



# Si 基板上の窒化物半導体ヘテロ構造の 光電子分光測定

分島 彰男  
名古屋工業大学

## 1. 測定実施日

2014年3月25日 14時30分 – 18時30分 (1シフト) , BL6N1

## 2. 概要

Si 基板上の AlGa<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub> ヘテロ構造上に形成したショットキ電極と AlGa<sub>N</sub> 界面のシンクロトロンから放射される軟 X 線を用いた光電子分光により、非破壊で電極半導体界面のバンド構造の分析を行い、上記ヘテロ構造を用いて作製した電界効果トランジスタのゲート（ショットキ）電極で発生するリーク電流解析の原因を探る。

今回は、この材料系を用いた軟 X 線光電子分光がセンターで初めての経験であったため、評価可能な材料のサイズなど測定環境の把握、実際に測定データが取得可能であるかの確認、データが取得可能であればそれに要する時間などの確認を主目的とした。

## 3. 背景と研究目的

SiC や GaN といったワイドバンドギャップ半導体を用いたトランジスタは、次世代低消費電力デバイスとして期待されている。特にその中でも、大口径化が可能な Si 基板上の GaN 系トランジスタ (GaN-on-Si トランジスタ) に対する期待が極めて高くなっている。しかしながら、この GaN-on-Si トランジスタのゲート電極接触層は、GaN や AlGa<sub>N</sub> といったワイドバンドギャップ材料であるにも関わらず、リーク電流が高く、実用化をすすめる中での大きな課題となっている。例えば、図1に示すように、現在普及している GaAs 系 FET と比較して、確かに、GaN はブレイクダウンする電圧は高いが (図中の電圧 (横軸) より、はるかに大きい (数 100V 以上))、ゲート電圧が小さい領

域では GaAs と比較して 2 から 3 桁大きなリーク電流が流れてしまう。

その高いリーク電流の原因は、転移や欠陥などを介して流れる局所的なものであることが推測されているが、全容が明らかにはなっておらず、現在、多くの研究機関、企業で原因究明やその解決策などの検討がすすめられている。

我々の研究室では、これまでに独自の透明ゲート電極を用いることで、トランジスタ動作時のゲート直下の発光からリーク電流個所の可視化に成功した。その結果からは、発光がゲート直下でまだらに発生しており、推測されていた通り、何らかの原因でゲート電流が局所的に流れていることが分かった。

本研究では、全体として、放射光（軟 X 線）光電子分光により、一般的な光電子分光法では得られない微小領域の半導体のリーク個所の同定やゲート（ショットキ）電極を形成した際の金属-半導体界面のバンド構造を明らかにすることを目的としており、特に今回の申請課題の検討の中では、評価可能な材料のサイズなど測定環境の把握、実際に測定データが取得可能であるかの確認、データが取得可能であればそれに要する時間などの確認を主目的とした。

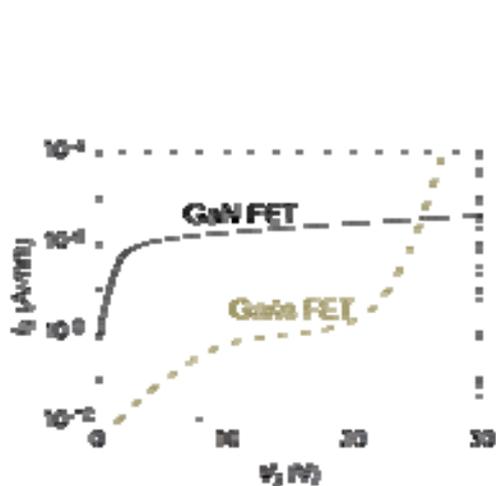


図1 ゲートリーク電流比較

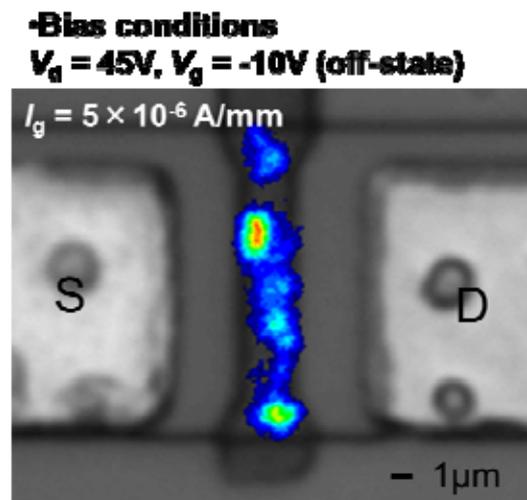


図2 透明ゲートを用いた局所リーク観察例

#### 4. 実験内容

GaN 系トランジスタのゲート部（ショットキ接触部）のバンド構造を見るために、図3の試料を用意した。エピ結晶は高抵抗 Si 基板上に有機金属気層成長法でバッファ層、GaN 層、AlN 層（1nm）、Al<sub>0.2</sub>Ga<sub>0.8</sub>N 層（25nm）堆

積したものをを用いた。このエピ結晶構造は AlGa<sub>0.2</sub>N/GaN 系高電子移動度トランジスタ (HEMT) を作製するための、一般的なヘテロ構造である。このエピ結晶に、HEMT のゲート電極の半導体と接触部に用いられる Ni を 2nm 蒸着にて堆積した。通常、HEMT のゲート電極は、Ni/Au などの積層構造で総膜厚数 100nm 以上を堆積するが、今回は励起光である軟 X 線が金属 (Ni) を透過して半導体に達することと、半導体表面を金属で覆えることを条件として 2nm の Ni を採用した。

軟 X 線光電子分光には、あいちシンクロトロン光センターのビームライン BL6N1 (エネルギー 1.75~6 keV) をを用いた。

上述のように、今回は、2nm の Ni を光が透過して、Ni/AlGa<sub>0.2</sub>N 界面付近の AlGa<sub>0.2</sub>N 層の深さ方向バンドプロファイルが確認できるかどうかの初期検討である。

そこで、

1. 半導体中の原子である Al、Ga、N の光電子を検出できるか。
2. 入射光のエネルギーを変えた場合、Al、Ga、N の光電子から見積もられる束縛エネルギーがシフトするか。

という点を評価のポイントとした。

実際の評価では、ビームラインで最もフォトン数がとりやすいエネルギーとして 3 keV を、比較データとして 2keV を用いてデータの取得を行った。



図3 評価に用いた試料構造

## 5. 結果および考察

図4に入射 X 線エネルギー (励起エネルギー) が 3keV (上) および 2keV (下) における評価試料から得られた定性スペクトルを示す。

この図中の励起エネルギー**3keV**の結果（上）からは半導体中の元素である**Ga**、**Al**、**N**の束縛エネルギーに対応するピーク観察されており、これにより、**Ni**を通して**AlGaN**層まで励起光が侵入し、**Ni/AlGaN**界面の解析を進められる確証を得た。また、励起エネルギー**2keV**の結果（下）では、励起エネルギー**3keV**の時に観察された半導体中の原子数の少ない**Al**の**1s**ピークが明瞭には観察されていない。このことから、励起エネルギー**2keV**の条件下では、**Ni**と**AlGaN**の界面に近い部分のデータが取得できそうであることが分かった。

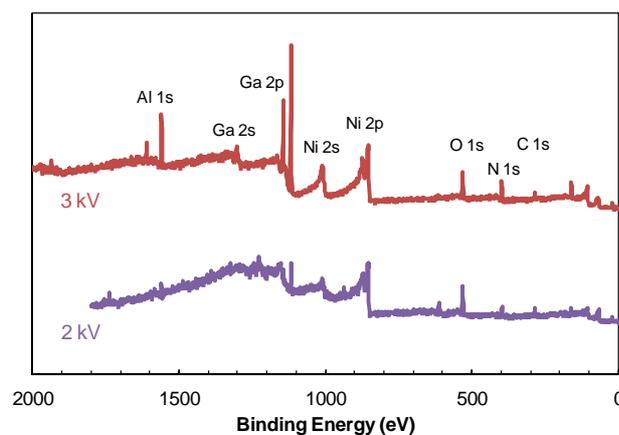


図4 励起エネルギー**3keV**、**2keV**時の定性スペクトル

図5に**Ga 2p 3/2**に相当するピークの強度と束縛エネルギーとの関係を示す。励起エネルギー**3keV**と**2keV**のピークエネルギーを比較すると**2keV**の方が**0.1eV**程度、低エネルギー側にシフトしていることが分かった。また、**2keV**では、ピークのカウント数が**3keV**に対して**45%**程度に減少しており、より**Ni/AlGaN**界面に近い領域のバンド構造を観察できていると考えられる。

以上の結果から、今回の測定によって、**Ni/AlGaN**界面では、ショットキー接触によって表面側でバンドが持ち上げられていることを確認できた。

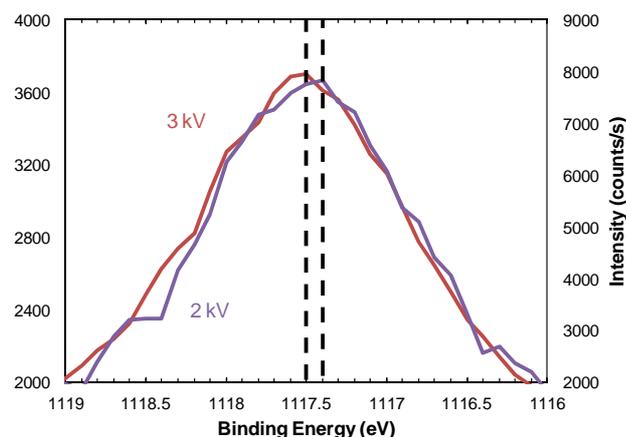


図5 Ga 2p 3/2 に相当するピークのカウント数の束縛エネルギー依存性

## 6. 今後の課題

今回の評価から、今後以下のように検討を進める必要があることが分かった。

1. 今回は、励起エネルギーを **3keV**、**2keV** の2種類のみデータを取得したが、今後、ショットキ接触部のバンドプロファイルを明らかにするためには、励起エネルギーを細かく変化させた測定が必要である。
2. また、ピークシフトが **0.1eV** 程度と小さい変化を評価する必要があり、エネルギー分解能と積算時間を増やして、ピーク束縛エネルギーがはっきりと同等できるようなデータを取得する必要がある。
3. 試料のチャージアップと思われる基準ピーク **Ni 2p 3/2** のシフトがあり、試料表面からチャージを逃がすようにしておく必要がある。
4. 実験的には励起エネルギーを変化させることで深さ方向にバンド曲がっている状況は確認できるが、深さに対する定量性を議論するために、励起エネルギーと **Ni** を通過して半導体中への侵入深さの関係を別途、解析等で得ておく必要がある。