

## オーミック電極/GaN 界面の硬 X 線光電子分光分析 Interface studies of ohmic contact for GaN by Hard X-ray Photoelectron Spectroscopy

高橋 直子<sup>a</sup>, 成田 哲生<sup>a</sup>, 菊田 大悟<sup>a</sup>, 片岡 恵太<sup>a</sup>, 木本 康司<sup>a</sup>, 加地 徹<sup>a</sup>  
Naoko Takahashi<sup>a</sup>, Tetsuo Narita<sup>a</sup>, Daigo Kikuta<sup>a</sup>, Keita Kataoka<sup>a</sup>, Yasuji Kimoto<sup>a</sup> and Tetsu Kachi<sup>a</sup>

<sup>a</sup>(株)豊田中央研究所  
<sup>a</sup>TOYOTA CENTRAL R&D LABS., INC.

GaN 系パワーデバイスにおける p 型オーミック電極の接触抵抗支配要因を調査する目的で、オーミック電極/p-GaN の界面を硬 X 線光電子分光 (HAX-PES) にて非破壊で分析した。まず標準試料を用いて Ga2p<sub>3/2</sub> スペクトルを取得し、窒化ガリウムと酸化ガリウムでは 1.5~2eV のケミカルシフトがあること、p<sup>+</sup>-GaN は非対称の波形を示すことなどを確認した。その上で電極アニール温度が異なる Au/Ni/p-GaN を HAX-PES で分析した結果、650°C 以上のアニールによる接触抵抗の上昇はガリウムの酸化が要因であることが示唆された。

キーワード：硬 X 線光電子分光・非破壊分析・窒化ガリウム

### 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、現在採用されている Si よりも低損失な GaN 系パワースイッチングデバイスの開発を行っている[1][2]。p 型 GaN (p-GaN) に対するオーミック電極は、デバイスに高電圧が印加されたとき絶縁破壊の原因となるホールを引き抜くために形成される。しかし、p-GaN に対する低抵抗なオーミック接触は困難であり、接触抵抗を支配する要因の解析は進んでいない。

接触抵抗の支配要因として推測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 の実験室系 XPS 等で評価を行うことは不可能である。そこで筆者らは、HAX-PES (Hard X-ray Photoelectron Spectroscopy/硬 X 線光電子分光) の分析深さが数十 nm であることに着目し、SPring-8 の BL46XU にてオーミック電極 (Au/Ni) /p-GaN 界面の分析を試みた。p-GaN に対する接触抵抗は電極のアニール温度に大きく影響されることから、アニール温度が異なる試料を HAX-PES で分析したところ、形状の違うガリウムスペクトルが得られた。これにより、接触抵抗がガリウムの結合状態と密接に関係していることが示唆されたが[3]、得られたスペクトルに含まれるピーク成分を帰属するには至らなかった (図 1)。

そこで今回の実験では、各波形分離ピークの帰属を行うのと同時に、アニール条件を細かく変化させたオーミック電極/p-GaN 界面を HAX-PES で分析し、界面のガリウムの変質が電極/p-GaN の接触抵抗へ及ぼす影響について調査した。

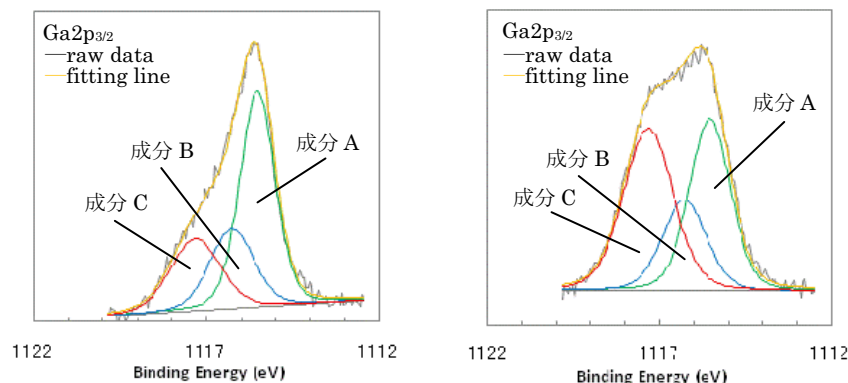


図 1. 550°C(左図)と 650°C(右図)でアニールした Au/Ni/p-GaN の Ga2p<sub>3/2</sub> スペクトル

### 実験：

まず、先回の実験で得られた各波形分離ピークを帰属する目的で、窒化ガリウムと酸化ガリウムの標準試料をそれぞれ HAX-PES で分析し、 $Ga2p_{3/2}$  および  $N1s$  スペクトルを比較した。実験に用いた窒化ガリウムは  $p^+$ -GaN ( $[Mg]=3\times 10^{19}cm^{-3}$ )、 $p^-$ -GaN ( $[Mg]=2\times 10^{18}cm^{-3}$ ) および  $n$ -GaN ( $[Si]=1\times 10^{17}cm^{-3}$ ) である。また、酸化ガリウムには  $p^+$ -GaN 上に 15nm の ガリウム酸化物を PLD で成膜したものをを用いた。次に、接触抵抗が異なる電極/ $p$ -GaN 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 の電極をそれぞれ 10nm ずつ積層して蒸着した素子を用いた。電極のアニール条件は酸素雰囲気下で 350°C、450°C、515°C、550°C、650°C または 750°C で処理をしたものである。各素子の電流-電圧特性は 515°C が最も線形性が良く、これより高温であっても低温であっても高い接触抵抗を示した。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 7938.7eV、スリットサイズは 0.5mm×25mm、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。

### 結果および考察：

標準試料である各窒化ガリウムと酸化ガリウムを HAX-PES で分析し、それぞれの  $C1s$  ピークの束縛エネルギー値が 285eV (表面に吸着した炭化水素の値) となるようチャージアップ補正を行った上で、 $Ga2p_{3/2}$  および  $N1s$  スペクトルを比較した (図 2)。この結果、 $p^+$ -GaN と酸化ガリウムの間には約 2eV のケミカルシフトが認められた。また、 $p^-$ -GaN、 $n$ -GaN に対し  $p^+$ -GaN は  $Ga2p_{3/2}$  スペクトルおよび  $N1s$  スペクトルが約 1.5eV 低エネルギー側へシフトしており、ともに高エネルギー側にショルダーを持つ非対称形を示した。先回の実験で得られた  $Ga2p_{3/2}$  スペクトルの各波形分離ピーク (図 1) で、成分 AB と成分 C との間に約 2eV のピークシフトがあったことを考慮すると、成分 A と B は非対称波形の  $p^+$ -GaN、成分 C は酸化ガリウムであった可能性が高い。なお、 $p^+$ -GaN の  $Ga2p_{3/2}$  スペクトルの非対称形は、表面近傍でのバンド曲がり起因すると考えられる [4]。これ以外にスペクトルが非対称形を示す要因として、ガリウムの酸化や不均一チャージアップの可能性が懸念されたが、非対称形が顕著であった  $p^+$ -GaN で  $n$ -GaN などより酸化が進んでいるという事実は認められず (図 3)、中和銃で電子を照射した際にも、中和に伴う波形の変化は認められなかった (図 4)。このことから、今回の実験で得られた  $p^+$ -GaN の非対称ピークは、酸化や不均一チャージアップによるものではなく、バンド曲がり起因するものと推察された。

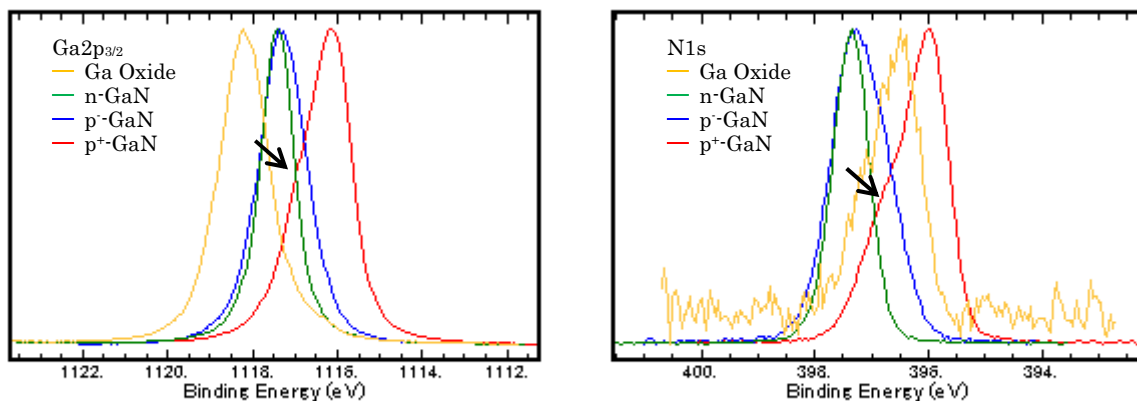


図 2. 標準試料における  $Ga2p_{3/2}$  および  $N1s$  の HAX-PES スペクトル

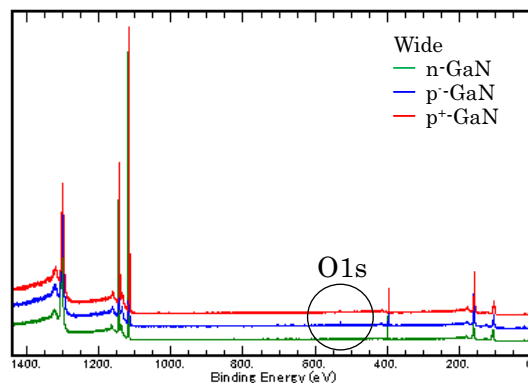


図 3. HAX-PES による標準試料の定性スペクトル

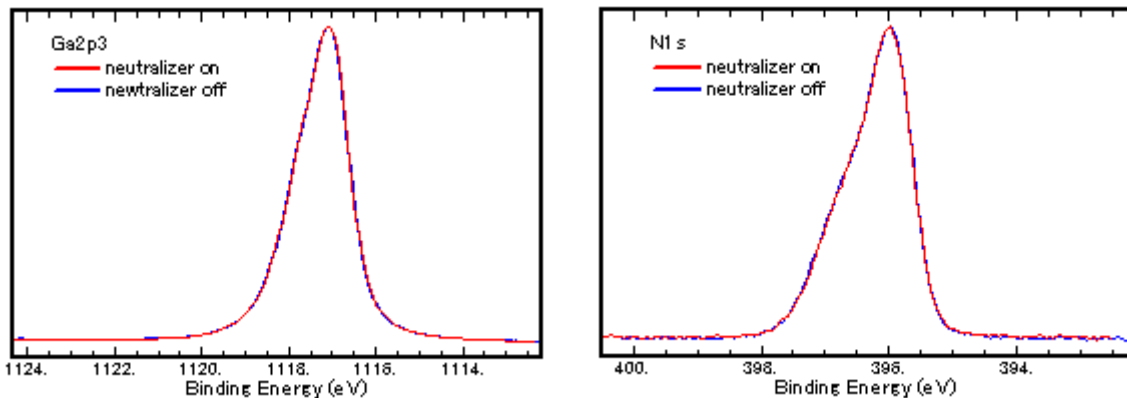


図 4.  $p^+$ -GaN の中和銃 ON/OFF 時における  $Ga2p_{3/2}$  の HAX-PES スペクトル

次に、接触抵抗の異なる Au/Ni/p-GaN における界面の状態分析を試みた。それぞれの Au4f ピークの束縛エネルギー値が 84eV (Au 電極の値) となるようチャージアップ補正を行った上で、各  $Ga2p_{3/2}$  スペクトルを比較した (図 5)。この結果、 $Ga2p_{3/2}$  スペクトルは 350~550°C まで変化が認められなかったが、650°C および 750°C で酸化物と推測されるショルダーが検出された。後者のほうがショルダーの強度が強くなっていたことから、750°C ではより酸化が進んでいると推察された。以上の結果をもとに電極の接触抵抗と界面の変質との関連を考察すると、650°C 以上の高温域では界面における Ga 酸化層形成のために接触抵抗が上昇し、350°C や 450°C の低温域では Ga の結合状態の変化とは異なる要因で接触抵抗が高くなっていると考えられた。

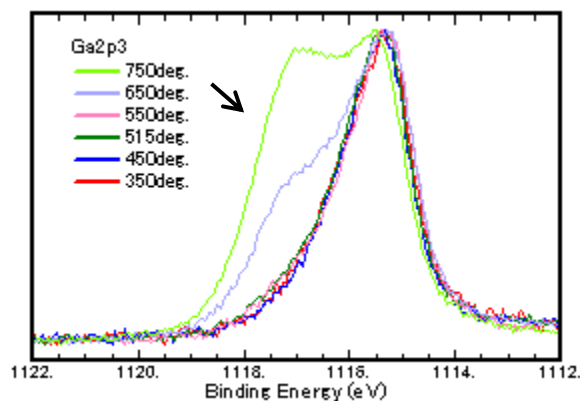


図 5. 各温度で酸素アニールした Au/Ni/p-GaN の HAX-PES スペクトル

まとめ：

- (1) 標準試料の測定により  $Ga2p_{3/2}$  スペクトルの各波形分離ピークを帰属した。
- (2)  $p^+$ -GaN の  $Ga2p_{3/2}$  スペクトルは  $p^-$ -GaN や  $n$ -GaN よりも低エネルギーにピークが出現した。また、 $p^+$ -GaN の波形はバンド曲がりに由来する非対称形を示した。
- (3) 650°C 以上のアニールでは電極直下の Ga の酸化が接触抵抗の支配要因である可能性が高いが、515°C より低温の接触抵抗の上昇は、これとは異なる要因であると推察された。

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)
- [3] 高橋直子他, SPring-8 重点産業利用課題報告書 2009A1838 (2009)
- [4] 吉木昌彦他, 先端大型研究施設戦略活用プログラム成果報告書 2005B0807 (2005)