



## 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及び金属との界面における電子状態解析と絶縁膜の評価解析

Analysis of electronic states and insulator quality at the inter face of insulators (metals) and nitride semiconductors on Si substrates

久保俊晴<sup>1</sup>、吉田雄祐<sup>1</sup>、分島彰男<sup>1</sup>、成田知隆<sup>1</sup>、上村隆一郎<sup>2</sup>  
Toshiharu Kubo<sup>1</sup>, Yusuke Yoshida<sup>1</sup>, Akio Wakejima<sup>1</sup>,  
Tomotaka Narita<sup>1</sup>, Ryuichiro Kamimura<sup>2</sup>

<sup>1</sup>名古屋工業大学、<sup>2</sup>株式会社アルバック  
<sup>1</sup>Nagoya Institute of Technology, <sup>2</sup>ULVAC Inc

### 1. 測定実施日

2014 年 10 月 8 日 10 時 – 18 時 30 分 (2 シフト) , BL8S1  
2014 年 10 月 14 日 10 時 – 18 時 30 分 (2 シフト) , BL6N1  
2014 年 11 月 6 日 10 時 – 18 時 30 分 (2 シフト) , BL6N1  
2015 年 2 月 19 日 10 時 – 18 時 30 分 (2 シフト) , BL6N1  
2015 年 2 月 20 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、次世代超低消費電力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 MIS 構造や MS 接合を基にした構造を用いる 2 つのアプローチが存在する。MIS 構造を用いた際に良好なデバイス動作を実現するためには、電子捕獲準位の少ない半導体/絶縁体界面が必要であり、我々を含め多くのグループで原子層堆積(Atomic layer deposition: ALD)による絶縁膜形成が行われているものの、<sup>1)</sup> 形成温度以上でのポストアニール(Post-deposition annealing: PDA)による膜質向上が

必要となっている。

本課題では、絶縁膜堆積のデバイスプロセス、特に PDA が窒化物半導体/絶縁膜界面の電子状態に与える影響を明らかにする。放射光を用いた軟 X 線光電子分光(XPS)により、一般的な光電子分光法では得られない 5nm 程度の深い場所にある界面の結合状態を評価する。また、X 線反射率(XRR)測定により絶縁膜の密度についても評価する。

### 3. 背景と研究目的

GaN 系トランジスタとして、現在 AlGaIn/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、5nm 厚の Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 膜と AlGaIn 界面の結合状態を調べる。Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> はバンドギャップが 6~7 eV、比誘電率が約 9 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 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/AlGaIn 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電子状態を明らかにする。

### 4. 実験内容

ビームライン BL6N1 を用い、Si 基板上の AlGaIn/GaN 表面に堆積した膜厚 5nm の Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 膜について、2keV および 3keV の X 線エネルギーにより XPS スペクトルを取得し、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/AlGaIn 界面近傍の状態を調べた。PDA 温度は 700℃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。また、ビームライン BL8S1 を用い、Si 基板の上に堆積した膜厚 10nm の Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 膜について XRR 測定を行い、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 膜の膜厚および密度について PDA による変化を調べた。測定試料は XPS 測定と同様とした。Fig. 1(a), (b) に測定試料の模式図を示す。

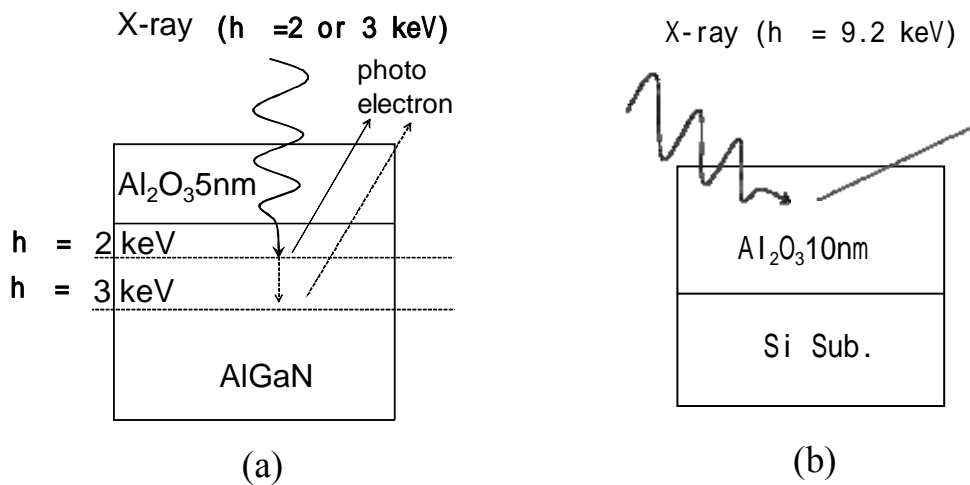


Fig. 1 実験の模式図: (a) XPS 測定 (b) XRR 測定.

## 5. 結果および考察

Ga 2p<sub>3/2</sub>およびAl 1sのXPSスペクトルの測定結果をそれぞれFig. 2(a), (b) および Fig. 2(c), (d)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。Ga 原子は AlGaN 層にのみ存在するため、まず Ga 2p 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 1116.9 eV、 $h\nu = 2 \text{ keV}$  の場合は 1117.1 eV と 2keV の場合に高エネルギー側にシフトしていることが分かる。Fig. 1(a)に示したように  $h\nu = 2 \text{ keV}$  の方が Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/AlGaN 界面近傍の情報を示していると考えられることから、成膜時に AlGaN 表面は酸化していることが考えられる。次に PDA700°C の場合では、Fig. 1(a)に示したように  $h\nu = 2 \text{ keV}$  ではピークの半値幅が As-depo.と比較して増大していることから、PDA により界面での酸化が進んでいることが分かる。また、Fig. 1(b)の  $h\nu = 3\text{keV}$  の場合では、ピーク位置が 1117.0 eV と As-depo.のピーク位置 1116.9 eV よりも若干高エネルギー側にシフトしていることから、内部への酸素の拡散が進んでいるものと考えられる。

また、Al 1s の結果については、 $h\nu = 2 \text{ keV}$  の場合は主に Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 膜の情報を、 $h\nu = 3 \text{ keV}$  では AlGaN 内部まで含めた情報を示していると考えられるが、Fig. 2(c)に示したように  $h\nu = 2 \text{ keV}$  では PDA によりスペクトルの低エネルギー側の強度が減少していることから、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 中の Al-Al 結合が減少し、構造が変化していることが考えられる。さらに、Fig. 2(d)に示した  $h\nu = 3 \text{ keV}$  の結果では、PDA によりピーク位置が高エネルギー側にシフトしていることから、Ga

2p スペクトルの際と同様、AlGaN 内部へ酸素が拡散していることが考えられる。以上の酸素原子の拡散の模式図を Fig. 3 に示す。

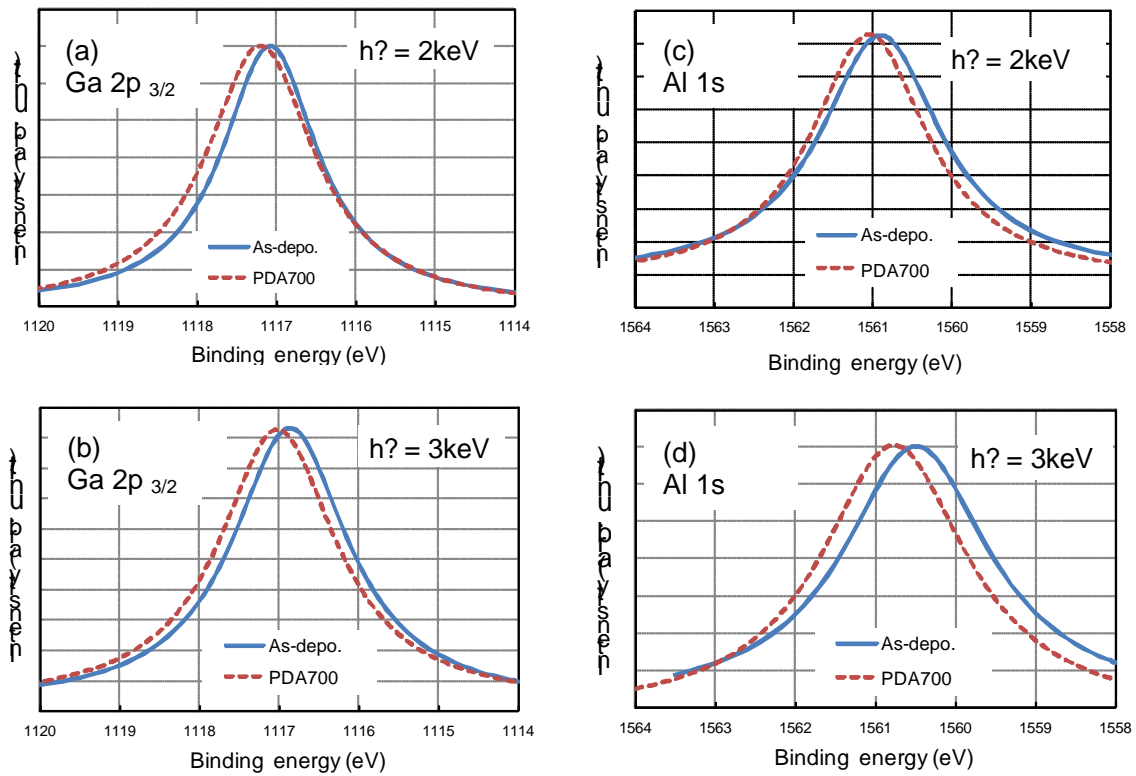


Fig. 2 XPS 内核スペクトル: (a) and (b) Ga 2p<sub>3/2</sub> (c) and (d) Al 1s.

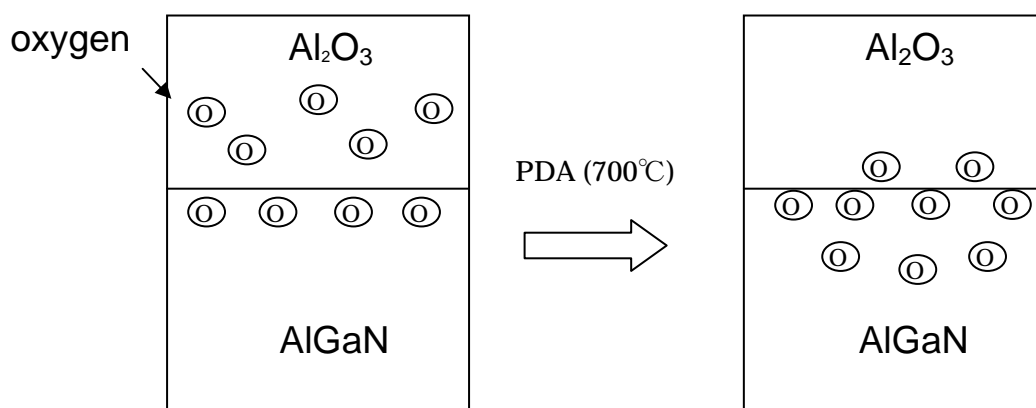
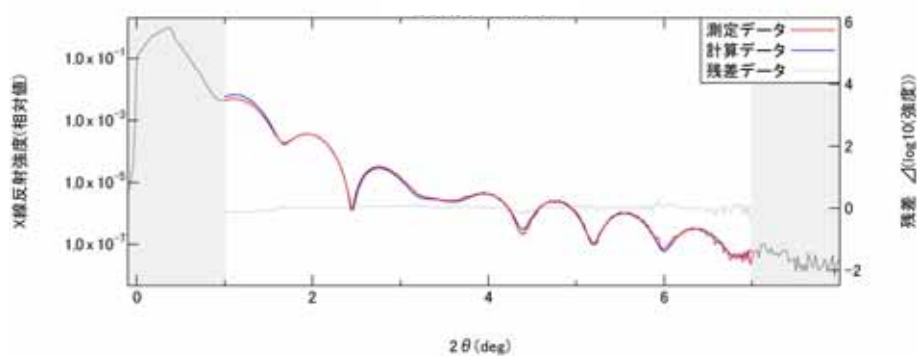
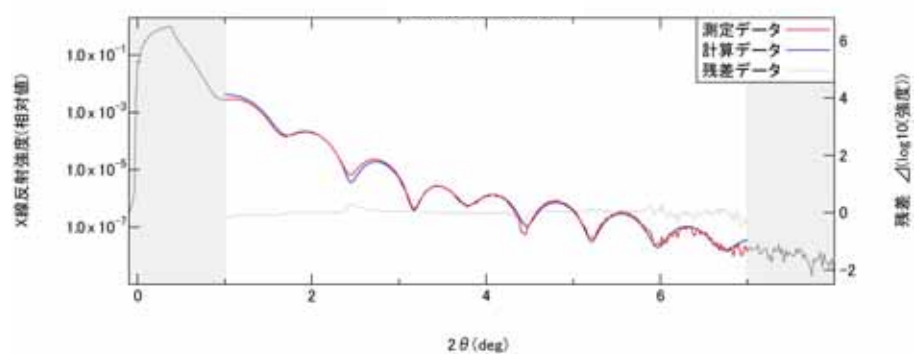


Fig.3 PDA による酸素原子の拡散の模式図.

次に、XRRの測定結果を Fig. 4 に示す。また、測定結果へのフィッティング計算の結果から得られた各層の膜厚と密度の関係を表 1 に示した。フィッティング結果から、Si/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 界面には SiO<sub>2</sub> 層が存在すること、また、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 表面には組成の異なる層が存在することが示唆された。表 1 に赤字で示したように、PDA により、界面近傍の SiO<sub>2</sub> および Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> の密度は増大することが分かった。これは、基板方向への酸素の拡散によるものと考えられ、XPS から得られた PDA による AlGaN 層への酸素の拡散の結果とも一致する傾向である。



(a)



(b)

Fig.4 X線反射率プロファイル: (a) As-depo. (b) PDA700°C.

Table 1 XRR から求めた Si 基板上 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 各層の層厚および密度.

基板からの層番号	物質	厚さ(nm)		密度(g/cm <sup>3</sup> )	
		As-depo.	PDA700°C	As-depo.	PDA700°C
4	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1.12	1.08	1.91	1.80
3	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	8.99	9.08	3.38	2.91
2	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.74	0.30	2.95	3.52
1	SiO <sub>2</sub>	0.14	0.26	0.80	1.3
基板	Si	-----	-----	2.33	2.33

## 6. 今後の課題

本実験から、ALDにより作製した Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 中の酸素原子が 700°C の PDA により基板方向へ拡散していくことが分かった。電氣的測定からは PDA によりデバイスの閾値変動が減少することが見出されており、このことは酸素原子の拡散を伴うような高温の PDA により、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 中の電子のトラップ準位が消滅することを示唆している。しかしながら、700°C 程度の PDA 温度からアモルファスである Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 膜が結晶化し、ゲートリーク電流が増大することが見出されており、<sup>3)</sup> Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 膜中における化学結合の PDA による変化を詳細に調べ、検討する必要があると共に、絶縁膜を 2 層膜とするなどの工夫により、閾値シフトおよびリーク電流を共に減少させることが GaN 系パワーデバイスを普及させるためには必要不可欠である。

## 7. 参考文献

- [1] T. Kubo, et. al., Semicond. Sci. Technol. 29, 045004 (2014).
- [2] C. Mizue, et. al., Jpn. J. Appl. Phys. 50, 021001 (2011).
- [3] 吉田 他: 第 75 回応用物理学会秋季学術講演会, 18p-A22-7.