

パワーデバイス用 InAlN / GaN 高電子移動度トランジスタの 硬 X 線光電子分光測定 Hard X-ray Photoelectron Spectroscopy Study of InAlN/GaN-HEMTs for Power Device

野村 健二, 滋野 真弓, 土井 修一
Kenji Nomura, Mayumi Shigeno, Shuuichi Doi

(株)富士通研究所
Fujitsu Laboratories Ltd.

障壁層 / チャネル層で構成される、次世代パワーデバイス用の高電子移動度トランジスタにおける、ヘテロ構造界面のバンド構造解析を試みた。障壁層に InAlN 膜、チャネル層に GaN 膜を用いた、InAlN / GaN 膜において、価電子帯スペクトルに加えて、InAlN 層のみに起因する In 3d_{5/2} 及び Al 1s、GaN 層のみに起因する Ga 2p_{3/2}、両方の層に起因する N 1s 内殻スペクトルを選定し、光電子の取出し角の異なる、複数の内殻スペクトルのピーク位置及びピーク形状を考慮し、同時解析を行うことで、ヘテロ構造界面のバンド構造解析に成功した。

キーワード： パワーデバイス、高電子移動度トランジスタ(HEMT)、硬 X 線光電子分光(HAXPES)

背景と研究目的：

近年、電気エネルギーの高効率利用が課題となっている。その解決策の 1 つが、現状の Si パワーデバイスに変わる、新しいパワーデバイスの導入である。パワーデバイスは、電気の変換・制御を行っており、性能向上により、変換時に無駄になる損失を大幅に低減できるため、電気の高効率利用が可能となる。窒化ガリウム(GaN)は、低損失・高効率な次世代パワーデバイス材料として期待され、世界中で開発が進められている。通常、図 1 に示したような、高電子移動度トランジスタ(HEMT： High Electron Mobility Transistor)と呼ばれる構造が採用されている。HEMT 構造デバイスでは、障壁層(InAlN)とチャネル層(GaN)の界面に 2 次元電子ガス (2DEG： Two Dimension Electron Gas)が発生し、これがデバイスを支配する。そのため、ヘテロ構造界面のバンド構造を知ることは、デバイス開発の促進に大きく貢献すると考えられる。しかし、実験室の X 線光電子分光(XPS： X-ray Photoelectron Spectroscopy)では、障壁層が 10 nm 程度と厚いため、この界面を観測することはできなかった。また、HEMT 構造デバイスでは、障壁層の厚さにより、2DEG の濃度が変わるため、実験室 XPS でよく行われているような、障壁層を薄膜化して測定することや、障壁層とチャネル層を個別に測定することも出来なかった。本課題の目的は、硬 X 線光電子分光 (HAXPES： Hard X-ray Photoelectron Spectroscopy)の、膜の深い領域まで観測可能な特徴を利用し、このヘテロ構造界面のバンド構造を評価することである。

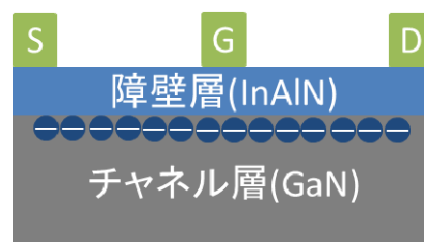


図 1. HEMT 構造。

実験：

試料には、Si 基板の上に、有機金属化学気相成長(MOCVD：Metal Organic Chemical Vapor Deposition)法で成膜した、In_{0.17}Al_{0.83}N(8 nm) / GaN(1 μm)膜を用いた。BL46XU で準備されている、Cu 製の標準試料ホルダに搭載して測定するために、8 mm × 4 mm サイズに切り出した。Cu ホルダ上にカーボンテープを貼り付け、切り出した試料を固定した。また、チャージアップを抑制するために、試料表面と Cu ホルダを、カーボンテープにより導通させた。SPring-8 の BL46XU に設置されている HAXPES 装置を用いて測定を行った。測定は、BL46XU の標準的な装置条件で行った。入射 X 線のエネルギーは 7.95 keV、検出器のパスエネルギーは 200 eV、スリット幅は 0.5

mm である。本試料の測定においては、上記のカーボンテープのみで、チャージアップは観られなかったため、中和銃は使用しなかった。Au $4f_{7/2}$ の束縛エネルギーを 84 eV としてエネルギー校正を行うことにより、運動エネルギー(KE: Kinetic Energy)を束縛エネルギー(BE: Binding Energy)に変換した。本課題においては、価電子帯上端(VBM: Valence Band Maximum)のバンド構造の深さ依存を得るために、VBM スペクトルに加えて、内殻光電子スペクトルの測定を行った。VBM 測定の場合、直接、VBM の情報を得ることが出来るが、障壁層とチャンネル層の情報が畳重し、其々の情報を分離して得ることは困難である。一方、内殻光電子スペクトル測定の場合には、直接 VBM の値を得ることはできないが、VBM とフェルミエネルギー(E_F)の位置関係により、内殻光電子スペクトルのピーク位置がシフトすることや、バンド曲りにより、ピーク形状が非対称になることが知られており、また、各層に固有の元素に起因するスペクトルを選択することで、各層毎の情報を分離して得ることが可能である。そのため、VBM スペクトルと内殻スペクトルを同時解析することで、HEMT 構造サンプルの詳細な VBM のバンド構造を得ることができると考えられる。内殻スペクトルは、ピーク強度が大きく、半値幅が狭く、ピーク形状が対称で、バックグラウンドが平坦という観点から選定を行った。本課題では、障壁層である InAlN 層のみに起因するスペクトルとして In $3d_{5/2}$ 及び Al $1s$ 、チャンネル層である GaN 層のみに起因するスペクトルとして Ga $2p_{3/2}$ 、両方の層に起因するスペクトルとして N $1s$ を選定した。VBM のバンド構造の深さ依存を詳細に解析するために、 80° 、 30° 、 15° 、 8° の 4 つの光電子の取出し角(TOA: Take Off Angle)で測定を行った。上記の TOA における光電子の脱出深さは、其々、TOA = 90° の場合と比較して、およそ 98%、50%、26%、14%に相当し、脱出深さが各ピークで約 1/2 になるように TOA の選定を行った。

結果および考察：

InAlN / GaN 膜の測定の前に、InAlN 膜、GaN 膜の其々の厚膜を用いて、VBM と内殻スペクトルのエネルギー差を決定するための測定を行った。一例として、GaN 膜の結果を図 2 に示す。図 2(a)は VBM の結果であり、図中の黒丸が測定データである。挿入図の赤線で示したように、直線近似により VBM を求めた。図 2(b)は N $1s$ 、図 2(c)は Ga $2p_{3/2}$ の結果である。測定したプロファイルを、Gauss、Lorenz、Voigt の 3 種類の関数でフィッティングを行った結果、Gauss 及び、Lorenz 関数においては、フィッティング精度が悪かったため、Voigt 関数を用いることとした。図中の赤線が Voigt 関数を用いたフィッティング結果であり、ピーク値より、其々の内殻スペクトルのエネルギーを求めた。本測定において、VBM-N $1s$ 及び、VBM-Ga $2p_{3/2}$ は、材料固有のパラメータであり、一度測定するだけでよい。同様にして、InAlN 膜においても、VBM-In $3d_{5/2}$ 、VBM-Al $1s$ 、VBM-N $1s$ を求めた。

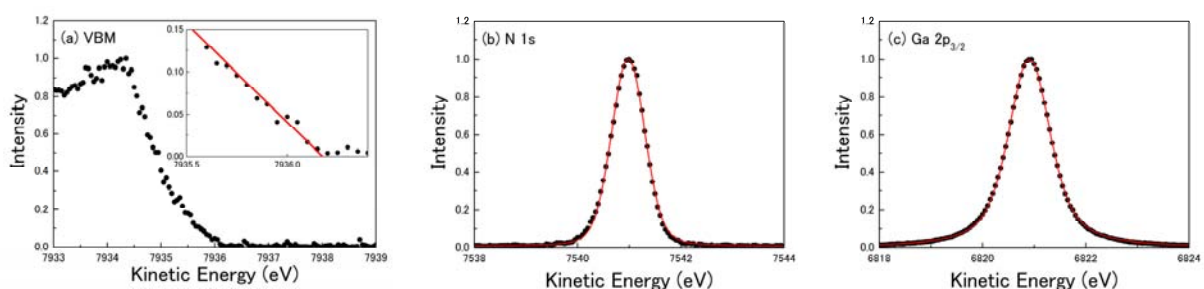


図 2. GaN 膜の測定結果。(a)VBM、(b)N $1s$ 、(c)Ga $2p_{3/2}$ の結果。

InAlN / GaN 膜の内殻スペクトル測定を行った。InAlN 膜のみに起因する In $3d_{5/2}$ の結果を、図 3 に示す。黒丸が測定データである。ピーク位置の TOA 依存は、ほとんど観測されていない。本結果は、InAlN 膜の VBM の深さ依存がほぼ一定であることを意味している。Al $1s$ においても、In $3d_{5/2}$ と同様の結果が得られているが、ここでは図を省略する。GaN 膜のみに起因する、Ga $2p_{3/2}$ の結果を図 4 に示す。TOA が小さい程、低 KE 方向にピークがシフトしている。本結果は、GaN 膜が InAlN 膜と接触することで、ヘテロ構造界面のバンドが曲がったことを反映している。なお、Ga $2p_{3/2}$ において、TOA = 8° の結果が無い理由は、InAlN 層の影響で光電子が脱出できず、Ga $2p_{3/2}$ スペクトルが観測されないためである。図 5 は、InAlN 膜と GaN 膜の両方の層に起因する、N $1s$

の結果である。TOA が小さい程、高 KE 方向にピークがシフトしている。本結果は、主として、InAlN 膜と GaN 膜における、VBM-N 1s の差を反映している。

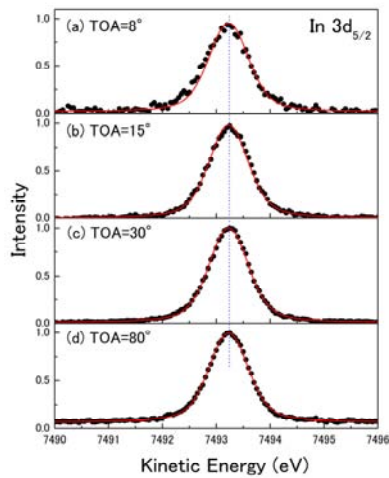


図 3. In 3d_{5/2} の結果。

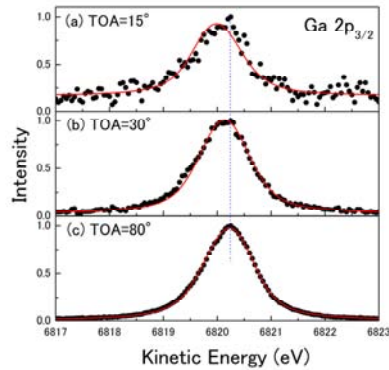


図 4. Ga 2p_{3/2} の結果。

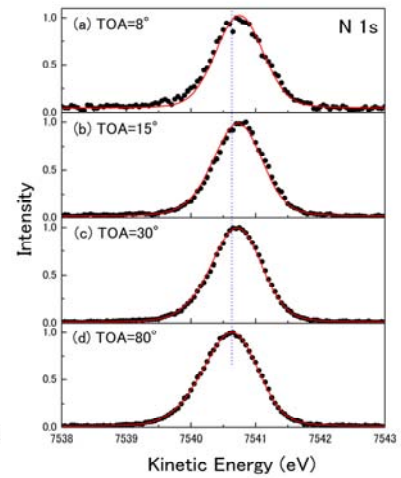


図 5. N 1s の結果。

図 3 から図 5 の全ての結果を用いてフィッティングを行うことにより、VBM の深さ依存を求めた。深さ毎に異なるピーク位置であるとして、非弾性平均自由行程(IMFP : Inelastic Mean Free Path) を考慮して、其々のピークを足し合わせることで、フィッティングを行った。ここで、IMFP は、TPP2M 式[1]より算出した。算出した概算値は、InAlN 領域では、In 3d_{5/2} は 11.24 nm、Al 1s は 9.81 nm、N 1s は 11.30 nm、GaN 領域では、Ga 2p_{3/2} は 8.98 nm、N 1s は 9.77 nm である。バックグラウンド補正に関しては、全ての測定データで、ピークの高エネルギー側と低エネルギー側で強度が等しかったため、定数値を除去するのみとした。各ピークのフィッティング結果を、図 3 から図 5 の赤線で示す。また、その結果得られたバンド構造を図 6 に示す。図 6 の青線がフィッティングの結果得られた、VBM の深さ依存であり、緑線が、バンドギャップ値を用いて算出した伝導帯下端(CBM : Conduction Band Minimum)の深さ依存である。ここで、InAlN のバンドギャップ $E_g(\text{InAlN})$ は $E_g(\text{InAlN}) = 4.70 \text{ eV}$ 、GaN のバンドギャップ $E_g(\text{GaN})$ は $E_g(\text{GaN}) = 3.43 \text{ eV}$ である。ヘテロ構造界面において、CBM が E_F より高 BE 側に沈み込んでおり、2DEG の発生及び、本 InAlN / GaN 膜がノーマリーオン状態であることが確認できる。以上のように、InAlN / GaN 膜において、各層に起因する内殻スペクトルを同時解析することで、ヘテロ構造界面のバンド構造を得ることに成功した。

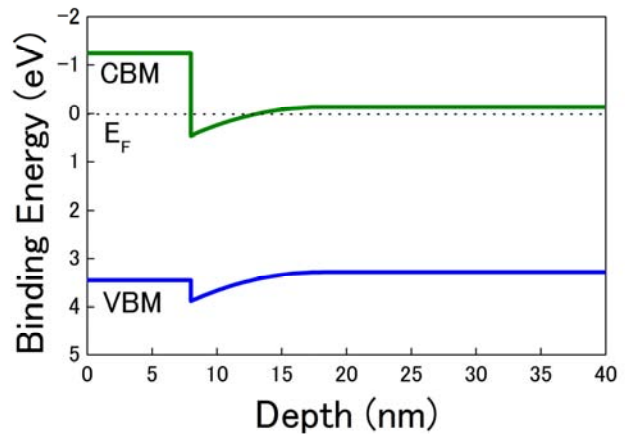


図 6. 解析の結果得られたバンド構造。

今後の課題 :

今後、パッシベーション膜やリセスが、ヘテロ構造界面に与える影響を明らかにする予定である。また、本手法をさらに、AlGaIn / GaN 膜など、異なる HEMT 構造サンプルに適用することを予定している。

参考文献 :

[1] S. Tanuma, et al., *Surf. Interface Anal.* **21**, 165 (1993).