

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

名古屋工業大学

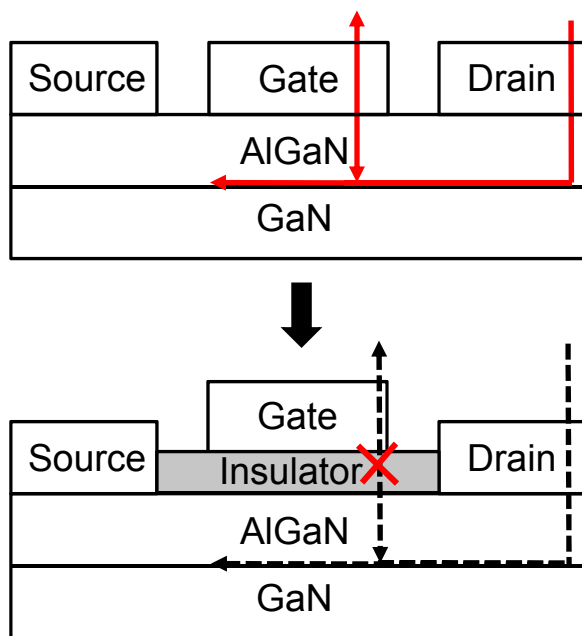
久保俊晴、西野剛介、三好実人、江川孝志



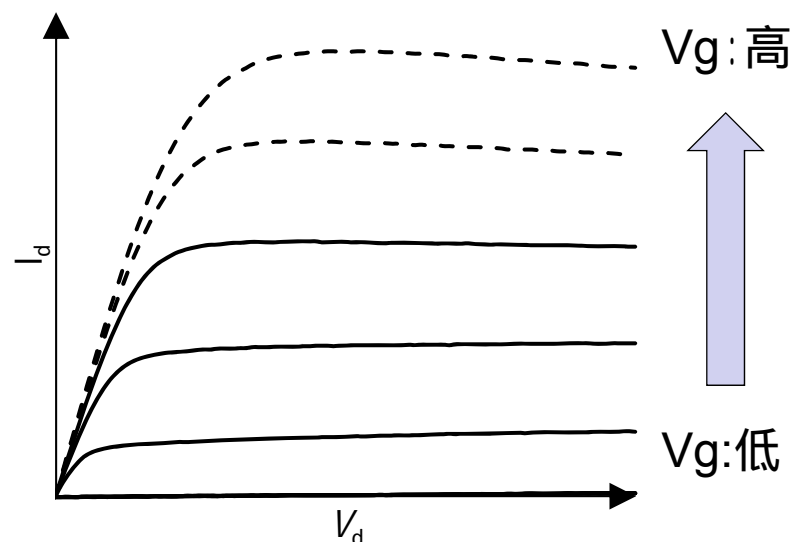
研究背景： MIS(MOS)構造デバイス

GaN系半導体を用いた高電子移動度トランジスタ(High Electron Mobility Transistor: HEMT)は次世代パワーデバイスとして期待されている。

金属/半導体構造のショットキーゲートのデバイスはゲートリーク電流が増加する問題があり、金属/絶縁体/半導体のMIS構造はゲートリーク電流を低減し、ゲートに高い電圧を印加することができる。



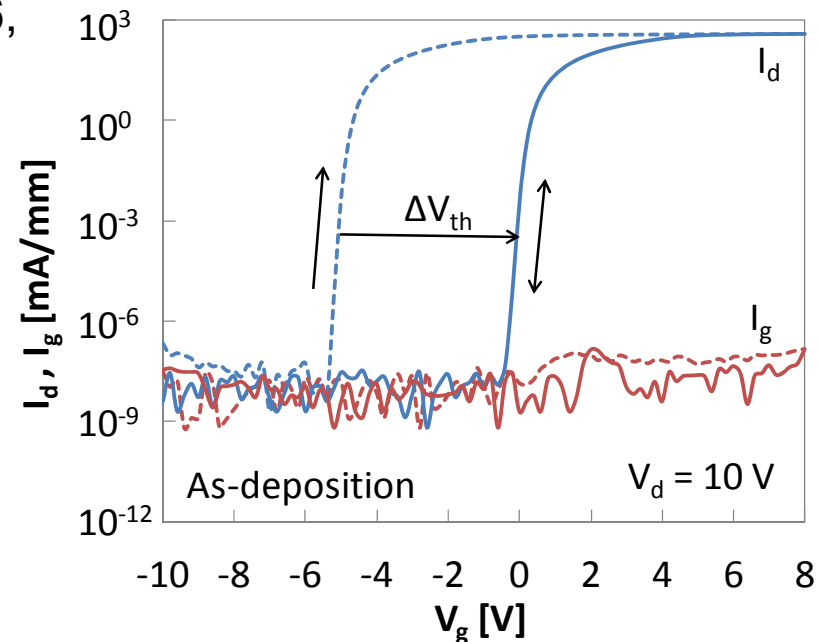
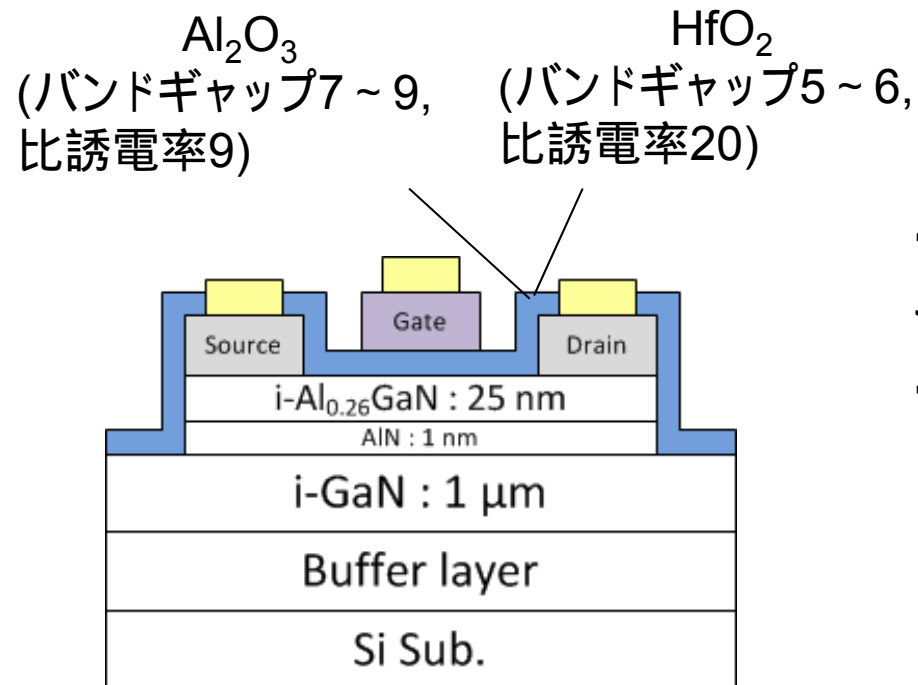
リーク電流の低減



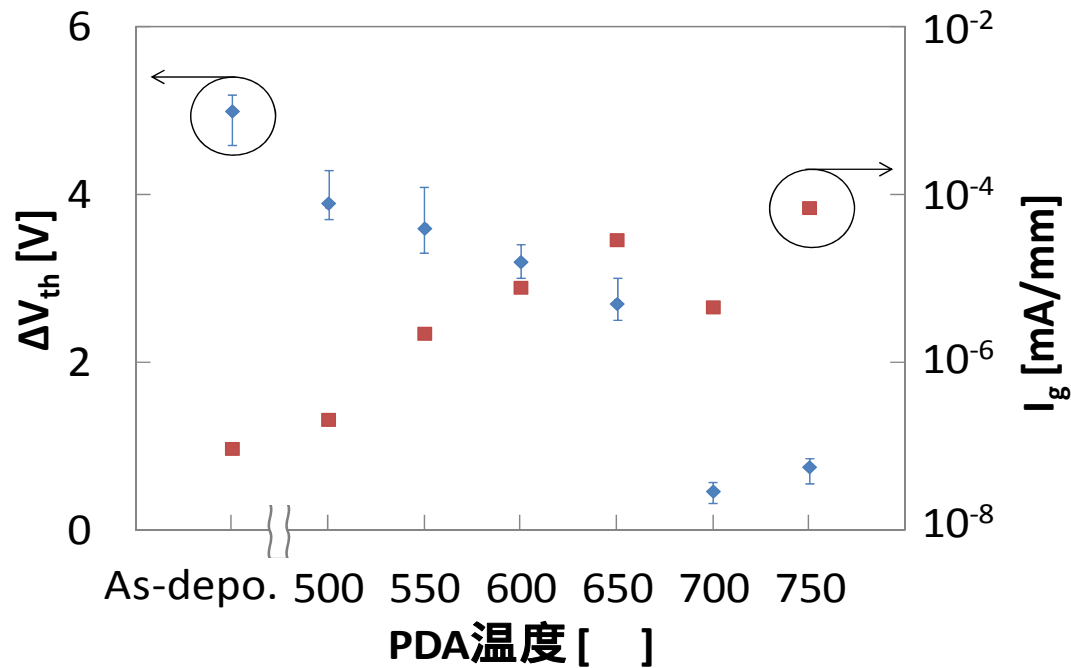
ALDにより作製したMIS-HEMT

これまで、絶縁膜材料として Al_2O_3 、 HfO_2 を用い、その成膜方法として H_2O および O_3 を酸素プリカーサとして使用した原子層堆積(ALD)によりMIS-HEMTを作製した結果、良好な I - V 特性を得ることが出来たが、初期閾値電圧のシフト(V_{th})が生じることが分かった。

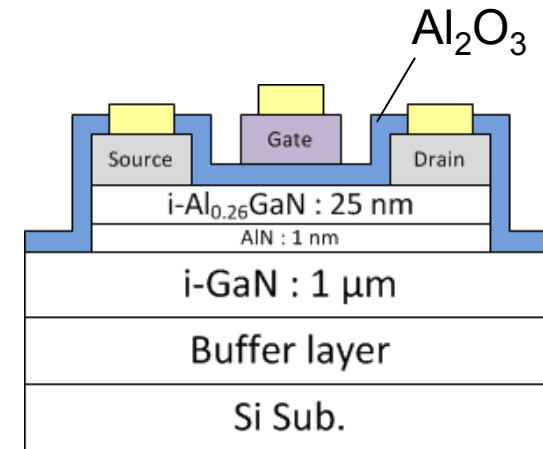
ALDで作製した絶縁膜は特性改善のための成膜後アニール(Post-deposition annealing : PDA)が多く行われている。



PDAによる V_{th} シフトの低減



(N₂雰囲気中 1min)
 (W_g/L_g/L_{gd}/L_{gs}=15/1.5/4/4 μm)



単層Al₂O₃の成膜後のPDAにより、 V_{th} は5 Vから0.5 Vへ低減したが、正バイアス8Vにおけるゲートリーク電流(I_g)は 1×10^{-7} mA/mmから 1×10^{-4} mA/mmへ増大した。

Al₂O₃膜中で微小な結晶化領域が生じ、その境界を通してリーク電流が流れる。

HfO₂でもPDAに対して同様の振舞いが見られた。

実験目的・内容

目的

PDAの絶縁膜/AlGaIn界面付近の結晶状態への影響を放射光を用いたX線分光を用いて、より実際に近い膜厚の Al_2O_3 (実験I)、 HfO_2 (実験II)に対して評価する。

内容(実験I)

Al_2O_3 成膜条件

基板: AlGaIn/GaN/Si HEMT構造

前処理: HCl, 1min.

成膜温度: 300

プリカーサー: TMA + H_2O + O_3

膜厚: 5 nm

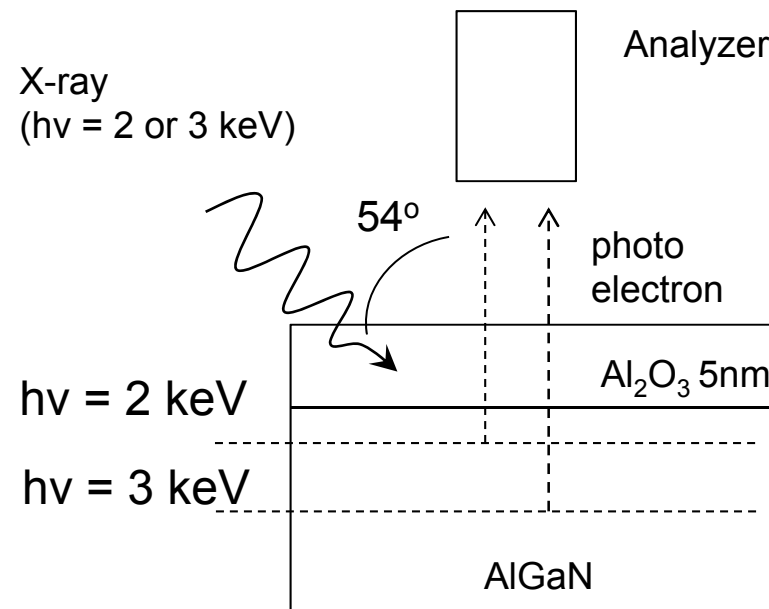
PDA条件

温度: 500 、 600 、 750

環境: N_2 雰囲気中

時間: 1 min.

X-ray photoelectron spectroscopy (XPS)

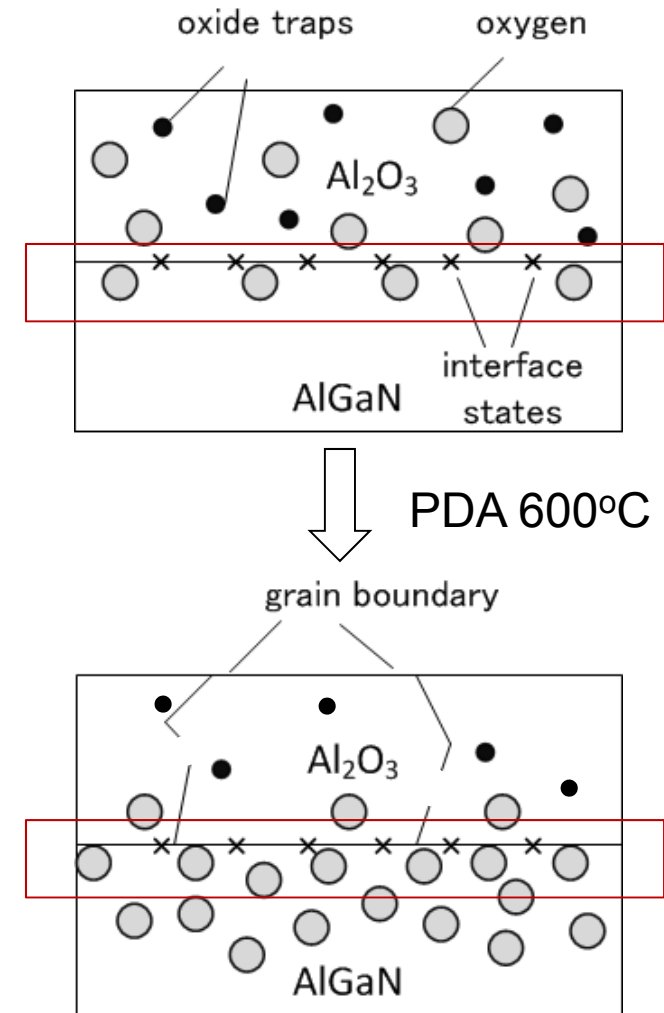
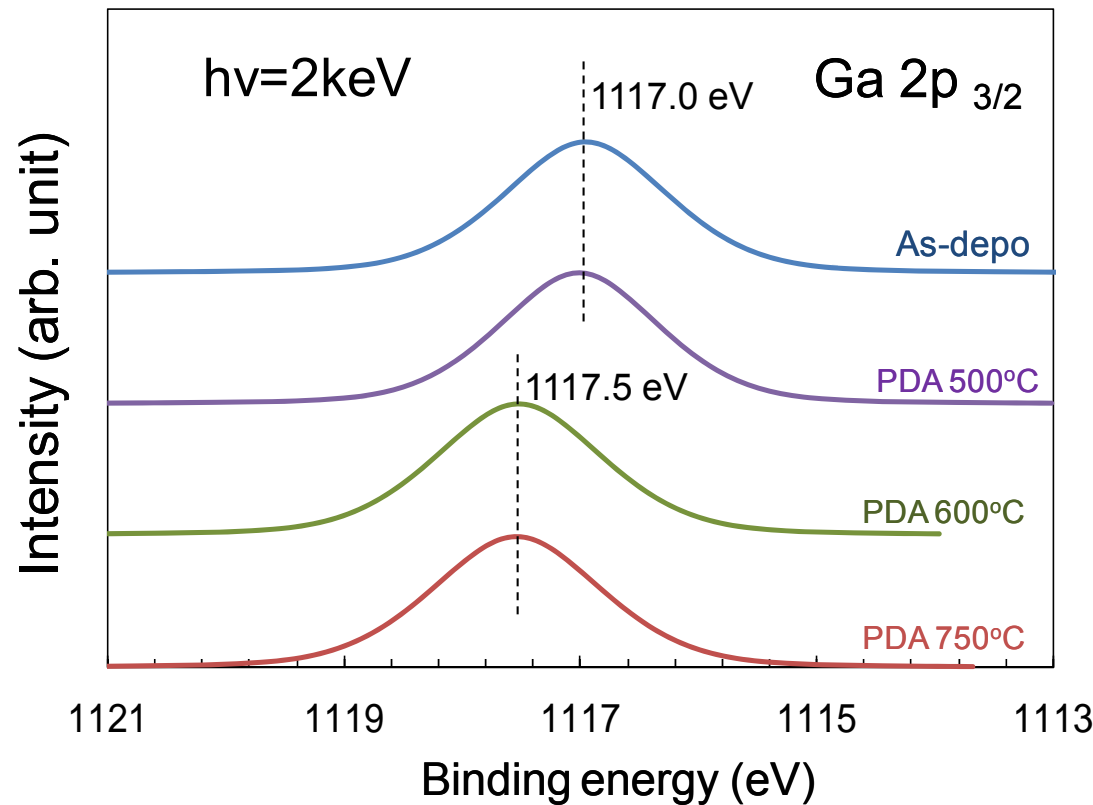


* 知の拠点あいちBeam line BL6N1

基準: C 1s: 285.0 eV

解析: COMPRO (表面科学会配布)

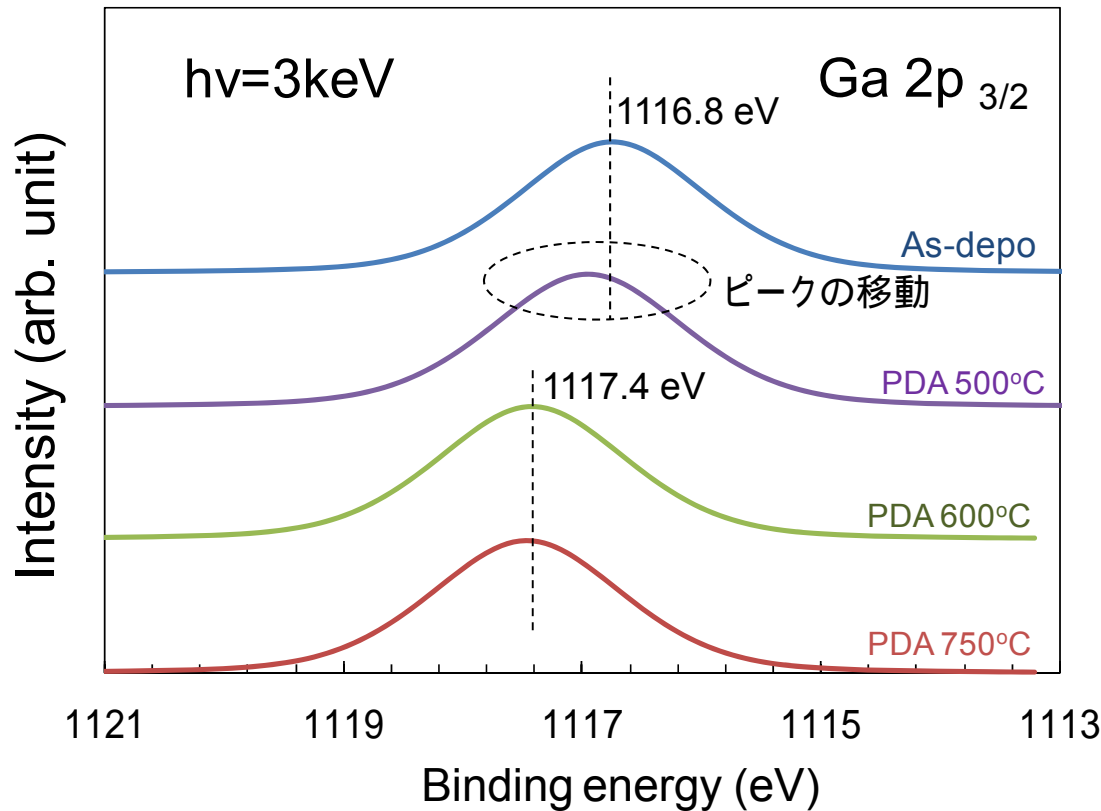
実験結果: Ga 2p_{3/2}, hv=2 keV



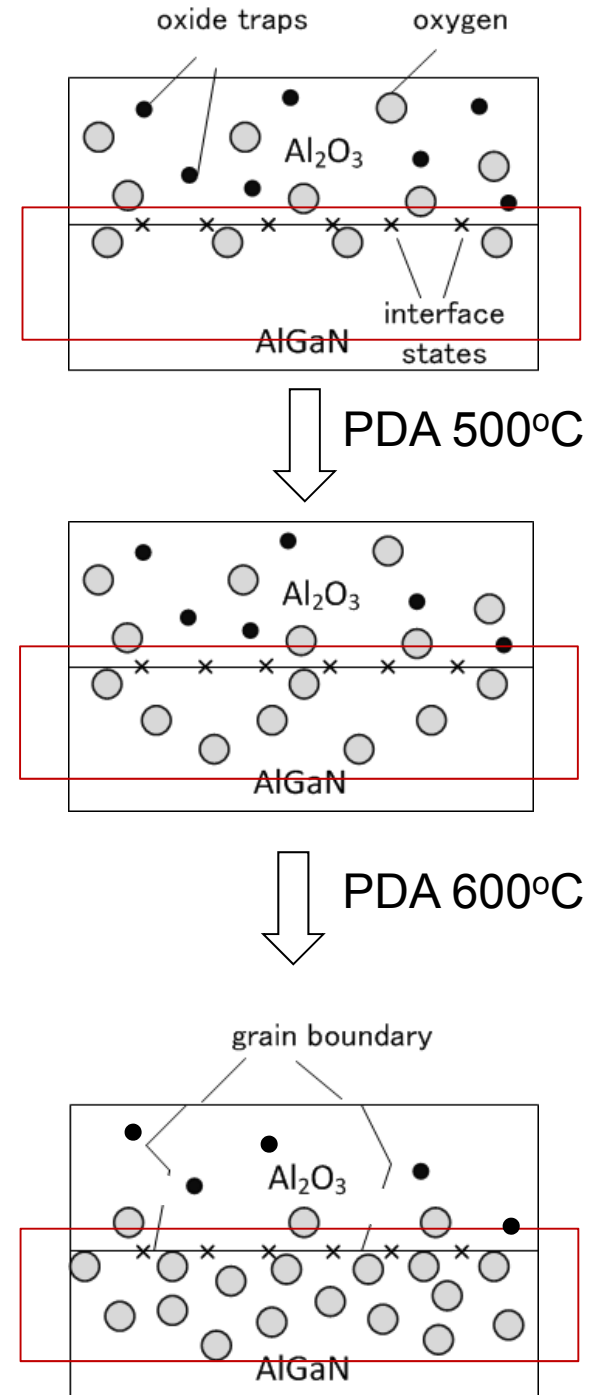
界面近傍の模式図

・界面付近でのGaとOの結合は600 程度で急激に増加する

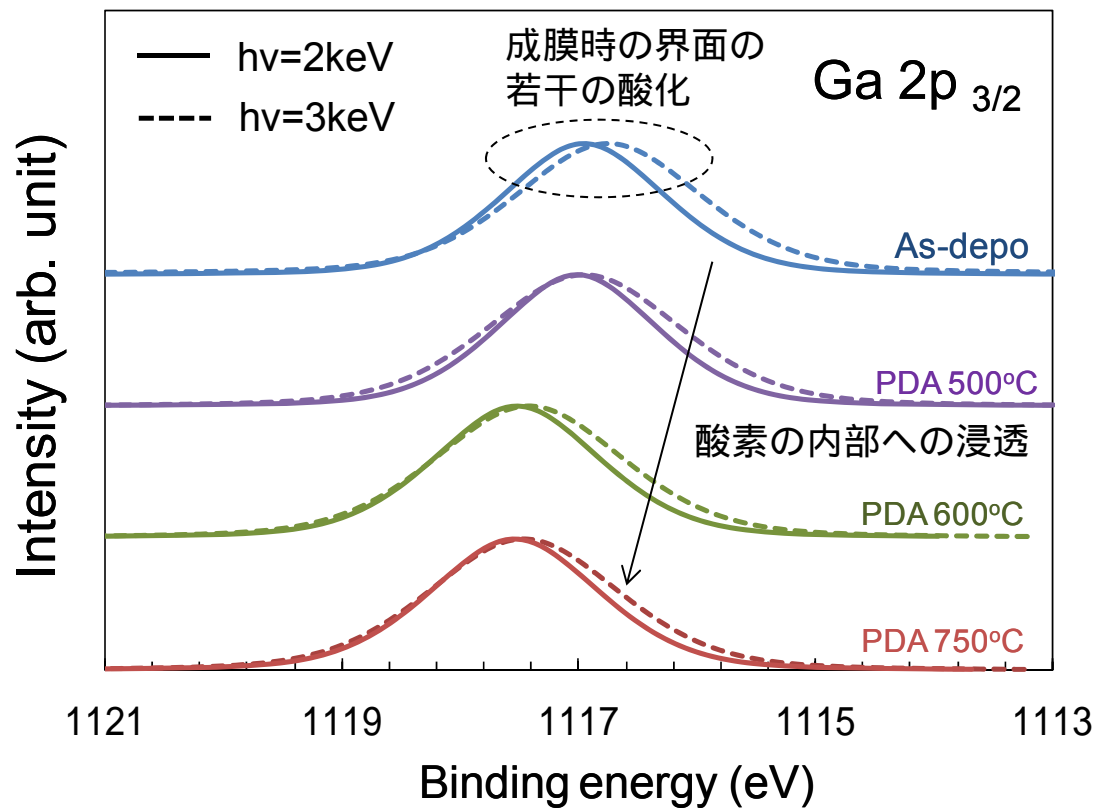
Ga 2p_{3/2}, hv=3keV



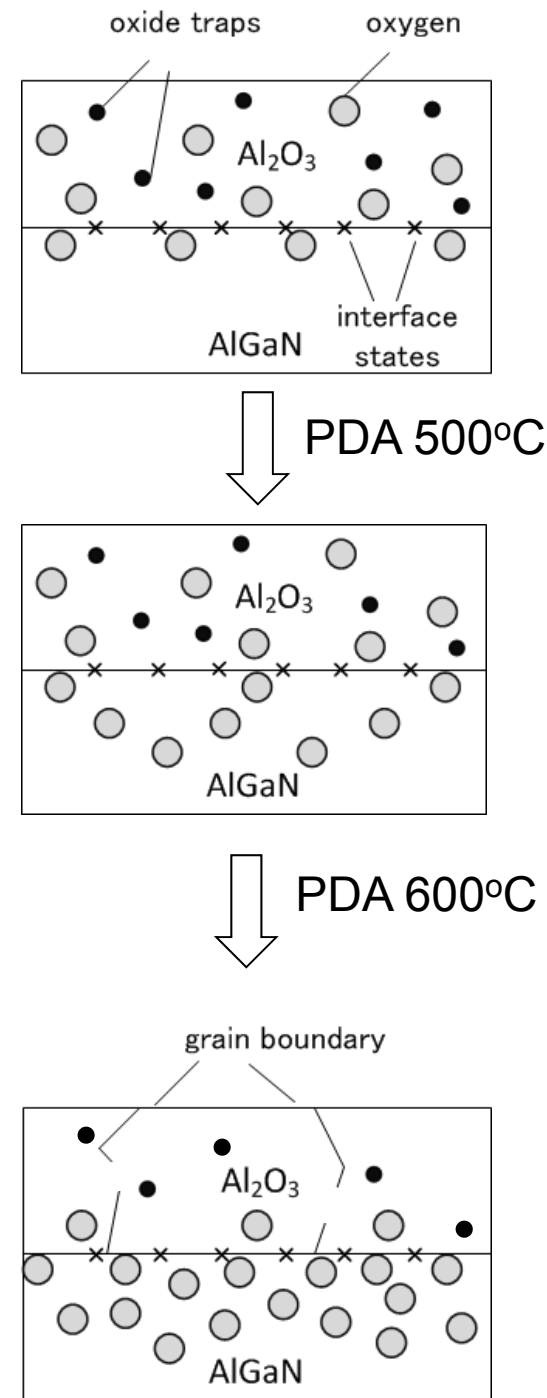
・AlGaN内部でのGaとOの結合は
500 程度でも生じている



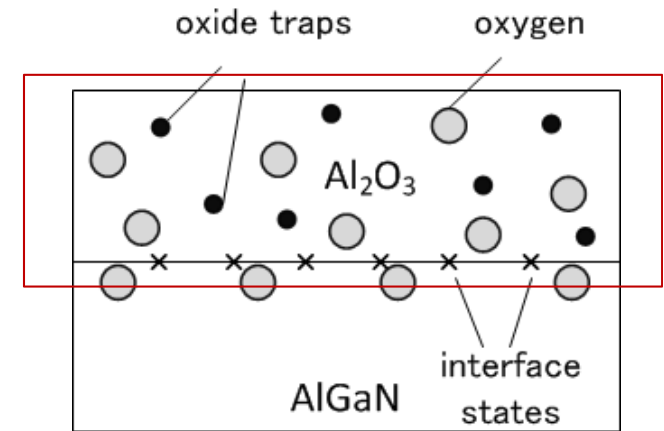
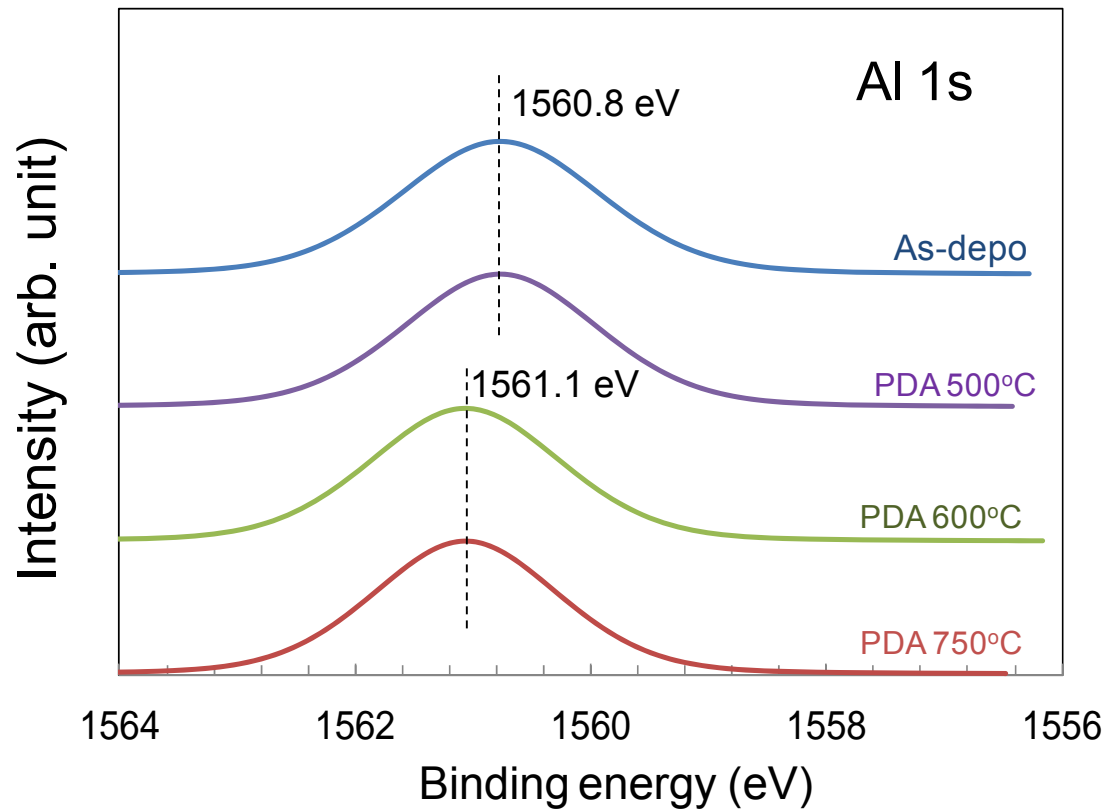
Ga 2p_{3/2} まとめ



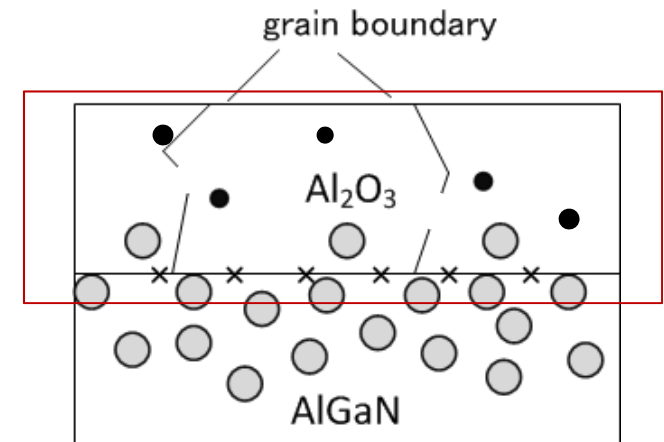
・GaとOの結合は600 程度で大きく変化したが、AlとOの結合はどうか？



Al 1s, $h\nu=2\text{keV}$



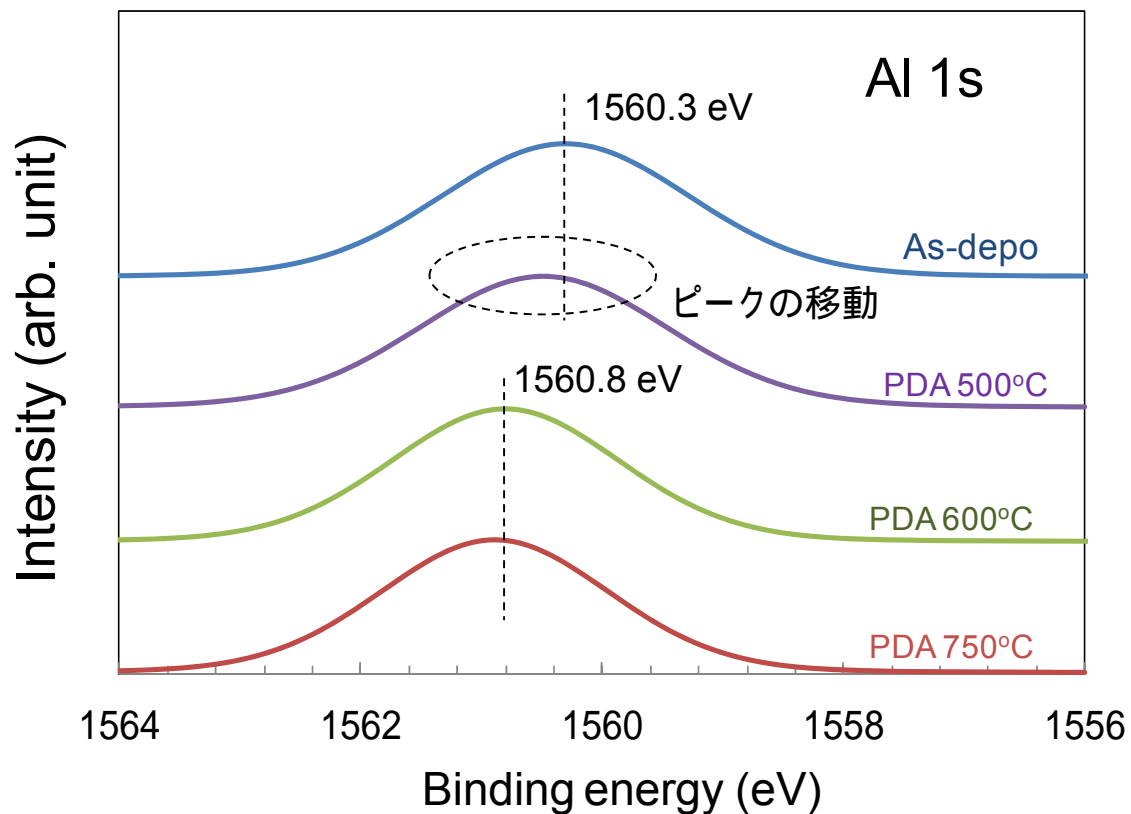
↓ PDA 600°C



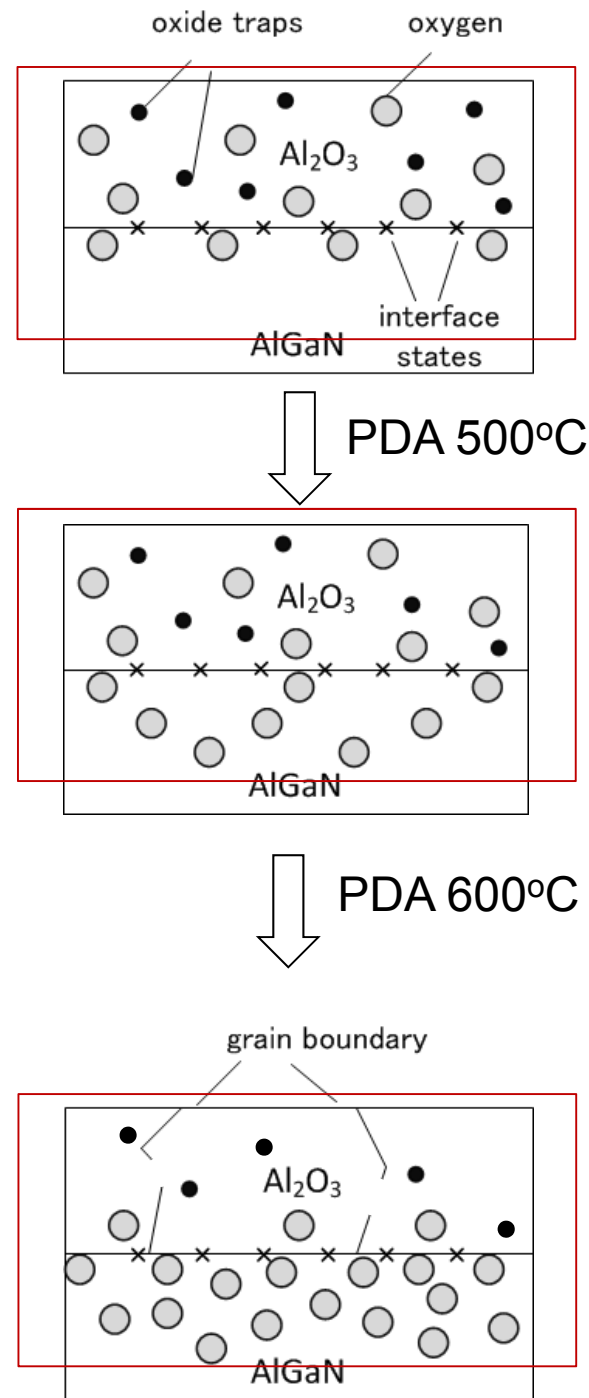
界面近傍の模式図

- ・ $h\nu=2\text{keV}$ の場合は Al_2O_3 の Al-O 結合を多く測定している
- ・ Ga 2p の場合と同様、600 程度で急激に変化が生じている

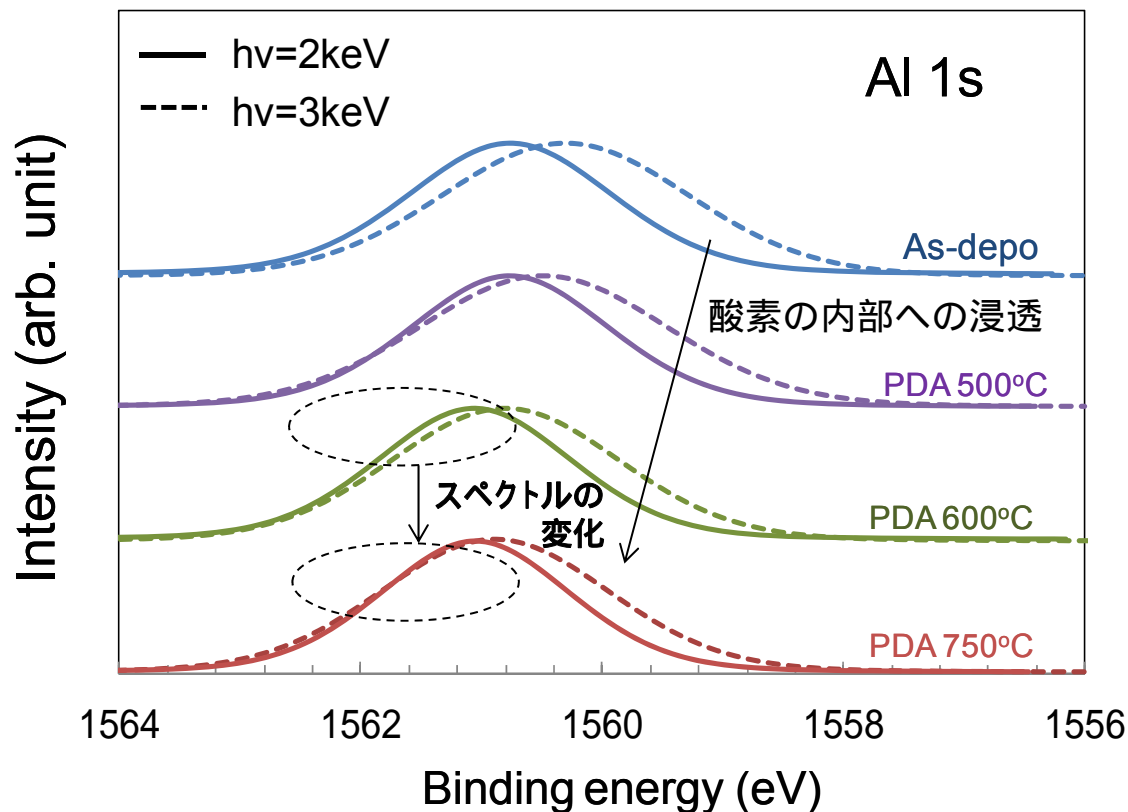
Al 1s, $h\nu=3\text{keV}$



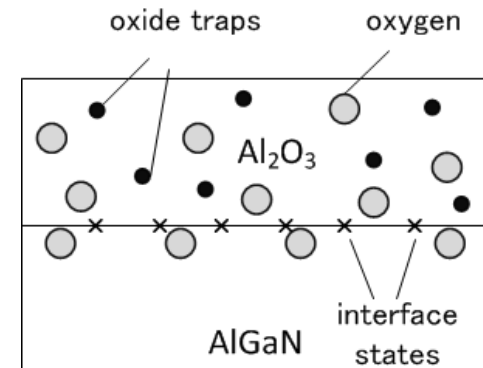
・Gaの場合と同様、AlGaIn内部でのAlとOの結合は500 程度でも生じている。



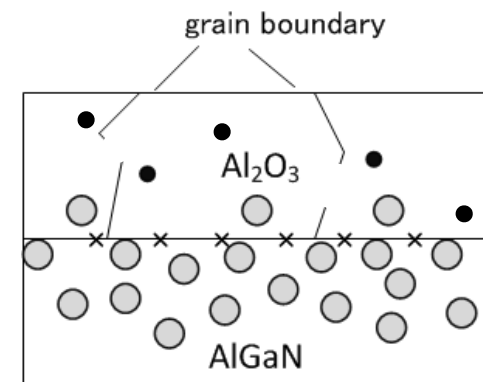
Al 1s まとめ



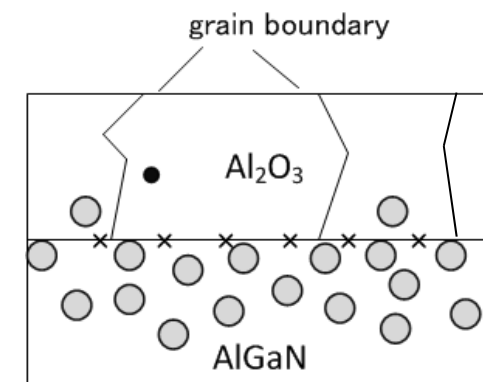
- ・結晶構造の大きな変化は600 程度で生じるが、デバイスの $I-V$ 特性から V_{th} を起こす電子トラップは更なる温度上昇によって消滅すると考えられる



↓ PDA 600°C



↓ PDA 750°C





実験I まとめ

PDAの $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{AlGaN}$ 界面付近の結晶状態への影響を放射光を用いたX線分光を用いて、5nmの膜厚の Al_2O_3 に対して評価した。

結果として、

- ・PDA温度600 で Al_2O_3 および $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{AlGaN}$ 界面近傍の結晶状態は大きく変化した。
- ・PDA温度500 程度でもAlGaN内部への酸素の拡散が見られた。
- ・デバイスのI-V特性より、 V_{th} に影響する電子トラップは大きな結晶状態の変化後に消滅していると考えられる。

実験II

内容(実験II)

HfO₂成膜条件

基板: AlGa_{0.3}N/GaN/Si HEMT構造

前処理: HCl, 1min.

成膜温度: 250

プリカーサー: TDMAH + H₂O + O₃

膜厚: 5 nm

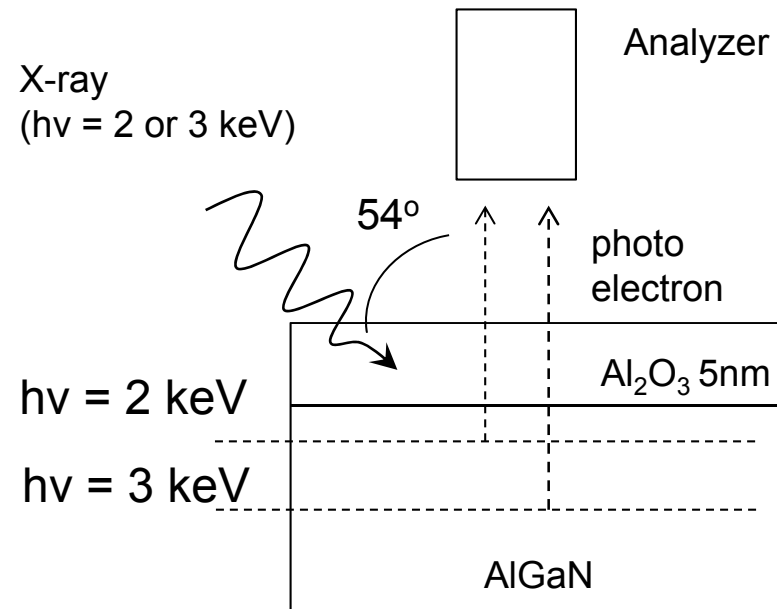
PDA条件

温度: 400 、 600

環境: N₂雰囲気中

時間: 1 min.

X-ray photoelectron spectroscopy (XPS)

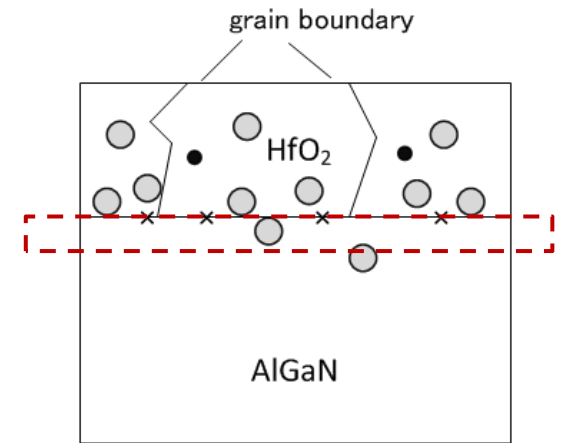
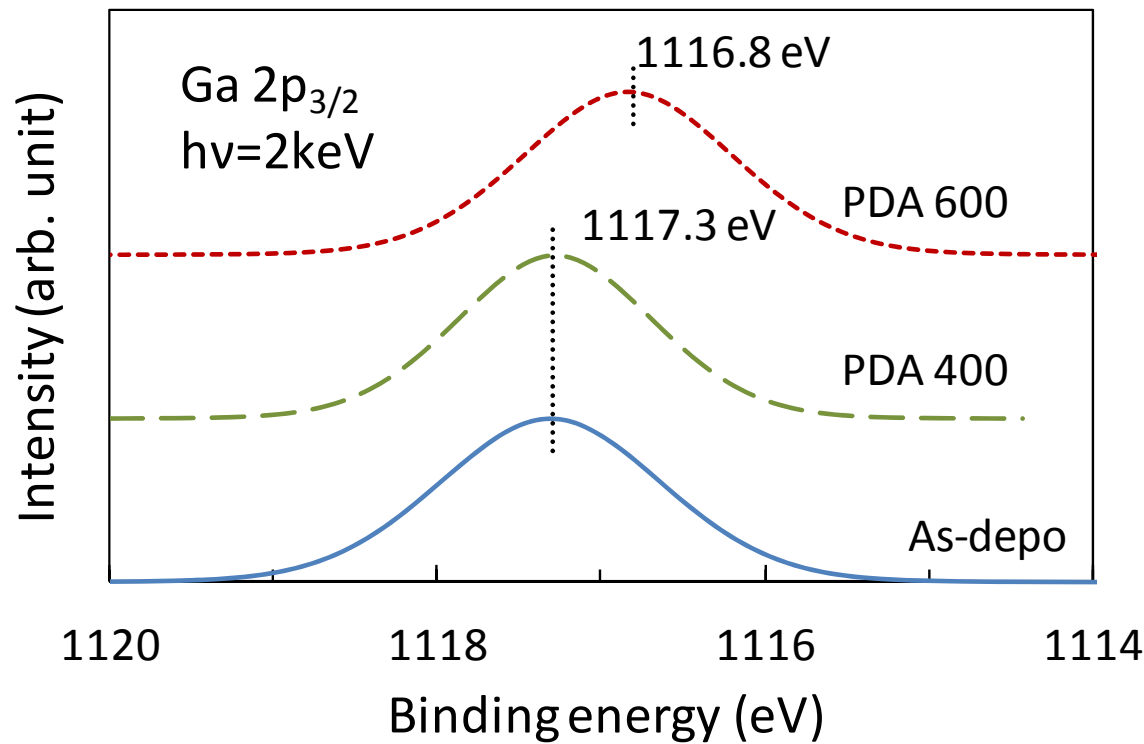


* 知の拠点あいちBeam line BL6N1

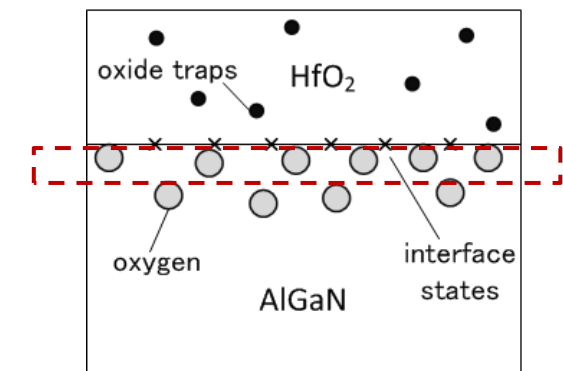
基準: C 1s: 285.0 eV

解析: COMPRO (表面科学会配布)

実験結果: Ga 2p_{3/2}, hv=2 keV



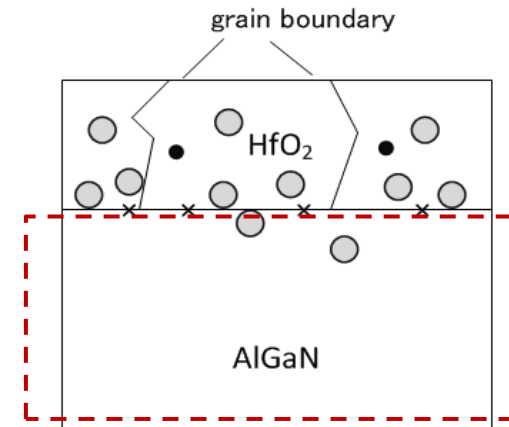
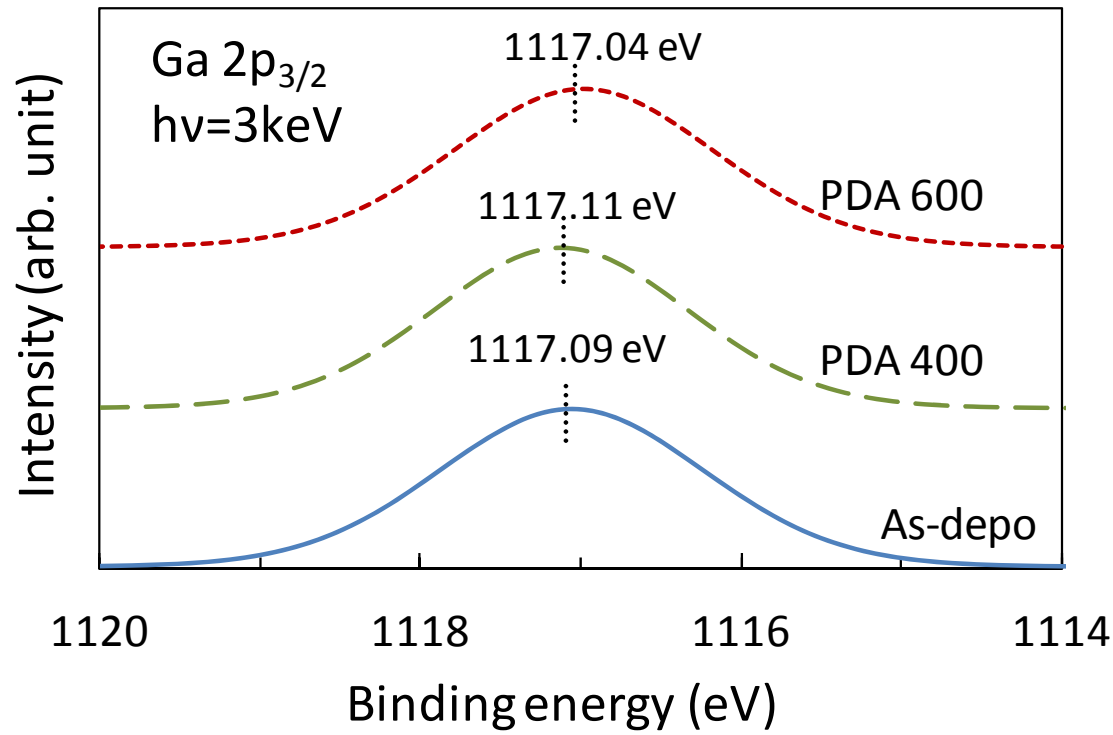
↑ PDA 600°C



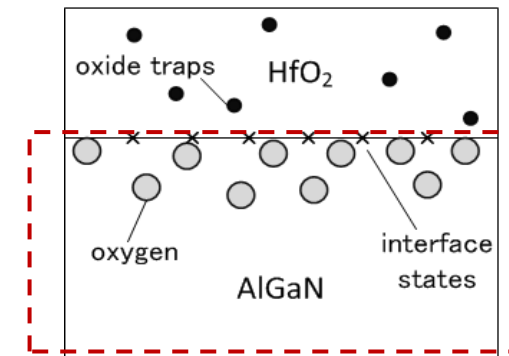
14

・界面付近でのGaとOの結合は600 程度で減少した。

Ga 2p_{3/2}, hv=3keV

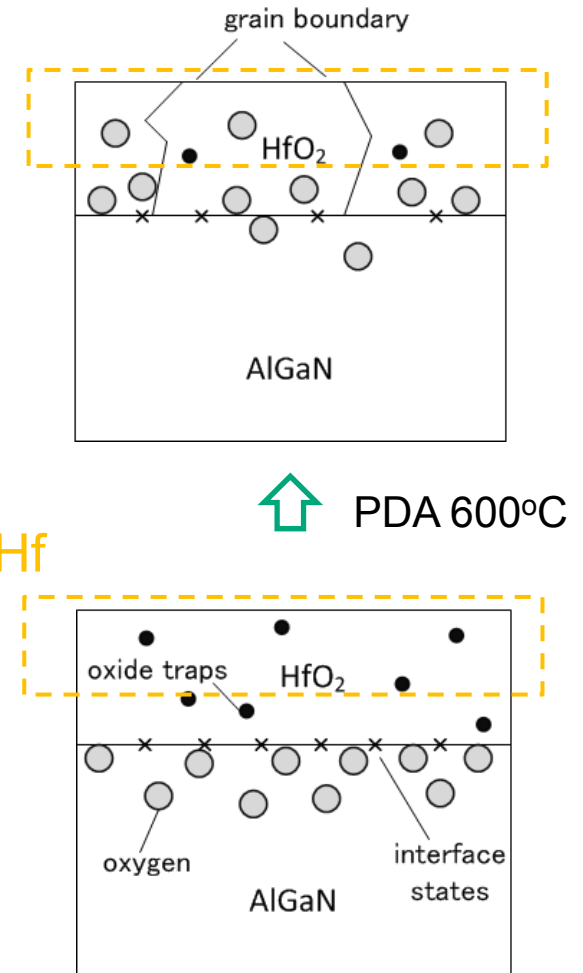
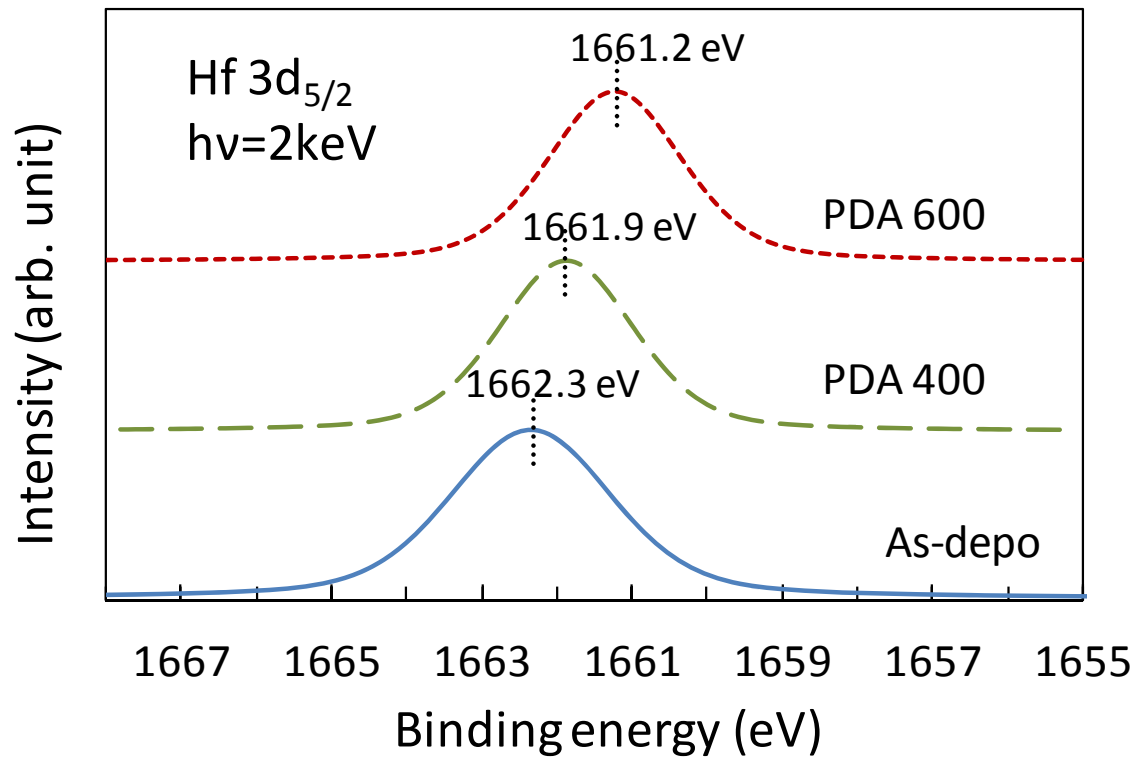


↑ PDA 600°C



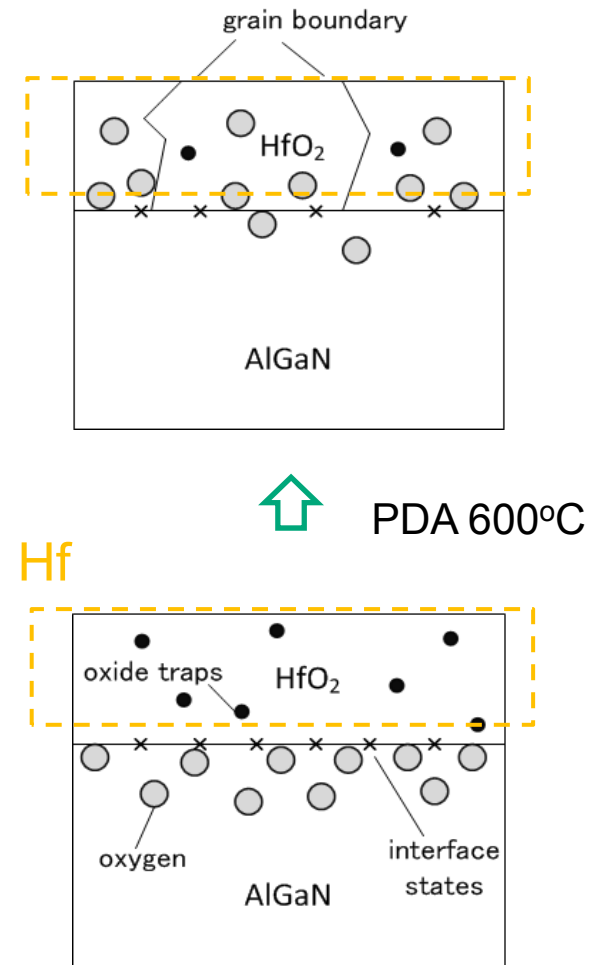
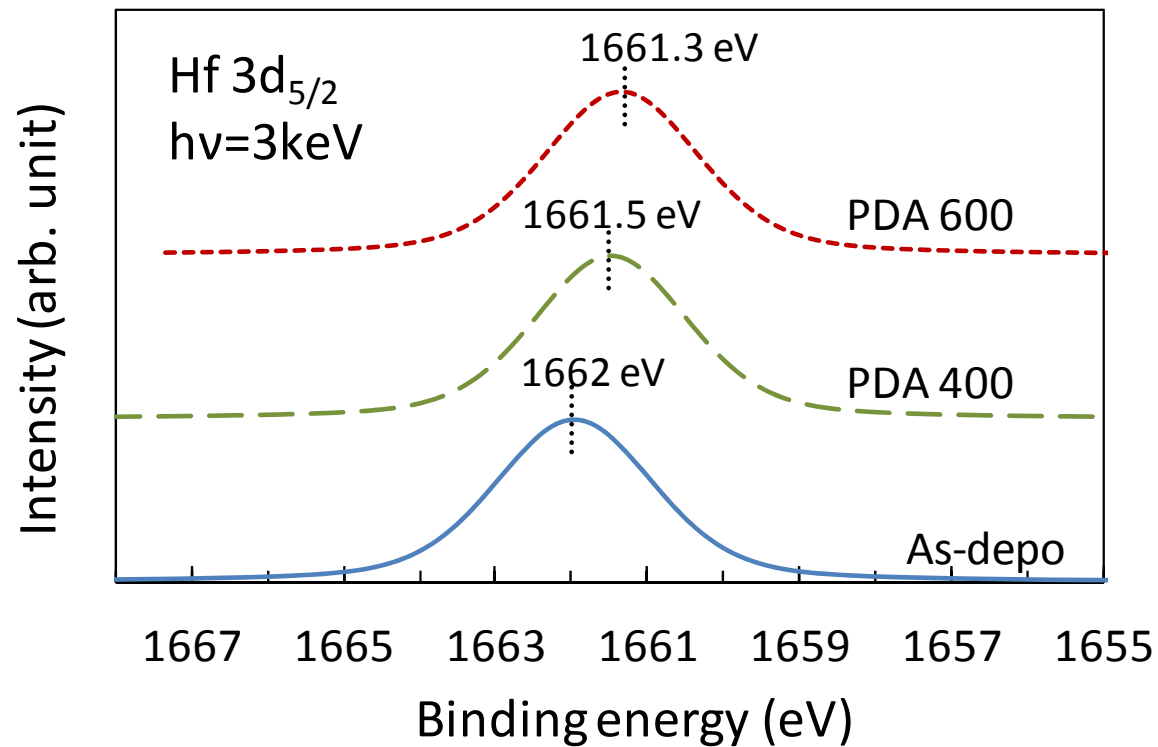
・AlGaN内部でのGaとOの結合は600°Cでもそれ程変化しなかった。

Hf 3d_{5/2}, hv=2keV



- ・ PDA温度の上昇と共にHfとOの結合が増えている。
- ・ PDA温度400 程度でもHfOの表面からOを取り込んだ可能性がある。

Hf 3d_{5/2}, hv=3keV



- PDA温度の上昇と共にHfとOの結合が増えている。
- PDA温度400 程度からAlGaN層側からもOを取り込んだ可能性がある。



実験II まとめ

PDAの $\text{HfO}_2/\text{AlGaIn}$ 界面付近の結晶状態への影響を放射光を用いたX線分光を用いて、5nmの膜厚の HfO_2 に対して評価した。

結果として、

- ・PDA温度600 で $\text{HfO}_2/\text{AlGaIn}$ 界面近傍の結晶状態は大きく変化した。
- ・PDA温度400 程度でも HfO_2 内部への表面および AlGaIn 側からの酸素の拡散が見られた。

今後の研究

- ・今回 Al_2O_3 と HfO_2 でPDAによる酸素の挙動が大きく異なっていたのは、 HfO_2 がイオン結合性が強いために酸素欠陥が多く生じていたためであると考えられる。
- ・PDAに対する挙動の異なる Al_2O_3 と HfO_2 の積層構造と適切な温度のPDAによりデバイス特性を向上させる



謝辞

本研究を遂行するに当たり、あいちシンクロトン光センターの職員の皆様、特に渡辺様、野本様、陰地様、村井様にお世話になりました。

本研究は、独立行政法人 科学技術振興機構 愛知地域スーパークラスタープログラムの支援によって行われました。