

## HAXPES によるポテンシャルプロファイル導出における 電子・正孔対発生の影響の研究 The Investigation of Electron-Hole Generation Effect on Extraction of Potential Profile by HAXPES

館野 泰範, 米村 卓巳, 久保 優吾, 斎藤 吉広  
Yasunori Tateno, Takumi Yonemura, Yugo Kubo, Yoshihoro Saito

住友電気工業株式会社  
Sumitomo Electric Industries, Ltd.

GaN エピタキシャルウェーハの硬 X 線光電子分光測定において、高輝度の放射光 X 線入射によって発生した電子・正孔対の影響で、束縛エネルギーの測定値やエピ層の深さ方向のポテンシャルプロファイルが変化するかを調査した。その結果、n-GaN 単層エピの場合、ポテンシャルプロファイルにヘテロ界面がないため、生成した電子・正孔対は蓄積することがなく、束縛エネルギーの測定値も変化しないことが確認された。一方、複数のヘテロ界面が存在する AlGaIn/GaN エピの場合、それぞれの界面に電子や正孔が蓄積するため、入射 X 線強度を変えると束縛エネルギーがわずかに変化することが明らかとなった。

**キーワード：** GaN、エネルギーバンドプロファイル、硬 X 線光電子分光、電子正孔対生成

### 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) では、現在 L 帯～Ka 帯 (数百 MHz～40GHz) までの各周波数帯対応のものが製品化されているが、今後より高い周波数において更なる高出力化・高利得化・高効率化・低歪み化が必要となる。動作周波数が高くなるに従い、トランジスタのゲート長と電極間隔は微細化され、エピタキシャルウェーハの各層は薄層化と高ドーピング濃度化が進み、AlGaIn 層の Al 混晶比は高くなると予想される。これらは局所的な電界集中をもたらすため、デバイスの長期信頼性の確保が益々重要となってくる。この課題を解決するためには、トランジスタ動作について更に深い理解が不可欠である。

我々は 2010A～2010B 期に、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]。当社の GaN-HEMT 製造では、エピ表面に窒化ケイ素 (SiN) 保護膜を堆積し、それを部分的に反応性イオンエッチング (RIE) で除去するというプロセスを採用している。まず SiN 堆積前に GaN 表面に酸素プラズマ処理を施したサンプルでは、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、そのようなプロセスでは「電流コラプス」と呼ばれる特性が改善されていることなど、多くの興味深い知見を得ることができた。

また 2015A～2015B 期には、BL07 にて nano-ESCA による分析を実施し、SiN 膜を RIE でエッチングした GaN 表面では、Ga2p 束縛エネルギーが変化していること、束縛エネルギー変化は SiN 開口長に依存すること、さらに、RIE 条件を変えると束縛エネルギーのシフト量も変化し、シフト量が小さいほど電流コラプス特性が改善されることを見いだした。

さらに 2016B 期には、HAXPES を活用した AlGaIn/GaN-HEMT エピのポテンシャルプロファイル (深さ方向のバンド構造) の評価を試みた。先に述べた SiN 膜の除去プロセスでは RIE によるチャンネル内の電子濃度の減少が確認されており、RIE のダメージによる AlGaIn/GaN 界面のピエゾ分極電荷の減少と推定されていた。HAXPES 分析では、これに対応すると考えられる GaN-HEMT エピの深さ方向のポテンシャルの傾きの変化を検出することができた[3]。また、別途実施したデバイスシミュレーションでも、ゲート電極近傍の局所的ピエゾ電荷減少が起こっていること、電流飽和が始まるドレイン電圧領域におけるドレイン電流の落ち込み (すなわち電流コラプスの悪化) が引き起こされることを確認している。

以上の結果は、GaN-HEMT 製造の各工程でエピウェーハが受けるダメージに関し、HAXPES で定

量評価が可能であることを示唆しており、他のデバイス(GaAs、InP、あるいは、グラフェンをチャネル材料に用いたトランジスタ)の動作解析でも威力を発揮すると期待される。

しかし、上記の HAXPES によるポテンシャルプロファイル評価法では、高輝度の放射光が試料に長時間照射されることで、半導体内部で、電子・正孔の対生成が引き起こされ、それによる電荷の空間分布が変化し、ポテンシャルを变形させてしまうことが懸念されていた。この点について検証するため、本課題では BL46XU の HAXPES を用い、入射 X 線の強度(フォトンフラックス)を多段階変化させ、各入射強度において Ga2p などの束縛エネルギーの変化を求める実験を行った。

#### 実験：

評価用サンプルとして、図 1 (a)に示すように SiC 基板上に AlGaN/GaN をエピ成長させ、更にチャージアップ抑制のために 5 nm 厚の Au を堆積したものを用意した(サンプル#1)。図 1 (b)には、想定される深さ方向のバンド図を模式的に示してある。同サンプルは 2 つのヘテロエピ界面を有しており、X 線照射で発生した電子・正孔がこれら界面に蓄積する可能性が考えられる。また、比較のために、図 1 (c)に示すように、ヘテロ界面を持たない n-GaN エピのサンプルも用意した(サンプル#2)。

半導体への X 線入射による電子・正孔の対生成と蓄積は下記のような過程となる[4]。

- ① 入射 X 線の光電吸収やコンプトン散乱による二次電子・散乱 X 線の生成
- ② 二次電子のなだれ増倍による多数の電子・正孔対の生成
- ③ 結晶内電界による電子・正孔それぞれの輸送と蓄積

- ① の過程で生成される電子濃度は、入射 X 線の輝度に比例すると考えられる。そこで本実験では、入射側へのアッテネータ挿入により X 線強度を変化させた。具体的には、アッテネータなしにおける強度を 100%として、50、25、12.5%の合計 4 段階で測定を実施した。入射 X 線エネルギーは 8 keV とし、Ga2p、Al1s、N1s、Si1s、Au4f の光電子スペクトルを、80°、30°、15° の 3 水準の取り出し角(TOA)で測定している。各スペクトルで充分な S/N 比を得るため、スイープ回数は 3~20 回としている。

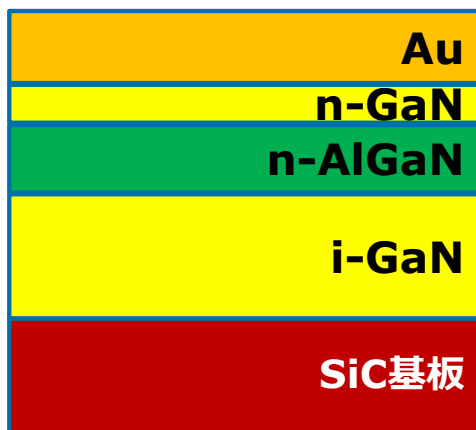


図 1 (a). サンプル#1 のエピ構造

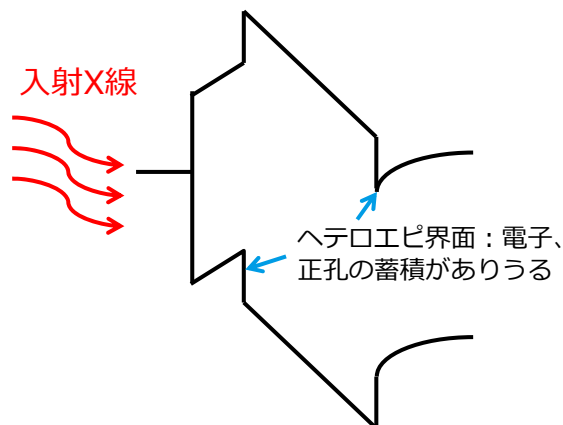


図 1 (b). サンプル#1 の深さ方向のエネルギーバンドの模式図

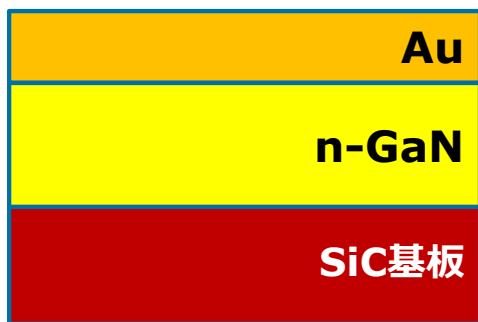


図 1 (c). サンプル# 2 のエピ構造

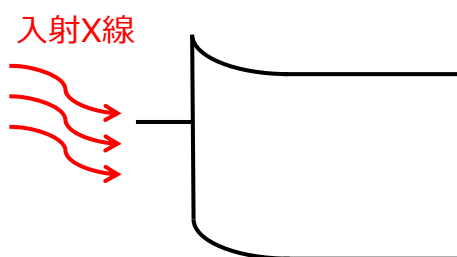


図 1 (d). サンプル# 2 の深さ方向のエネルギーバンド模式図

### 結果および考察：

図 2 に、実測のスペクトルから得られた Ga2p の束縛エネルギーを、入射 X 線の強度に対してプロットしたものを示す。#1 のサンプルでは、入射 X 線強度の増大に伴い、束縛エネルギーが大きくなっていることが分かる。これは、X 線入射で生成した電子やホールがヘテロ界面に蓄積し、ポテンシャルプロファイルを変化させたことを示すものと考えられる。

一方、#2 のサンプルでは、TOA=30° と 80° では Ga2p 束縛エネルギーの入射 X 線強度依存が見られないが、TOA=15° においては入射強度によって束縛エネルギーの変化が認められる。この原因については現在考察中であるが、例えば n-GaN エピ表面に自然酸化膜が形成されており、GaN 最表面に正孔が蓄積されるなどの可能性が考えられる。

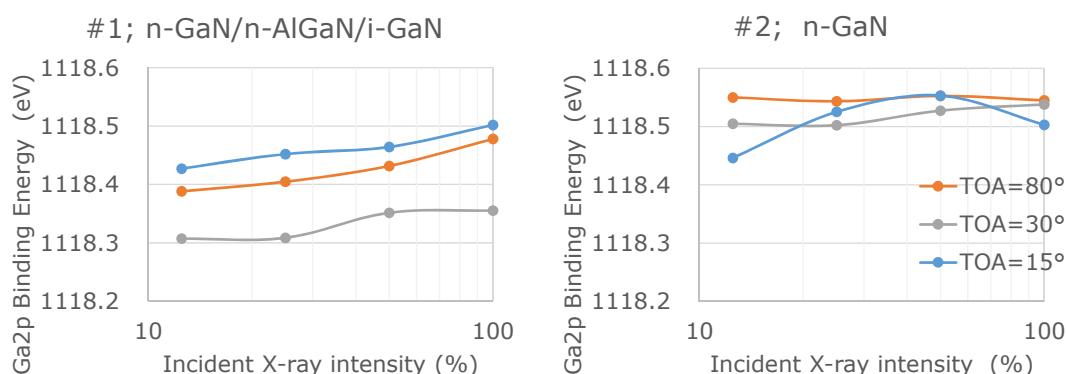


図 2. Ga2p 束縛エネルギーの入射 X 線強度依存

次に、デバイスシミュレーションを用いて、AlGaIn/GaN ヘテロ界面(最上層の GaN と AlGaIn 障壁層の界面 A、AlGaIn 層と i-GaN 層との界面 B)に電子や正孔が蓄積した場合に、バンドポテンシャルがどの程度変化するかを求めた。界面 A には正孔、界面 B には電子が蓄積するものとし、それぞれの濃度は等しいとした。

図 3 に、シミュレーションによって求めた伝導帯底 ( $E_c$ ) の変化を示す。このグラフでは、蓄積濃度を  $1 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$ 、 $2 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$ 、 $5 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$  としている。濃度が高くなるほど、特に界面 A でポテンシャルが低く変化していくことが分かる。

図 4 には、界面 A の AlGaIn ポテンシャルの蓄積濃度依存を示す。横軸は蓄積キャリア濃度  $N_{gen}$  であり、その蓄積濃度が高くなるとともに単調に AlGaIn ポテンシャルが低下していくことが分かる。この結果から、ポテンシャルの変化は  $\Delta E = -8.3 \times 10^{-14} N_{gen} (\text{eV})$  と求めた。図 2 より、入射 X 線強度が 10% の場合と 100% の場合とで、0.1 eV 程度、束縛エネルギーが低下している。このエネルギー変化に相当する蓄積キャリア濃度は  $1.2 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$  である。

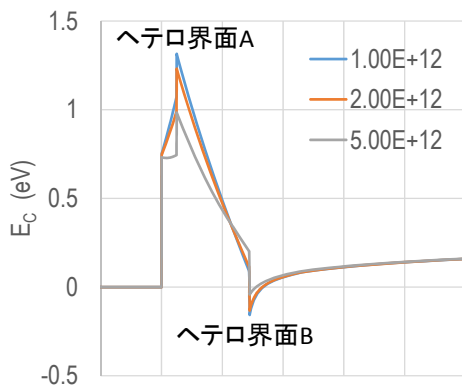


図3. 電子・正孔の蓄積による  $E_c$  の変化

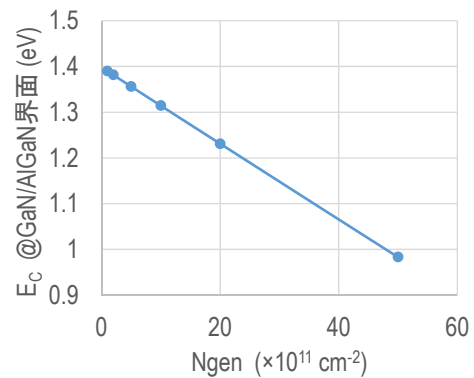


図4.  $E_c$  変化量の蓄積キャリア濃度依存

### まとめと今後の課題：

入射 X 線強度を変えた HAXPES 測定により、AlGaIn/GaN エピ内の Ga2p 束縛エネルギーの変化を調査した。その結果、0.1 eV 程度の束縛エネルギーの変化が確認された。これはヘテロ界面での電子や正孔の蓄積によるものと考えられる。ただし、その変化は最大で 0.1 eV であることから、HAXPES などの評価結果に与える影響は小さいと判断できる。

別途実施したデバイスシミュレーションの結果から、対応する蓄積濃度は  $10^{12} \text{ cm}^{-2}$  と推定される。GaN-HEMT の 2DEG キャリア濃度が  $10^{13} \text{ cm}^{-2}$  程度であることから、ヘテロ界面へ蓄積される濃度はその 10%程度と想定され、これは HEMT の電気的特性に対しては、無視できない程度の影響をもつものと考えられる。ただし、電子・正孔が蓄積するヘテロ界面を有しないサンプルでは、影響はないと判断できる。

今後、HAXPES データからバンドプロファイルを求める詳細な解析をすすめる予定である。

### 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] 舘野、Spring-8 産業利用課題実施報告書 2016B1629
- [4] 伊藤、谷田、放射光 Vol.21, No.4, p.221 (2008)