

Ni/GaN 界面の硬 X 線光電子分光分析 Interface Studies for Ni/GaN by Hard X-ray Photoelectron Spectroscopy

高橋 直子^a, 成田 哲生^a, 菊田 大悟^a, 野崎 洋^a, 片岡 恵太^a,
石黒 修^a, 野中 敬正^a, 木本 康司^a, 加地 徹^a
Naoko Takahashi^a, Tetsuo Narita^a, Daigo Kikuta^a, Hiroshi Nozaki^a, Keita Kataoka^a,
Osamu Ishiguro^a, Takamasa Nonaka^a, Yasuji Kimoto^a, Tetsu Kachi^a

^a(株)豊田中央研究所
^aTOYOTA CENTRAL R&D LABS., INC.

GaN 系パワーデバイスにおける p 型電極の接触抵抗上昇要因を調査する目的で、オーミック電極/GaN 層の界面を硬 X 線光電子分光(HAX-PES)にて非破壊で分析した。分析にあたり HAX-PES における Ga の分析深さの限界が約 40nm であること、酸化状態の異なる Ga 同士が識別できることを確認した。その上で I-V 特性が異なる試料を作製し、それらの Ga の結合状態を HAX-PES で分析した。この結果、素子のアニール温度によってオーミック電極/GaN 界面の Ga の結合状態が異なっていることが分かった。

キーワード： 硬 X 線光電子分光・非破壊分析・窒化ガリウム

1. 背景および研究目的

弊社ではハイブリッド車におけるインバータの高効率化を目指して、低損失なパワースイッチングデバイスの開発を行っている[1][2]。現在は Si を材料としたパワーデバイスが採用されているが、さらなる高効率化に対しては理論的に Si より 2 桁近い低損失化が可能な GaN がポスト Si 材料の 1 つとして検討されている。開発にあたっていくつかの課題が存在するが、その中でも p 型 GaN(p-GaN)のオーミック電極における高い接触抵抗が重要課題の一つとしてあげられる。接触抵抗を支配する要因を探るためこれまで各種分析を行ってきたが、明確な結論が得られていないのが現状である。

抵抗を上昇させる要因として懸念される表面酸化や表面汚染に関する評価には、通常 XPS(X-ray Photoelectron Spectroscopy)等の分析手法が用いられるが、評価したい界面は電極直下 10~20nm に存在するため、分析深さ数 nm の XPS 等で評価を行うことは不可能である。また、AES(Auger Electron Spectroscopy)や SIMS(Secondary Ion Mass Spectrometer)等の深さ方向分析で界面付近までイオンスパッタリングを行う分析手法も存在するが、物質表面へ物理的にイオンを衝突させるイオンスパッタリングでは表面変質が懸念され、GaN 表面においても酸化被膜の還元等、正しい評価ができない可能性がある。

そこで、X 線の励起エネルギーを高くすることで光電子の運動エネルギーを増加させ、平均自由行程を増大させることが可能な HAX-PES(Hard X-ray Photoelectron Spectroscopy / 硬 X 線光電子分光)を用いて電極/GaN 界面の分析を試みた。励起エネルギーが高くなると、光イオン化断面積の減少により光電子のピーク強度が低下するが、SPring-8 のような輝度の高い光源を用いることによって、この問題を克服できることが期待される。

2. 実験

はじめに、HAX-PES の検出深さを把握する目的で、サファイア基板に n-GaN を成長させ Ni をそれぞれ 5nm、10nm、20nm、30nm および 40nm 蒸着した素子を分析し、Ni 層の下に存在する Ga または N のピーク強度を調べた。次に、結合状態が異なる Ga 同士が識別できるか否か確認するため、サファイア基板上の n-GaN を酸素雰囲気下にて 750°C、40 分間、または 900°C、4 時間の酸化処理を行った素子の Ga のスペクトルを測定し、両者を比較した。さらに、p-GaN 上のオーミック電極で I-V 特性の異なる素子における界面の状態分析を試みた。試料にはサファイア基板上の p-GaN に Ni および Au のオーミック電極をそれぞれ 10nm ずつ蒸着した素子を用いた。アニール条件は酸素雰囲気下で 5 分間、550°C または 650°C で処理をしたものである。各素子の I-V

特性を図1に示す。550°Cで酸素アニールを行った試料は良好なオーミック性を示したが、650°Cで処理した試料は、非線形のI-Vカーブを示した。

HAX-PESによる分析はBL46XUで実施した。入射X線のエネルギーは7940.2eV、スリットサイズは5mm×5mm、光電子の取出角を80°とし、パスエネルギー200eVで分析を行った。

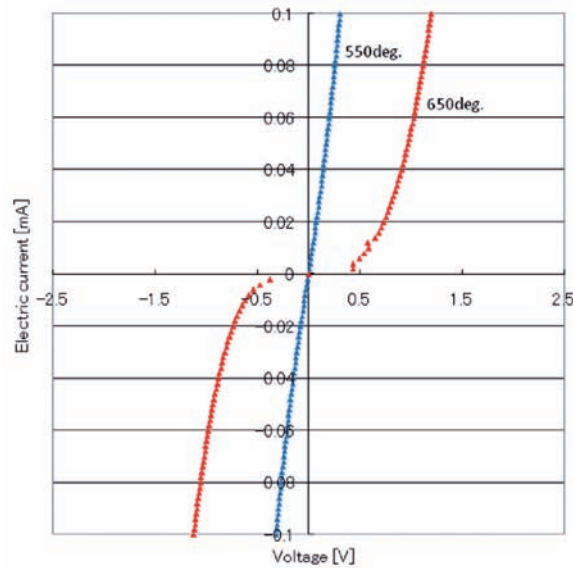


図1. 酸素アニールした Au/Ni/p-GaN/Al₂O₃ の I-V 特性

3. 結果および考察

Ni/n-GaN/Al₂O₃ を用いて HAX-PES の検出深さを調べた結果を図2に示す。Niの膜厚の増加に伴い、Ga2p_{3/2} および N1s のピーク強度は指数関数的に減少したものの、Niの膜厚が40nmに至るまでGa2p_{3/2} とN1sのスペクトルが検出された。次に、酸化状態の異なるGaO_x/n-GaN/Al₂O₃ を用いて両者のGaの結合状態が識別できるか否か調査した結果を図3に示す。C1sピークが285eVに位置するようチャージアップ補正を行い、各Ga2p_{3/2} スペクトルのピークトップ値を比較した結果、900°C、4時間の酸化処理を行った試料のほうが、より高エネルギー側へピークがシフトしていることが確認できた。通常XPSでは一部の例外を除き電気陰性度が高いほどピークが高エネルギー側へシフトするため、900°C、4時間の酸化処理を行った試料はより酸化価数が高いと推測される。

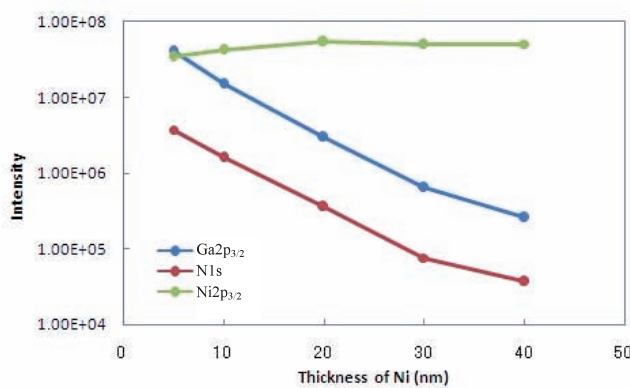


図2. Ni/n-GaN/Al₂O₃ における各元素のピーク強度

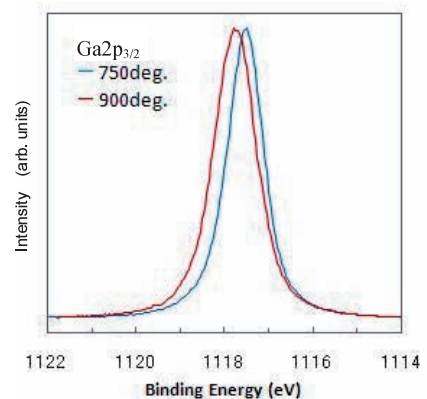


図3. GaO_x/n-GaN/Al₂O₃ の Ga2p_{3/2} スペクトル

さらに、Au/Ni/p-GaN/Al₂O₃ を用いて I-V 特性の異なる素子間における Ga の結合状態を調べた結果を図4に示す。酸素雰囲気下でアニールした場合、550°Cと650°CではGa2p_{3/2} スペクトルの形状が異なっており、両者のGaの結合状態に相違があることが分かった。Au4fスペクトルが84eV

となるよう、各スペクトルの束縛エネルギー値を補正した後、 $\text{Ga}2p_{3/2}$ スペクトルを成分 A、成分 B および成分 C の 3 成分に波形分離し、試料間で各成分比を比較した結果、良好なオーミック性を示した 550°C に対し、 650°C では成分 C が多くなっていた。酸化処理温度が高いほど面積比が高くなる点、また、前述の実験結果より Ga は酸化が進むほどピークが高エネルギー側へシフトする点を考慮すると、成分 C は酸化物と推測され、Ga の酸化物が I-V 特性に影響を与えている可能性が高いと推察された。

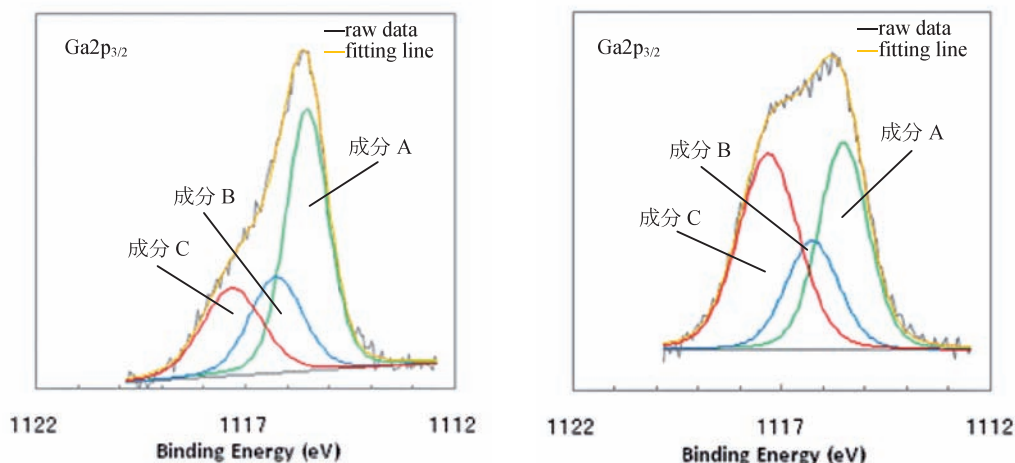


図 4. 550°C (左図)と 650°C (右図)で酸素アニールした $\text{Au/Ni/p-GaN/Al}_2\text{O}_3$ の $\text{Ga}2p_{3/2}$ スペクトル

4. 今後の課題

今回の実験では、HAX-PES で電極/GaN 界面を非破壊で分析することができたが、同時に界面チャージアップの問題が存在した。波形解析を行なった際、表面に吸着した炭化水素や電極として添加した Au を基準としチャージアップ補正を行ったが、一般的なデータベースとは異なるエネルギーに $\text{Ga}2p_{3/2}$ ピークが位置した。これはショットキー接続である電極/GaN 間の電位差による界面チャージアップが原因と推測される。界面を評価するにあたっては、試料調整の際に電極/GaN 間を同電位にするなどの工夫が必要である。また、波形分離の際 $\text{Ga}2p_{3/2}$ スペクトルを 3 成分に分離したが、各ピークがどのような結合に起因するか詳細は未だ明確ではない。今後、Ga の各種標準スペクトルを得るなどしてバックデータを蓄積し、各成分を決定する必要がある。

参考文献

- [1] M. Kanechika et al, Jpn. J Appl. Phys. Vol.1, 46, No.21, L503 (2007)
- [2] M. Kodama et al, Appl. Phys. Express 1, 021104 (2008)