



# 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

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>  
<sup>1</sup>名古屋工業大学、<sup>2</sup>株式会社アルバック

## 背景・経緯

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。

本研究では、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線反射率測定(XRR)により絶縁膜の密度についても評価する。

測定として、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。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> PDA温度は700 °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。また、ビームラインBL8S1を用い、Si基板上に堆積した膜厚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。図1(a)、(b)に測定試料の模式図を示す。

[1] T. Kubo, et. al., Semicond. Sci. Technol. 29, 045004 (2014).  
 [2] C. Mizue, et. al., Jpn. J. Appl. Phys. 50, 021001 (2011).

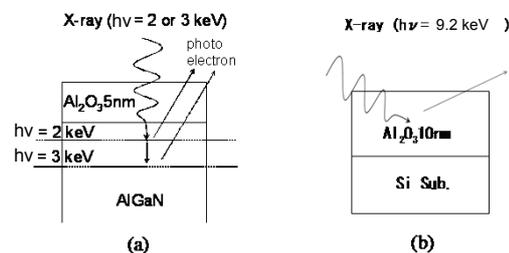


図1 実験の模式図: (a) XPS測定 (b) XRR測定.

## 結果

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図2(a), (b)および図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AlGaIn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hv = 3 keVの場合は1116.9 eV、hv = 2 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。図1(a)に示したようにhv = 2 keVの方がAl<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/AlGaIn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AlGaIn表面は酸化していることが考えられる。次にPDA700 の場合では、図1(a)に示したようにhv = 2 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、図1(b)のhv = 3keVの場合では、PDA後のピーク位置が1117.0 eVとなり、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、hv = 2 keVの場合は主にAl<sub>2</sub>O<sub>3</sub>膜の情報を、hv = 3 keVではAlGaIn内部まで含めた情報を示していると考えられるが、図2(c)に示したようにhv = 2 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、図2(d)に示したhv = 3 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、AlGaIn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図3に示す。

次に、XRRの測定結果を表1に示す。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AlGaIn層への酸素の拡散の結果とも一致する傾向である。

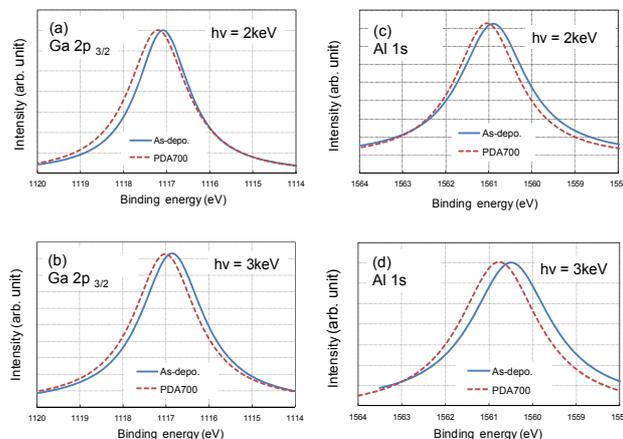


図2 XPS内核スペクトル: (a) and (b) Ga 2p 3/2 (c) and (d) Al 1s.

表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	As-depo.	PDA700
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

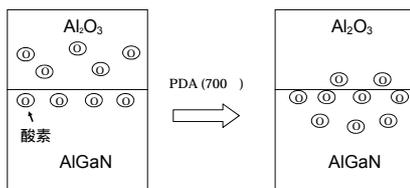


図3 PDAによる酸素原子の拡散の模式図.

## 期待される効果・社会的インパクト

窒化物半導体材料を用いたデバイスの特性を明らかにし、トランジスタ開発の指針を先んじて得ることで、国内半導体メーカーの競争力を高めることができる。将来、電気自動車などで実用化された場合における省エネルギー効果は莫大なものであり、事業化された際に社会に与えるインパクトは非常に大きいものと考えられる。