

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(II)
Analysis of Interface Condition
On GaN Based Electron Devices by Micro Beam XAFS (II)

舘野 泰範^a, 飯原 順次^a, 米村 卓巳^a, 斎藤 吉広^a,
河内 剛志^a, 由比 圭一^a, 大沢 仁志^b, 宇留賀 朋哉^b
Yasunori Tateno^a, Junji Iihara^a, Takumi Yonemura^a, Yoshihiro Saito^a,
Tsuyoshi Kochi^a, Keiichi Yui^a, Hitoshi Osawa^b, 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)の、表面保護膜と GaN との界面状態の解析を目的として、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-HEMT に電圧ストレスを印加し、ストレス直後と、ストレスから時間が経った状態とを比較し、GaN と表面保護膜(SiN)との界面における Ga の状態が変化していることが分かった。ストレス電圧によって Ga の状態が変化し、時間とともに元の状態に戻っていることを捉えられたと推定しているが、この違いの原因については解析を継続中である。

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：

GaN-HEMT は、L~S 帯(0.5~4 GHz)においては、移動体通信基地局用高出力増幅器などの用途で幅広く使用されている。より高い周波数域(C~Ka 帯：4~40 GHz)においても研究開発が活発であり、マイクロ波帯からミリ波帯における高出力増幅器用としては、従来の GaAs 系に替わって主役の材料となっている。

GaN-HEMT においては、電流コラプスとよばれるドレイン電流の時間変動現象が、出力電力や効率を低下させることがよく知られており、これまでは、ゲートドレイン間の電界をフィールドプレートと呼ばれる遮蔽電極で制御することで、電流コラプスを低減させる手法が採用されてきた。しかし、この手法では寄生容量を増加させるため、高周波用デバイスには適用が難しく、これ以外の方法による電流コラプス低減が強く望まれている。そのためには、電流コラプスが起るメカニズムの詳細な解析が不可欠である。

電流コラプスは、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、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 GaN 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[1]。

さらに課題番号 2012A1108 において、BL39XU を用いたマイクロビーム XAFS 評価を行い、実際のデバイスの GaN/SiN 界面状態の解析を行った。この時の実験では、バックグランド信号が高くその除去に苦慮したことから、今回、スリットの利用、パス内への He 充填などの対策を施しその効果を確認した。また、デバイスにパルス状に電圧ストレスを印加し界面状態のストレスによる変化を評価した。

実験：

表面保護膜(SiN)下の SiN/GaN 界面に着目した評価であるため、測定方法は、浅い出射角度の蛍光 X 線を検出する斜出射蛍光 XAFS 法とした。2012A1108 と同様、出射発散角と垂直方向の検出効率を稼ぐ必要があることから 2次元検出器(Pilatus)を使用し、BL39XU を用いて GaN の K 吸収端(主に XANES 領域)を評価した。前項に述べたようにバックグランド信号レベルを下げるこ

とを目的として、パスの入射部にスリットを設置し、SiN/GaN 界面以外の散乱 X 線が検出器に入射することを防いでいる。またパス内には He を充填し、パス内での X 線散乱を低減させた。

測定試料は GaN-HEMT に SiN 保護膜を堆積したもので、Gate 電極と Drain 電極の間にマイクロビームを入射して、蛍光 X 線を測定した。ここで、ビームサイズは約 $0.7 \mu\text{m}$ であり、GaN-HEMT の Gate-Drain 電極間隔は $5 \mu\text{m}$ である。さらに、GaN-HEMT に電圧ストレスを印加し、SiN/GaN 界面状態の時間変化を評価するためチョッパーを設置し、所望の時間間隔、時間幅で X 線が入射するようにし、また、それに同期させて GaN-HEMT へのストレス電圧を ON/OFF させている。今回の実験はバンチモードが D モードであったが、蓄積リング 4 周回に一回、X 線が入射されるように設定した。すなわち、入射 X 線周期が $19.16 \mu\text{s}$ となっている。また、D モードの連続バンチとその後のシングルバンチが 2 つ入射されることになり、試料への X 線照射時間は約 $2 \mu\text{s}$ となっている。以上の X 線入射周期に同期させて、ストレス電圧を $2 \mu\text{s}$ 印加した。X 線入射とストレス電圧印加のタイミングは、ストレス電圧印加直後に X 線が入射される場合と、ストレス電圧印加の直前に X 線を入射する 2 条件とした。なお、ストレス電圧はドレイン電圧 (V_{DS}) を 20 V 、ゲート電圧 (V_{GS}) を -5 V とし、ストレス印加時間以外は通常バイアスである $V_{\text{DS}}=5\text{V}$ 、 $V_{\text{GS}}=0\text{V}$ に設定した。

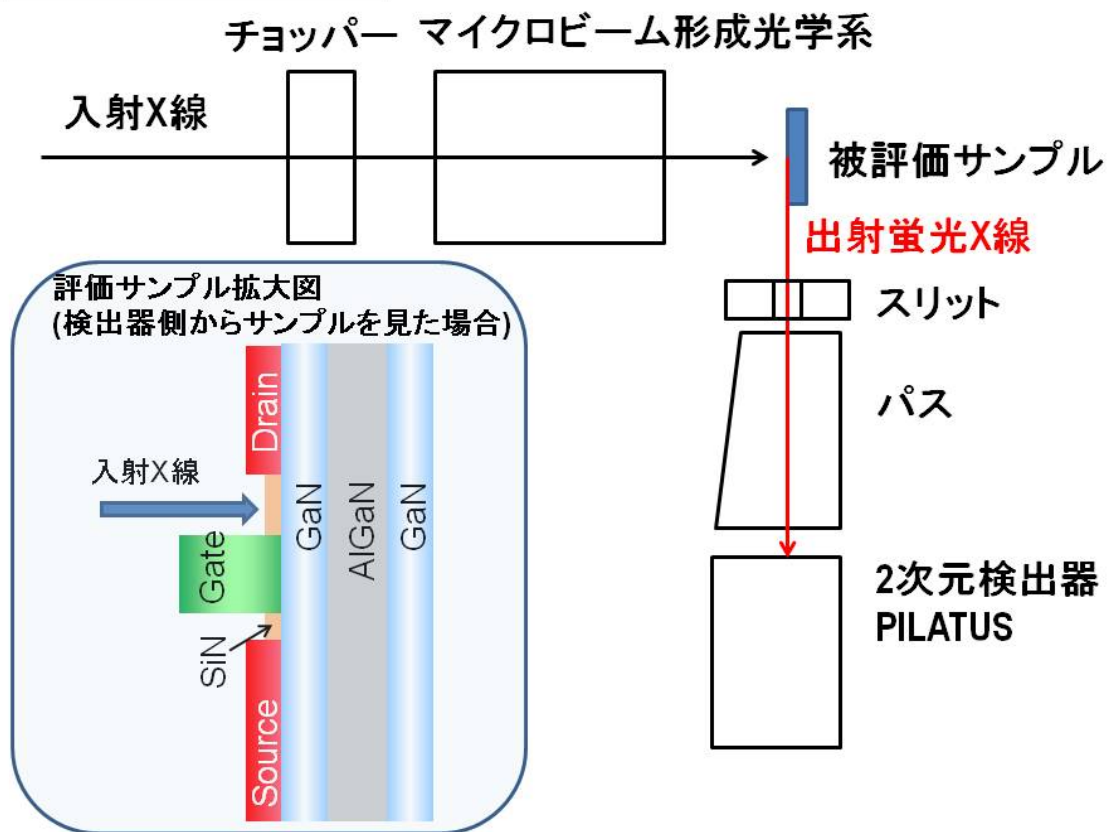


図 1. 測定系の概略図

結果と考察：

まず、バックグラウンド信号レベルを低減させるために設置したスリットの効果を確認した。なお、挿入したスリットの開口幅は 0.5 mm である。取り出し角が試料の影となるマイナス側となるバックグラウンド領域で、スリットがありの場合となしの場合とを比較したところ、スリットを挿入することで信号レベルが $1/3$ に低減していた。また、スリットを挿入することで構造がほとんど分からないスペクトルになっていた。これは、スリットなしの場合、本来の浅い取り出し角の信号に GaN バルクからの深い角度の信号が混じってしまうためと考えられる。スリット挿入により、本来の信号以外のものを効果的に遮蔽できることが確認できた。

つぎに、GaN-HEMT デバイスにストレスを周期的に ON/OFF させ、SiN/GaN 界面状態を評価した。図 2 に GaN の K 吸収端の XAFS スペクトルを示す。なお、2次元検出器の 1 素子のサイズは

172 μm であり、今回の実験では試料-検出器間距離を 30 cm に設定した。よって、今回の実験における角度分解能(1チャンネルあたりの角度)はおおよそ 0.03° となっている。

前述のように、ストレス印加と X 線入射のタイミングを 2 条件としているが、青線はストレス印加直後に XAFS を測定したもので、この場合、ストレス印加によって SiN/GaN 界面が変化しているものと推定される。それに対し、赤線はストレス印加直前であるが、これは、その前のストレスが印加されてからしばらく時間がたった状態であり、ストレスによって変化した SiN/GaN 界面状態が元通りに回復した状態と考えられる。なお、別途、ストレス印加直後からのドレイン電流変化を詳細に評価する測定を行っているが、その結果からおおよそ 10 μs で電流値が回復することが分かっている。そのため、今回実験の 20 μs ではストレスによって変化した状態が回復していると考えてよい。

図 2 ではチャンネル数が大きいものがバルクであり、小さいものが SiN/GaN 界面となっている。図 2 から分かる通り、バルクではスペクトルが重なっており Ga の状態に違いがないことが分かる。徐々に界面に近づくにつれ 2 つのスペクトルに僅かに違いが生じてくる。これは、ストレス印加によって SiN/GaN 界面状態が変化し、それが時間とともに元に回復したことを示していると推定されるが詳しくは解析中である。

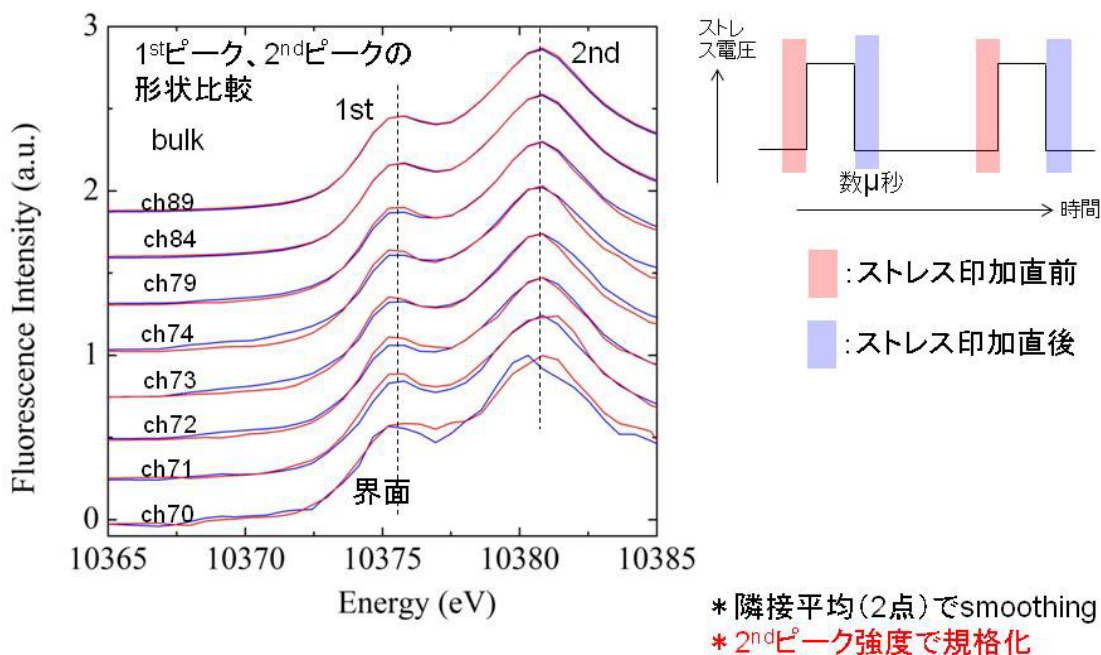


図 2. ストレス印加による SiN/GaN 界面状態の変化

今後の課題：

2012A1108 では、SiN/GaN 界面の Ga_2O_3 層の存在を、標準試料によって取得した GaN と Ga_2O_3 のスペクトルを用いてスペクトルフィッティングによって定量的に解析することができた。今回の実験では、図 2 に示すとおり、界面近傍でのスペクトルの差が僅かであり、またそもそも標準試料を用意できる状態と GaN との混合かどうか分からないため、同様な解析は困難である。そのため、第一原理を用いた状態推定を進めている。

また、低出射角で射出する蛍光 X 線は、SiN 膜表面と、SiN/GaN 界面での反射と屈折に伴う干渉効果が生じうる。この干渉効果は出射角によって異なる事から、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。干渉効果の定量的な解析は今後の検討課題としたい。

参考文献：

[1] 舘野泰範, 他, SPring-8 重点産業利用課題報告書 2010B1847