

2012A1108

BL39XU

マイクロビーム XAFS による
窒化ガリウム系電子デバイスの界面状態解析
Analysis of Interface Condition
on GaN Based Electron Devices by Micro Beam XAFS

舘野 泰範^a, 飯原 順次^a, 米村 卓巳^a, 富永 愛子^a, 斎藤 吉広^a,
河内 剛志^a, 辻 幸洋^a, 大沢 仁志^b, 宇留賀 朋哉^b
Yasunori Tateno^a, Junji Iihara^a, Takumi Yonemura^a, Aiko Tominaga^a, Yoshihiro Saito^a,
Tsuyoshi Kochi^a, Yukihiko Tsuji^a, Hitoshi Osawa^b and Tomoya Uruga^b

^a住友電気工業 (株), ^b(公財)高輝度光科学研究センター
^aSumitomo Electric Industries, Ltd., ^bJASRI

窒化ガリウム系電子デバイス(GaN-HEMT)において、表面保護膜と GaN との界面状態の評価を目的として、マイクロビーム X 線を入射した斜出射 XAFS 法による評価を実施した。GaN 表面を O₂ プラズマ処理し、その表面に窒化膜(SiN)を堆積したサンプルで、SiN 堆積直後のものと、それを高温アニール処理したものを比較したところ、SiN 堆積直後には GaN 表面に Ga₂O₃ が存在するが、高温アニール処理によってこの酸化層が金属状 Ga に変化していることが確認できた。これは、過去に同じサンプルで行った硬 X 線光電子分光(HAXPES)評価と同じ結果である。

また、GaN-HEMT のエピ構造において、周辺に何も無い状態と比べ、金属電極に挟まれた領域では GaN 表面状態が変化しているらしいことが確認できた。この表面状態の変化は、SiN が GaN に及ぼす応力による結晶歪みの違いによるものと推定している。

キーワード： 窒化ガリウム系電子デバイス、GaN-HEMT、斜出射 XAFS、表面状態

背景と研究目的：

マイクロ波帯通信用の高出力デバイスでは、これまで砒化ガリウム系材料を用いたトランジスタ(GaAs-FET や GaAs-HEMT)が使用されることが多かったが、近年では、窒化ガリウム系電子デバイス(GaN-HEMT)の開発・製品化が活発に進められている。比較的周波数の低い L 帯～S 帯(0.5～4 GHz)では GaN-HEMT はすでに高出力デバイスの主流の座を占めており、より周波数の高い C 帯(4～8 GHz)以上でも GaN-HEMT の開発が盛んになっている。GaN-HEMT では、従来から、電流コラプスと呼ばれるドレイン電流の時間変動現象があることが分かっている。この電流コラプスは、高出力トランジスタの出力電力や効率を劣化させるため^[1,2]、その解決が必須の課題であるが、その原因は、表面保護膜と GaN との界面状態に起因するらしいと推測されてはいるものの、詳細なメカニズムはよく分かっていない。我々は、このメカニズムの解析を目的として、SPRing-8 の BL46XU を利用した HAXPES 評価を実施し、SiN/GaN 界面の Ga 酸化層(Ga₂O₃)が電流コラプス現象に関係しているらしいこと、その Ga 酸化層が高温アニール処理によって金属状 Ga に変化し、電流コラプスが改善されることを突き止めた^[3]。

HAXPES では実際のデバイスでの評価は不可能であったが、本実験では、マイクロビームを利用することにより、デバイスの電極間の微小領域を狙った評価を試みた。

実験：

表面保護膜と GaN との界面に着目した評価を実施するため、浅い出射角度の蛍光 X 線を検出する斜出射蛍光 XAFS 法を用いた評価を行った。出射発散角と垂直方向の検出効率を稼ぐ必要があるため 2 次元検出器(PILATUS)を使用した。ビームラインは BL39XU を使い、Ga の K 吸収端 (主に XANES 領域) を評価した。図 1 に測定系の写真と概略図を示す。試料面に垂直に X 線を入射し、X 線入射軸と垂直に検出器を配置し、試料表面すれすれに射出した蛍光 X 線を検出している。X 線入射点から検出器までの距離は 50 cm とした。また、バックグラウンド信号を除去するため、パスの入射部に鉛板を利用したスリットを設けている。

最終目的は GaN-HEMT の評価であるが、測定手法の妥当性を検証するため、構造と状態が既知のサンプルもいくつか準備した。具体的には(A) GaAs ウェーハ表面に自然酸化膜(Ga_2O_3)が生成されたもの、(B) GaN エピウェーハ表面に SiN 膜を 80 nm 堆積したもの、(C) GaN エピウェーハ表面を O_2 プラズマ処理し、SiN 膜を 4 nm 堆積したもの、および、(D) 同じ構造で、SiN 堆積後に還元雰囲気中、 600°C で 15 分間、高温アニール処理を行ったものである。また、最終目的である(E) GaN-HEMT デバイス、および、比較のために、(F) GaN-HEMT デバイスと同一ウェーハ上に設けた被測定領域周辺の $200\ \mu\text{m}$ 四方に電極が存在しないものも準備した。このうち、(C)と(D)は、過去に BL46XU にて硬 X 線光電子分光(HAXPES)による評価を実施したものである^[3]。

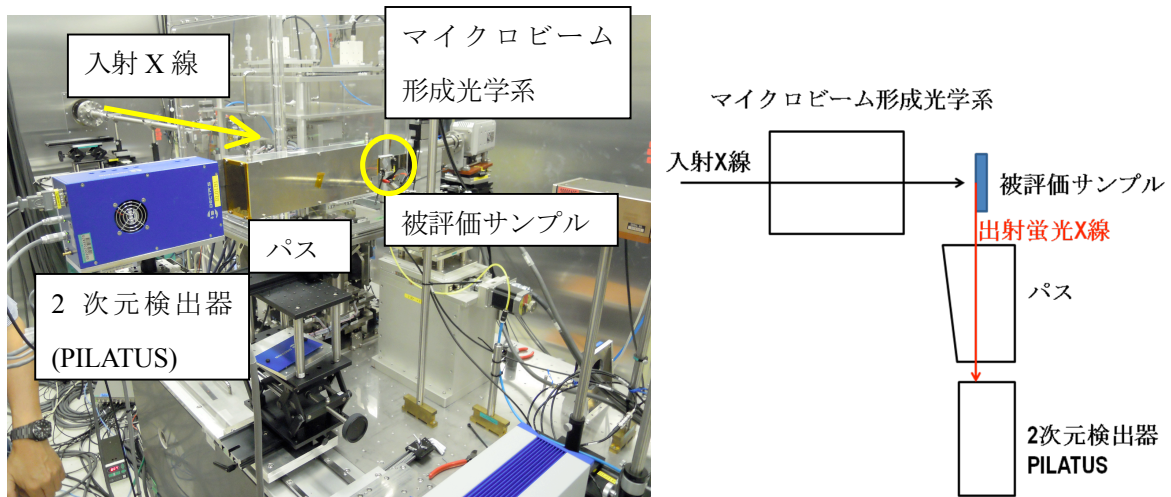


図 1. 測定系写真と、真上から見た測定系の概略図

結果および考察：

(1)測定方法の妥当性検証

(A) 図 2 に GaAs 表面に自然酸化膜(Ga_2O_3)が堆積したサンプルの XAFS スペクトルを示す。挿入図の横軸は検出器のチャンネルを示し、これは出射角度に対応しており、小さいほど高角度、すなわち界面近傍の情報となっている。PILATUS の 1 ピクセルは $172\ \mu\text{m}$ であり、サンプルから PILATUS までの距離が $50\ \text{cm}$ であるから、1 チャンネルあたり約 0.02° の角度に対応している。

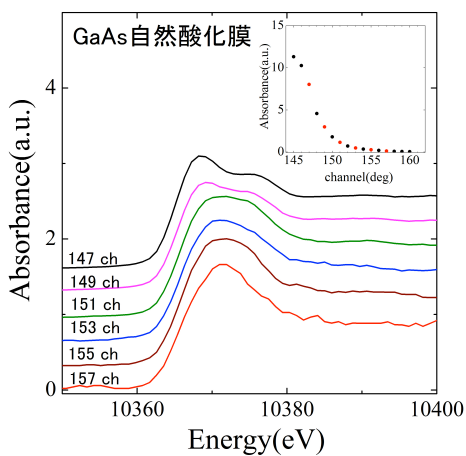


図 2. $\text{Ga}_2\text{O}_3/\text{GaAs}$ の Ga-K 吸収端スペクトル

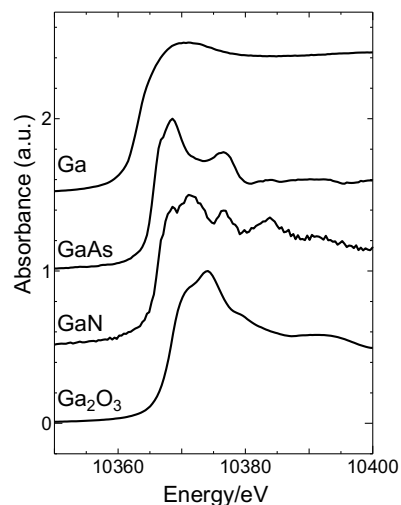


図 3. 標準試料の Ga-K 吸収端スペクトル

図 2 のスペクトルを、事前取得した標準試料のスペクトル (図 3) と比較すると、バルク(147 ch)では、 $10,368\ \text{eV}$ と $10,376\ \text{eV}$ に明瞭なピークを持つことから、GaAs 状態であることが分かる。これ

に対して、界面近傍(157 ch)では 10,374 eV のみにピークをもつことから Ga_2O_3 状態になっていることが分かる。バルクから界面にかけて上記のスペクトル変化が徐々に起こっており、 Ga_2O_3 が増加する様子が明瞭に捉えられていることが分かった。この結果から、今回の測定手法に問題が無いことが確認できた。

なお、上記測定において、大気中に被測定サンプルをおいた状態で実施したところ、X 線照射中にスペクトルが変化してしまう現象が観察された。これは、X 線強度が強いために大気中酸素がオゾン化し、試料表面の破壊（エッチングや酸化）をもたらすものと考えられた。そこで、X 線の入射部・出射部をポリイミド系フィルムの窓としたカバーで測定試料を覆い、内部に He ガスを充填させて測定を行ったところ、試料の破壊・変質が大幅に抑制されることを確認した。

(B) GaN エピウェーハ表面に 80 nm と、厚い SiN 膜を堆積したものを評価した。このサンプルは、GaN 表面に自然酸化物(Ga_2O_3)が存在しているが、XAFS スペクトルからは、 Ga_2O_3 の存在が確認できなかった。これは、SiN 層の膜厚が 80 nm と厚すぎるためと考えられる。

(C, D) 図 4 と図 5 に O_2 プラズマ処理を行った SiN/GaN 試料の XAFS スペクトルを示す。図 4 は SiN を堆積したままのもの、図 5 は SiN 堆積後に高温アニール処理を施したものである。いずれも、出射角大（バルク側）から出射角小（界面側）にかけて、図中に赤丸で囲った 10,366 eV 近傍のピークが低下していることが分かった。これらは、図 3 の標準試料のスペクトルと比較すると、界面に近づくにつれ、GaN 信号に、金属状 Ga もしくは Ga_2O_3 の信号が重なっていくことによるものと考えられる。これらのどちらの状態になっているか、標準試料スペクトルとの比較だけでは判断できないが、過去に実施した HAXPES 分析の結果から、図 4 のアニールなし試料は界面に Ga_2O_3 が存在し、図 5 のアニールあり試料は界面に金属状 Ga が生成しているものと推測できる^[3]。

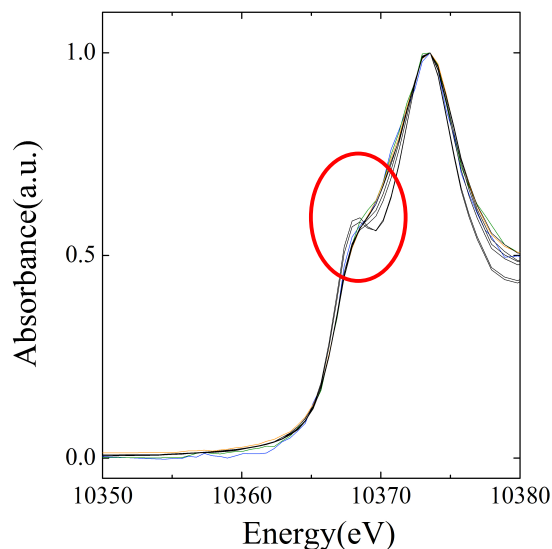


図 4. O_2 プラズマ処理を行った SiN/GaN 品（アニールなし）の XAFS スペクトル

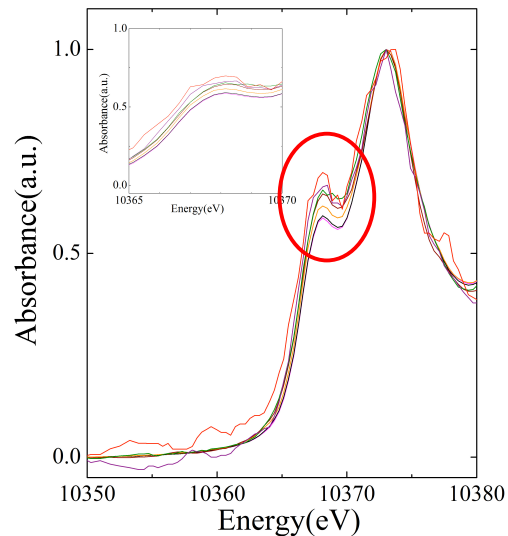


図 5. O_2 プラズマ処理を行った SiN/GaN 品（アニールあり）の XAFS スペクトル

そこで、GaN および、金属状 Ga、 Ga_2O_3 標準試料のスペクトルを用いたプロファイルフィッティングを行ったところ、上記推測を裏付ける結果が得られ、図 4 のアニールなしでは、界面近傍で Ga_2O_3 の存在比が約 50%であった。

結局、HAXPES の結果と同様、アニールによって界面状態が酸化物(Ga_2O_3)から金属状 Ga への変化することが確認できた。

なお、低出射角で出る蛍光 X 線は、SiN 膜表面と、SiN/GaN 界面での反射と屈折に伴う緩衝効果が生じ得る。この干渉効果は出射角によって異なることから、今回観測された出射角依存性が干渉効果による可能性も考えられるが、HAXPES での解析結果と合わせて考察することによって、今回の結果は

干渉効果ではないと考えている。ただし、出射角依存性の詳細な解析を進めるには干渉効果の定量的把握が不可欠であるため、今後の検討課題としたい。

(2) GaN-HEMT デバイスの SiN/GaN 界面状態評価

図 6 に、GaN-HEMT の Gate 電極と Drain 電極間(図 7 参照)の微小領域を狙ったスペクトル (赤線) と周辺 200 μm 四方の領域に電極がない状態 (大面積部: 黒線) の評価結果を示す。また、図 7 において Gate-Drain 間隔は 5 μm で、今回は、その中央 (Gate 電極端から 2.5 μm の点) を評価している。入射 X 線のビームサイズは 700 nm 程度である。

図 6 より、バルク側では電極間と大面積部のデータが重なっており、状態の違いは見られなかった。これに対して、表面側では、第 3 ピーク付近のスペクトル (図中で赤丸で囲った領域) にわずかな違いが得られた。この違いの原因として、GaN にかかるストレス (応力) の違いが想定される。半導体表面に堆積された SiN 膜が半導体にストレスを及ぼすことはよく知られており、今回の実験構造においても、GaN に圧縮側のストレスを及ぼしている。周辺に何も無い大面積部に比べ、近傍に電極がある場合、SiN から GaN にかかるストレスが変化し、GaN 結晶が歪むことにより Ga-K 吸収端のスペクトルに違いが生じたという説明が可能である。ただし、スペクトル差がわずかであるため、蛍光 X 線の干渉効果の影響も含めた解析は今後の課題である。

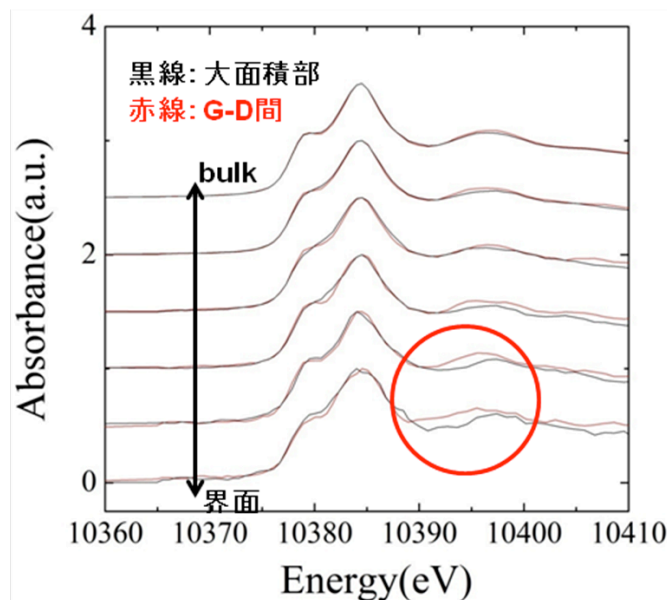


図 6. GaN-HEMT の Gate-Drain 電極間 (赤線) と、周辺 200 μm 四方に電極がない部分 (黒線) との比較

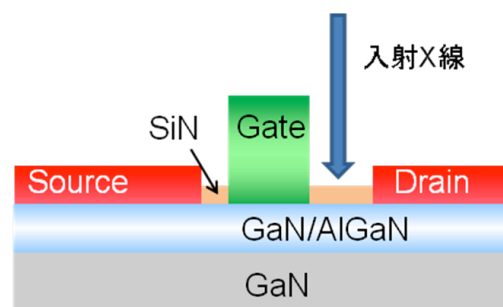


図 7. GaN-HEMT の断面模式図

今後の課題:

今回の測定では、電極間の場合、特に界面近傍での S/N 比低下が顕著であった。これは、出射蛍光 X 線の多くが近傍の電極に阻まれ、電極長手方向に並行に出射した蛍光 X 線しか検出されないため、信号検出効率が低下するためである。今後、データの蓄積時間やスキャン回数を増やす以外にも何らかの手段によって検出効率を改善する手法を検討したい。また、今回は時間の制限のために十分な評価ができなかった、実デバイスにパルス状に電圧ストレスを印加し、ストレス OFF 直後からの表面状態の時間変化を測定することも今後の検討課題としたい。

また、電極間と大面積部のスペクトルの違いの原因について、GaN 結晶の歪みによるものと推定しているが、他の手法 (回折法を使った逆格子マッピングなど) による検証も行いたい。

参考文献:

- [1] S. C. Binari, et al., *IEEE Trans. Electron Devices*, **48**, 465 (2001)
- [2] D. J. Meyer, et al., *Appl. Phys. Lett.*, **92**, 193505 (2008)

[3] 館野泰範、他, SPring-8 重点産業利用課題成果報告書 2010B1847

©JASRI

(Received: October 4, 2012; Early edition: April 28, 2015; Accepted: June 29, 2015;
Published: July 21, 2015)