</sup>, and Hirokazu Fukidome<sup>b)</sup>

<sup>a)</sup>住友電気工業株式会社, <sup>b)</sup>住友電工デバイスイノベーション, <sup>c)</sup>国立大学法人東北大学

<sup>a)</sup>Sumitomo Electric Industries, Ltd., <sup>b)</sup>Sumitomo Electric Device Innovations, Inc. <sup>c)</sup>Tohoku University

GaN-HEMT エピタキシャルウェーハ上に SiN 膜を堆積し, その後, RIE で SiN 膜をエッチングしたサンプルの化学状態, および GaN-HEMT のエネルギーバンドの変化に関して, 硬 X 線光電子分光(HAXPES)による分析を行った. 分析試料は, RIE エッチングを施した後に, 最上部にチャージアップ防止とエネルギー校正のための Au を約 5 nm 蒸着によって形成している.

光電子取り出し角(TOA)を変えて分析試料の Ga2p, Al1s スペクトルを取得し, 深さ方向のエネルギーバンド構造を求めた. その結果, 何も処理を施していないリファレンスサンプルと比べて, RIE エッチングを施したサンプルは AlGaIn 供給層のエネルギーバンドの傾きが緩やかで, 2次元電子ガス層(two dimensional electron gas layer; 2DEG)近傍の電子ポテンシャルが高くなっていることが分かった.

**キーワード:** GaN-HEMT, エネルギーバンドプロファイル, 硬 X 線光電子分光

### 背景と研究目的:

マイクロ波帯通信用の高出力窒化ガリウムトランジスタ(GaN-HEMT)は, 現在, L 帯~Ka 帯(数百 MHz~40GHz)までの各種周波数帯対応の高出力トランジスタが製品化されているが, 今後は, さらなる高出力化, 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が, 特に GaN-HEMT 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.

我々は 2010A 期, 2010B 期において, 硬 X 線光電子分光(HAXPES)を用いて, GaN 表面状態を意図的に変えた試料を測定した[1, 2]. その結果, SiN 成膜前に GaN 表面に酸素プラズマ処理を施したサンプルにおいて, GaN 表面に存在する Ga 酸化層(Ga-O)が高温熱処理によって金属状 Ga(Ga-Ga 結合)に変化していくこと, また, そのような構造のデバイスでは電流コラプス特性が改善されていることなど, 多くの興味深いデータを得ることができた.

また住友電工と東北大学, 東京大学の共同で, 2015A 期, 2015B 期において BL07 を利用した nano-ESCA 評価を実施し, SiN を RIE でエッチングした表面では, Ga2p の束縛エネルギーが変化していること, および, 束縛エネルギーの変化は, SiN の開口長さに依存すること, さらに RIE 条件を変えると束縛エネルギーシフト量が変化し, そのシフト量が小さいものほど電流コラプス特性が改善されることを見いだした.

以上の実験によって, SiN 成膜前の GaN 表面処理や, SiN エッチング条件を変えるなどで, GaN 表面状態が変化すると, それに伴い GaN-HEMT の電流コラプス特性が変化することが確認できた. ところが, 最近の実験において, SiN 成膜前処理や SiN エッチング条件が同じにもかかわらず, GaN キャップ層の厚さが異なるサンプルでは, 電流コラプス特性が異なることが分かってきた. これは, SiN エッチング時のダメージが, GaN キャップ層だけでなく, AlGaIn 供給層まで達していることによるものと推定している.

そこで, 今回の実験では, BL46XU の硬 X 線光電子分光を用い, 深さ方向のエネルギーバンド構造の変化や, GaN キャップ層/AlGaIn 供給層界面の化学結合状態に着目した評価を行った. X線エネルギーは 8 keV とし, 光電子取り出し角(TOA)を 80°, 30°, 15°と 3 水準変えた測定を実施した.

### 実験：

評価サンプルは、図 1 に示す通り、基板の上に GaN-HEMT エピを成長したものを用意し、まず GaN-cap 層上に SiN を形成し、それを RIE にて全面エッチング処理を施した。

別途、GaN-HEMT エピに SiN 成膜やエッチングなどのプロセス処理を何も施していないサンプルをリファレンスとして準備した。

両者とも、最上部には、エネルギー補正のため 5 nm 厚の Au を形成している。

取得した光電子スペクトルは Ga2p、Al1s、N1s、Si1s、Au4f(エネルギー補正のため)であり、それぞれ S/N を改善するために複数回(3~20 回)のデータ蓄積を行った。

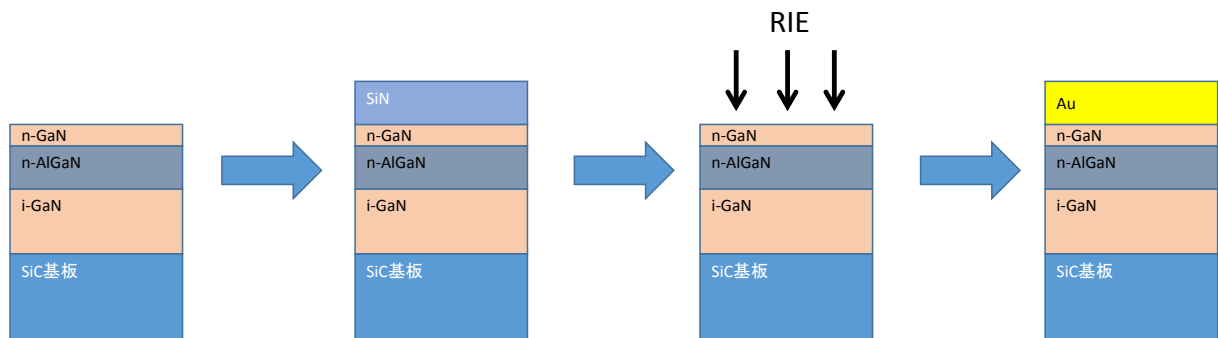


図 1. 評価サンプルの形成手順模式図

### 結果および考察：

図 2 に TOA=30° の場合の Ga2p スペクトルを示す。何も処理を施していないリファレンス品(As Epi 品)と比べて、RIE エッチングを施したサンプルは低束縛エネルギー側に広がったスペクトルとなっていることが分かる。

この違いを詳細に分析するため、取得した光電子スペクトルから、深さ方向の GaN-HEMT のバンド構造を計算によって推定することを試みた。これは、図 3 に示す通り、例えば表面から z の深さの点から発生した光電子が、取り出し角  $\theta$  で検出される場合、最表面からの光電子強度と比べて  $\exp(-z/L_0 \sin\theta)$  の関係で減衰することを利用して、深さ方向に積分した計算値を実測データにフィッティングすることで、バンドプロファイルを導出している。なお、ここで  $L_0$  は GaN 中の光電子の平均自由行程を表している。

また、計算に当たっては、光電子強度スペクトルを定められた関数形にフィッティングしなければならないが、本研究では、下記の擬 Voigt 関数を用いている。

$$f(E) = B + A \left[ (1-m) \frac{\sqrt{4 \ln 2}}{\sqrt{\pi} w_G} e^{-\frac{4 \ln 2}{w_G^2} \{E - E_b(z)\}^2} + m \frac{2}{\pi} \frac{w_L}{4 \{E - E_c(z)\}^2 + w_L^2} \right]$$

ここで  $E_b(z)$  は求めるべき深さ方向の束縛エネルギーの変化を表す。  
また、平均自由行程の計算は下記の TTT-2M モデル[3]を用いた。

$$L_0 = \frac{E}{E_p^2 [\beta \ln(yE) C/E + (D/E)^2]}$$

$$\beta = 0.1 + \frac{0.944}{E_p^2 + E_g^2} + 0.069\rho^{0.1}$$

$$y = 0.191\rho^{0.50}$$

$$C = 1.97 - 0.91U$$

$$D = 53.4 - 20.8U$$

$$U = \frac{N_v\rho}{M}$$

$$E_p = 28.8 \frac{N_v\rho}{M}^{1/2}$$

ここで、 $N_v$  は価電子数、 $\rho$  は密度、 $M$  は質量、 $E_g$  はバンドギャップを表す。

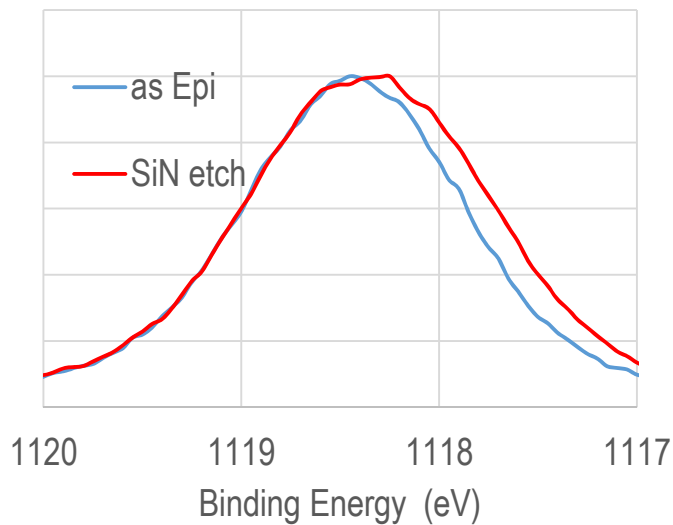


図 2. Ga2p スペクトル

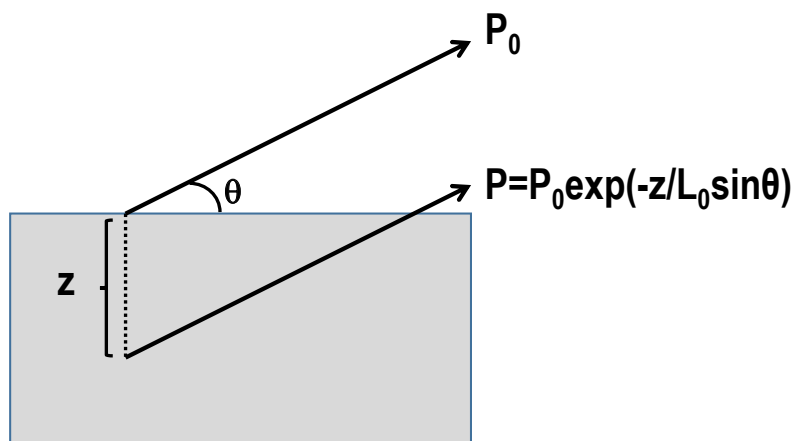


図 3. 深さ  $z$  の点からの光電子の減衰.  $\theta$  は光電子取り出し角、 $L_0$  は平均自由行程. 試料表面からの光電子強度を  $P_0$  とすると、深さ  $z$  の点からの光電子強度は、取り出し角  $\theta$  の場合、 $P = P_0 \exp(-z/L_0 \sin \theta)$  となる。

図 4 に、得られたバンドプロファイルを示す。

何も処理を施していない as epi 品に比べて、RIE 処理を施したものは AlGaIn 供給層のバンドの傾きが緩やかで、2DEG 近傍のポテンシャルが高くなっていることが分かる。

これは、RIE エッチングの影響が AlGaIn 層までおよんでいることを示しているものと考えられる。

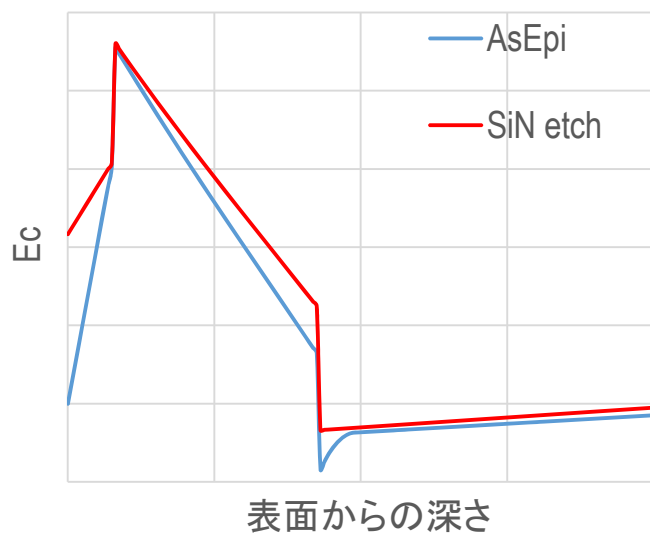


図 4. GaN-HEMT の深さ方向のエネルギーバンド図

**まとめと今後の課題：**

今回、SiN を RIE で除去したサンプルで、深さ方向のエネルギーバンドが変化すること、とくに AlGaN 供給層のバンドの傾きが緩やかになることを確認した。

今後、RIE 条件を変えたサンプルでのエネルギーバンドの変化を検討したい。

**参考文献：**

- [1] 舘野, Spring-8 産業利用課題実施報告書 2010A1733.
- [2] 舘野, Spring-8 産業利用課題実施報告書 2010B1847.
- [3] Tanuma, et. al., *Surface and Interface Analysis*, vol. 35, pp.268, (2003).