



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、三好実人、江川孝志
名古屋工業大学

1. 測定実施日

2015 年 5 月 27 日 10 時 – 18 時 30 分 (2 シフト), BL6N1
 2015 年 6 月 19 日 10 時 – 18 時 30 分 (2 シフト), BL6N1
 2015 年 6 月 30 日 10 時 – 18 時 30 分 (2 シフト), BL6N1
 2015 年 8 月 25 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体を挟んだ金属/絶縁体/半導体(MIS)構造を用いることが有効である(Fig.1 参照)。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絶縁体/半導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¹⁾、デバイスの閾値電圧に初期閾値シフトが生じ(Fig.2 参照)、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。

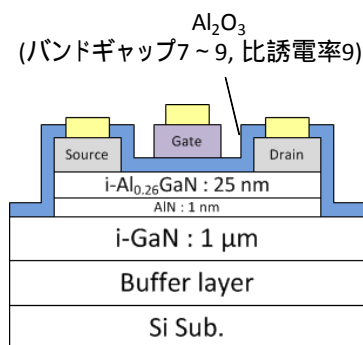


Fig.1 Al₂O₃/AlGaIn/GaN HEMT の模式図

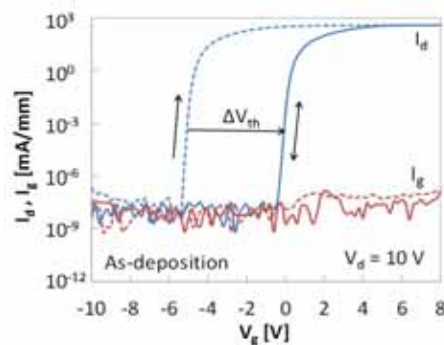


Fig.2 初期閾値シフトの様子

本課題では、絶縁膜形成のデバイスプロセス、特に PDA の温度が窒化物半導体/絶縁体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 5 nm 程度の深い場所にある界面の化学状態を評価することを行った。

3. 背景と研究目的

GaN 系トランジスタとして、現在 AlGaN/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 Al₂O₃ 膜と AlGaN 界面の化学状態について、PDA 温度との関係を調べる。Al₂O₃ はバンドギャップが 7~9 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²⁾。放射光を用いた XPS 測定を行い、埋もれた Al₂O₃/AlGaN 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 AlGaN/GaN 表面に成膜温度 300 °C で堆積した膜厚 5 nm の Al₂O₃ 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、Al₂O₃/AlGaN 界面近傍の状態を調べた。PDA 温度は 500, 600, 750 °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_{3/2} および Al 1s 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 Al₂O₃/AlGaN 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る。Ga 原子は AlGaN 層にのみ存在するため、まず Ga 2p_{3/2} スペクトルに着目すると、As-depo. のピーク位置が hv = 3 keV の場合は 1116.8 eV、hv = 2 keV の場合

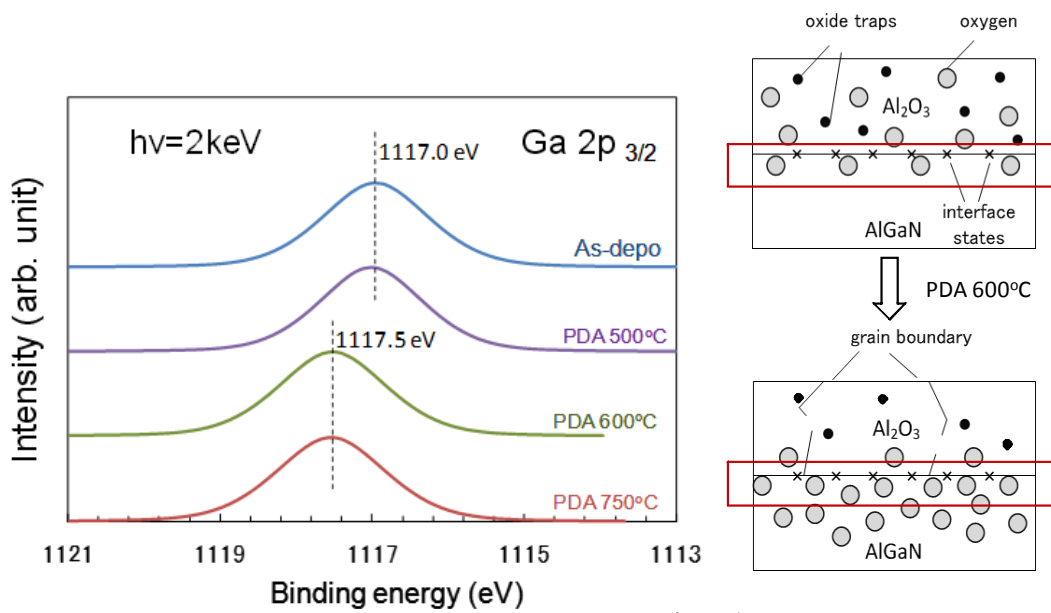


Fig.3 Ga 2p_{3/2} スペクトルの PDA 温度依存性 ($h\nu = 2\text{keV}$).

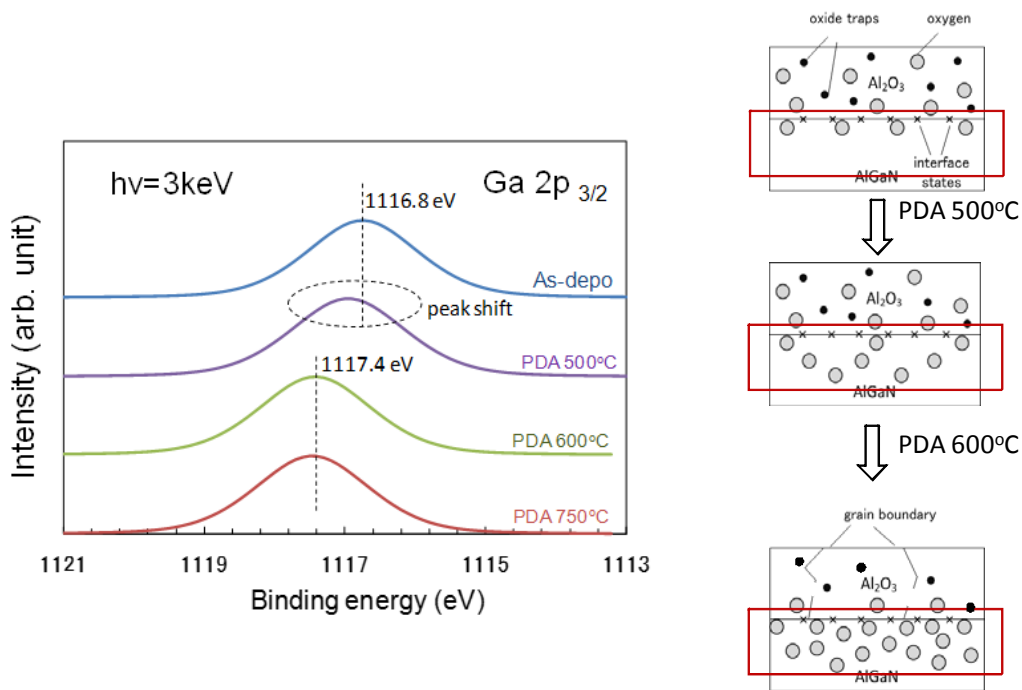


Fig.4 Ga 2p_{3/2} スペクトルの PDA 温度依存性 ($h\nu = 3\text{keV}$).

は 1117.0 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。 $h\nu = 2\text{keV}$ の方が $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{AlGaN}$ 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 表面は若干酸化していることが考えられる。次に PDA500 °C の場合では、Fig. 3 に示したように $h\nu = 2\text{keV}$ ではピーク位置が As-depo. とほぼ等しいのに対し、Fig. 4 に示したように $h\nu = 3\text{keV}$ では

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、PDA500 °Cでは界面での Ga と O の結合状態はそれほど変化せず、AlGaN 内部では Ga と O との結合が増えていることが考えられる。PDA600°Cの場合では、 $h\nu = 2 \text{ keV}$ 、 3 keV 共に高エネルギー側へシフトし、PDA750 °Cでもピーク位置が変化しないことから、PDA600 °Cで Al_2O_3 側から AlGaN 側への酸素の大きな移動が生じたものと考えられる。600 °Cはアモルファスの Al_2O_3 が結晶化する温度と同程度である。

Al 1s の結果については、 $h\nu = 2 \text{ keV}$ の場合は主に Al_2O_3 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. 5 に示したように PDA500 °Cでは $h\nu = 2 \text{ keV}$ でのピーク位置は As-depo.からの変化はないが、Fig. 6 に示したように $h\nu = 3 \text{ keV}$ ではピーク位置が高エネルギー側へシフトしている。これは、Ga $2p_{3/2}$ スペクトルにおける考察と同様に PDA500 °Cでは Al_2O_3 の化学状態にはそれほど変化はなく、AlGaN 内部では Al と O の結合が進んでいるためであると考えられる。また、PDA600 °Cで $h\nu = 2 \text{ keV}$ 、 3 keV 共にピーク位置が高エネルギー側へシフトし、750 °Cでもピーク位置が変化しないことも同様であり、600 °Cで酸素の大きな移動が生じていることを示している。以上から、600 °C程度の PDA により、 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{AlGaN}$ 界面付近および Al_2O_3 膜の化学状態が大きく変化することが分かった。

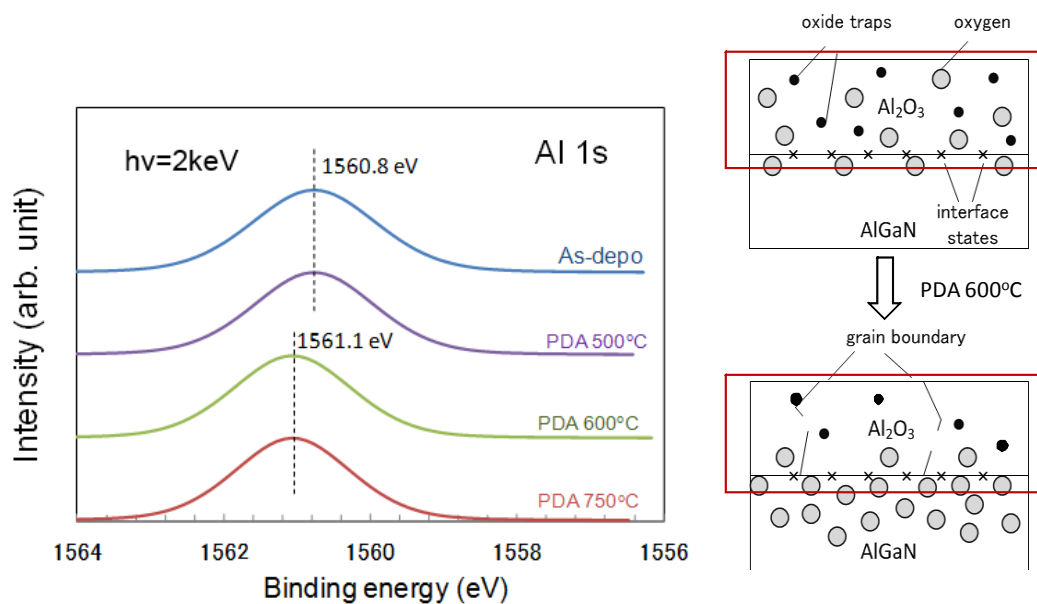


Fig.5 Al 1s スペクトルの PDA 温度依存性 ($h\nu = 2\text{keV}$).

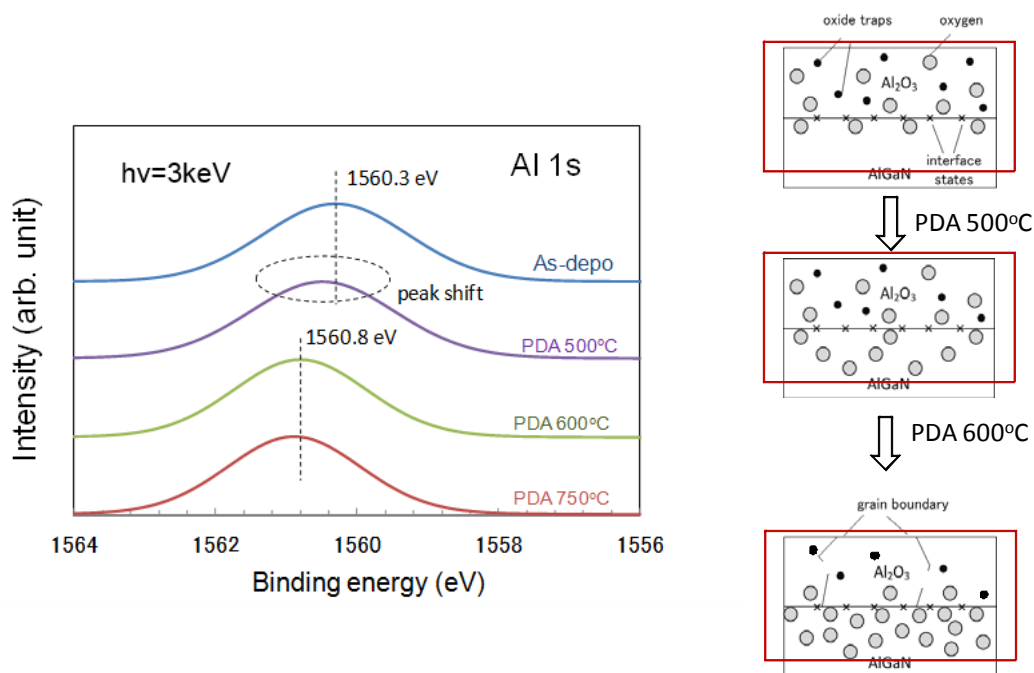


Fig.6 Al 1s スペクトルの PDA 温度依存性 ($h\nu = 3\text{keV}$).

6. 今後の課題

今回の実験から、絶縁体として Al_2O_3 を用いた場合、アモルファスから結晶化する温度と同程度の 600°C で酸素の大きな移動が生じることが明らかとなった。一方、電気的測定からは 700°C 程度で電気特性の大きな変化が生じる結果が得られているので、XPS 測定と電気測定との差異の原因を明らかにする必要がある。また、 Al_2O_3 以外の絶縁膜を使用した際の界面の化学状態を評価し、より良い電気特性のデバイスを作製する必要がある。

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).