



# 軟 X 線光電子分光による Si 基板上窒化物半導体と絶縁体との界面における電子状態解析

久保俊晴、西野剛介、江川孝志  
名古屋工業大学

## 1. 測定実施日

2015 年 10 月 29 日 10 時 – 18 時 30 分 (2 シフト), BL6N1  
 2015 年 11 月 18 日 10 時 – 18 時 30 分 (2 シフト), BL6N1  
 2015 年 1 月 14 日 10 時 – 18 時 30 分 (2 シフト), BL6N1  
 2015 年 1 月 29 日 10 時 – 18 時 30 分 (2 シフト), BL6N1

## 2. 概要

大口径化が可能な Si 基板上の GaN 系トランジスタは、次世代半導体パワーデバイスとして期待されている。この GaN-on-Si トランジスタでは、ゲートリーク電流が大きいこと、ノーマリオフ（ゲート電圧が 0 V 時にソース・ドレイン間に電流が流れない）化が実用化に向けた大きな課題である。これらの課題を克服するためには、ゲート電極部分に絶縁膜を挟んだ金属/絶縁体/半導体(MIS)構造を用いることが有効であり、2015 年度前期の実験では、絶縁膜として  $\text{Al}_2\text{O}_3$  膜を採用した際の  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{AlGaIn}$  界面の化学状態を軟 X 線光電子分光(soft XPS)により評価した。2015 年度後期の実験では MIS 構造に用いる絶縁膜として  $\text{HfO}_2$  に着目した(Fig. 1 参照)。

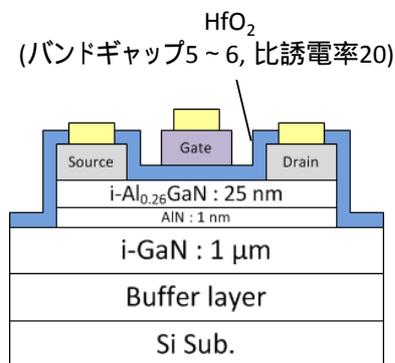


Fig.1  $\text{HfO}_2/\text{AlGaIn}/\text{GaN}$  HEMT の模式図

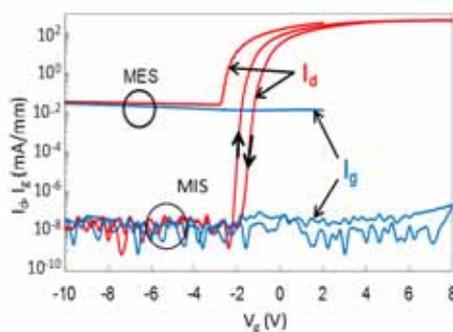


Fig.2 MIS-HEMT の伝達特性

HfO<sub>2</sub> を用いた場合、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> を用いたデバイスよりも初期閾値電圧シフトが低減するが、Fig.2 に示したように伝達特性にヒステリシスも見られており、デバイス特性の改善のためには、ポストアニール(Post-deposition annealing: PDA)による膜質向上が必要である<sup>1)</sup>。

本課題では、前期の実験と同様に PDA が HfO<sub>2</sub>/AlGa<sub>0.5</sub>N 界面の化学状態に与える影響を明らかにする。放射光を用いた XPS により、表面から 5 nm 程度の深い場所にある界面の化学状態の評価を行った。

### 3. 背景と研究目的

GaN 系トランジスタとして、現在 AlGa<sub>0.5</sub>N/GaN 高移動度トランジスタ (High-electron-mobility transistor: HEMT) デバイスが注目され、多くの研究が行われている。そこで本研究では、一般的な光電子分光では得られない、5 nm 厚の HfO<sub>2</sub> 膜と AlGa<sub>0.5</sub>N 界面の化学状態について、PDA 温度との関係を調べる。HfO<sub>2</sub> はバンドギャップが 5~6 eV、比誘電率が約 20 と共に高く、絶縁膜として有望な材料である<sup>2)</sup>。放射光を用いた XPS 測定を行い、埋もれた HfO<sub>2</sub>/AlGa<sub>0.5</sub>N 界面の化学結合状態を調べ、良好なデバイス動作の鍵となる界面の化学状態と PDA 温度との関係を明らかにする。

### 4. 実験内容

測定として、ビームライン BL6N1 を使い、Si 基板上の AlGa<sub>0.5</sub>N/GaN 表面上に成膜温度 250 °C で堆積した膜厚 5 nm の HfO<sub>2</sub> 膜について、2 keV および 3 keV の X 線エネルギーにより XPS スペクトルを取得し、HfO<sub>2</sub>/AlGa<sub>0.5</sub>N 界面近傍の状態を調べた。PDA 温度は 400, 600 °C とした。比較のため、PDA 無しの As-depo. の試料についても測定を行った。

### 5. 結果および考察

Ga 2p<sub>3/2</sub> および Hf 3d<sub>5/2</sub> の XPS スペクトルの PDA 温度依存性をそれぞれ Fig. 3、Fig. 4 および Fig. 5、Fig. 6 に示す。XPS スペクトルの補正は C 1s スペクトルのピーク位置を 285 eV として行った。また、図中の模式図は HfO<sub>2</sub>/AlGa<sub>0.5</sub>N 界面付近における酸素の移動と PDA との関係を示したものであ

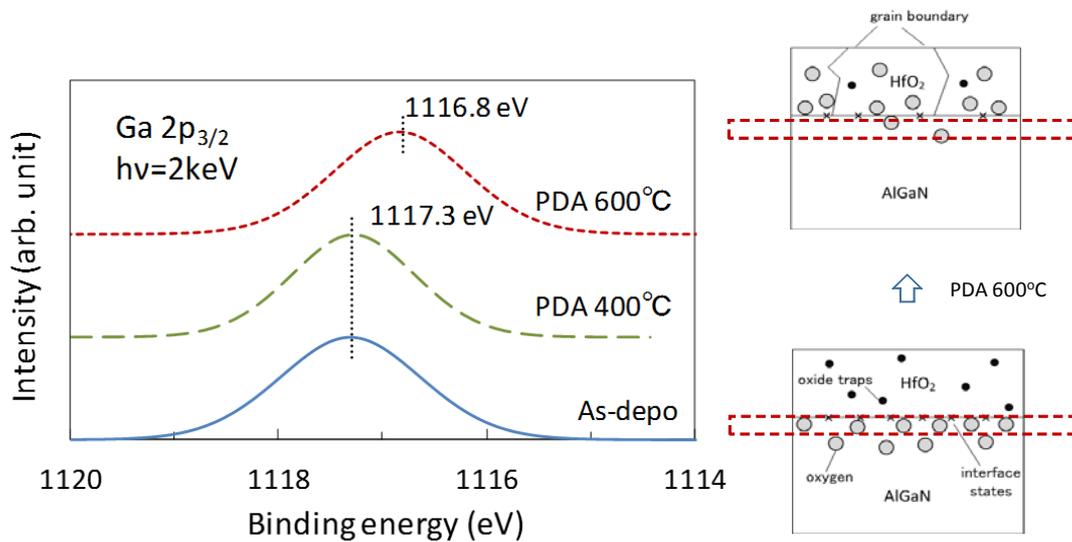


Fig.3 Ga 2p<sub>3/2</sub> スペクトルの PDA 温度依存性 ( $h\nu = 2\text{keV}$ ).

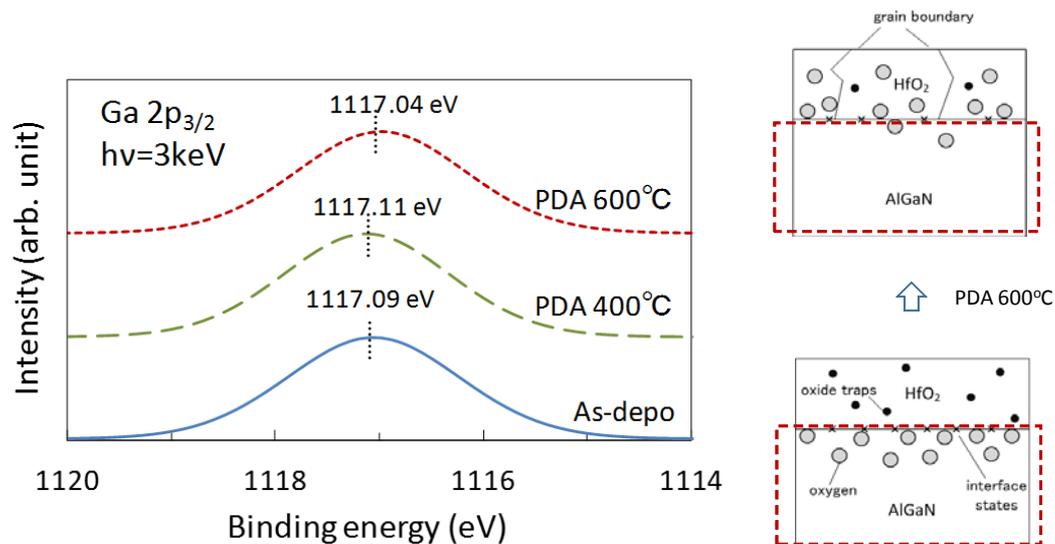


Fig.4 Ga 2p<sub>3/2</sub> スペクトルの PDA 温度依存性 ( $h\nu = 3\text{keV}$ ).

る。Ga 原子は AlGaN 層にのみ存在するため、まず Ga 2p<sub>3/2</sub> スペクトルに着目すると、As-depo.のピーク位置が  $h\nu = 3\text{keV}$  の場合は 1117.1 eV、 $h\nu = 2\text{keV}$  の場合は 1117.3 eV と 2 keV の場合に若干高エネルギー側にシフトしていることが分かる。これは Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> の場合と同様の結果であり、成膜時に AlGaN 表面は若干酸化していることが考えられる。次に PDA400 °C の場合では、Fig. 3 および Fig. 4 に示したようにピーク位置が As-depo. とほぼ等しいことから、

PDA400 °Cでは界面および AlGaN 内部での Ga と O の結合状態はそれほど変化しないことが考えられる。PDA600 °Cの場合では、Fig. 3 の  $h\nu = 2 \text{ keV}$  の場合にピーク位置が低エネルギー側にシフトしていることから、Ga と O の結合が少なくなったことが考えられる。一方、Fig. 4 の  $h\nu = 3 \text{ keV}$  の場合にはピーク位置がほとんど変化しないことから、AlGaN 内部では Ga と O の結合はそれ程変化していないことが分かる。

次に、Hf  $3d_{5/2}$  スペクトルでは、 $h\nu = 2 \text{ keV}$  の場合は主に  $\text{HfO}_2$  膜表面の情報を、 $h\nu = 3 \text{ keV}$  では  $\text{HfO}_2/\text{AlGaN}$  界面まで含めた情報を示していると考えられるが、Fig. 5 に示したように PDA400 °Cにおいて  $h\nu = 2 \text{ keV}$  でのピーク位置は低エネルギー側へシフトしており、このことは Hf と O の結合が多くなっていることを示している。一方、 $h\nu = 3 \text{ keV}$  においても Fig. 6 に示したように、ピーク位置が低エネルギー側へシフトしており、これらの結果と  $\text{Ga}2p_{3/2}$  スペクトルの結果から、酸素は表面および界面から  $\text{HfO}_2$  膜へ移動していることが考えられる。さらに PDA600 °Cについては、Fig.5 および Fig.6 より、 $h\nu = 3 \text{ keV}$  ではあまりピーク位置に変化がないのに対し、 $h\nu = 2 \text{ keV}$  ではさらに低エネルギー側へシフトしており、表面からの酸素の取り込みが継続していることが考えられる。以上から、 $\text{HfO}_2$  では 400 °C程度から  $\text{HfO}_2$  表面および  $\text{HfO}_2/\text{AlGaN}$  界面から  $\text{HfO}_2$  膜中へ酸素の移動が起こっており、PDA600 °Cでも移動が継続していることが分かった。

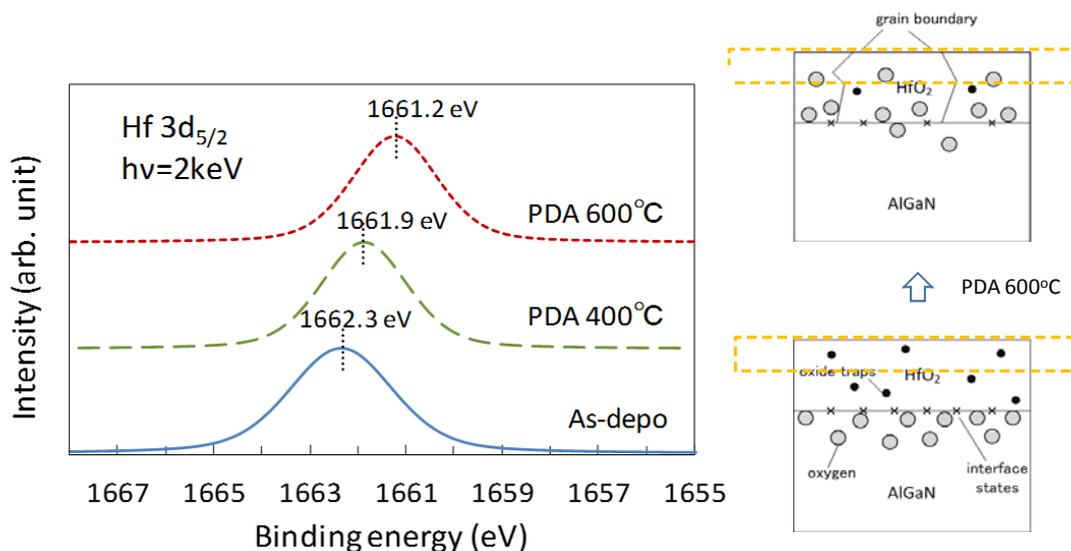


Fig.5 Hf  $3d_{5/2}$  スペクトルの PDA 温度依存性 ( $h\nu = 2 \text{ keV}$ ).

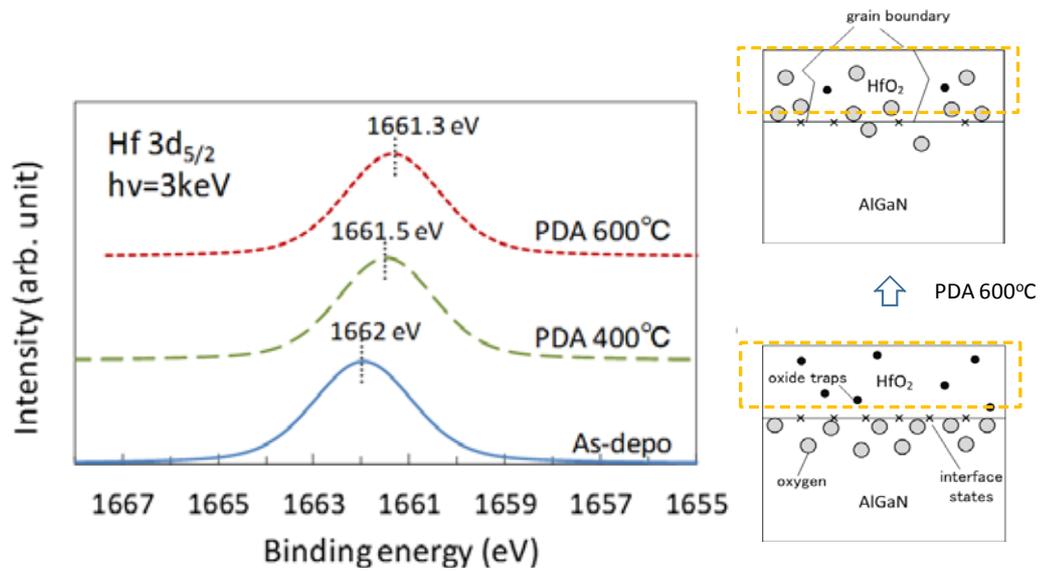


Fig.6 Hf 3d<sub>5/2</sub> スペクトルの PDA 温度依存性 ( $h\nu = 3\text{keV}$ ).

## 6. 今後の課題

今回の実験から、絶縁体として HfO<sub>2</sub> を用いた場合、400 °C 程度においても HfO<sub>2</sub> 膜は酸素を取り込む性質のあることが分かった。HfO<sub>2</sub> はイオン結合性が強いため酸素欠陥が多く生じており、このことが Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 膜と HfO<sub>2</sub> 膜との相違を生み出していることが考えられる。今後の課題として、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 膜、HfO<sub>2</sub> 膜単独では、PDA によっても MIS 構造デバイスの特性改善は限定的であるので、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 膜と HfO<sub>2</sub> 膜を積層した絶縁膜等を検討する必要がある。

## 7. 参考文献

- [1] 西野 他: 第 62 回応用物理学会春季学術講演会, 12p-A21-6.
- [2] C. Mizue, et. al., Jpn. J. Appl. Phys. 50, 021001 (2011).