



## PCOR-SIMS による Si 基板上 GaN HEMT エピ構造の解析

Temel H. Buyuklimanli ([temel@eag.com](mailto:temel@eag.com)), Charles W. Magee, Ozgur Celik, Wei Ou,  
Andrew Klump, Wei Zhao, Yun Qi and Jeffrey Serfass  
810 Kifer Road, Sunnyvale, CA 94086 USA  
+1.408.530.3500

AlGaIn/GaN HFETs は活発な研究の対象となっており、高周波帯域における高電圧、高出力動作の用途として生産され始めています。類似の GaAs 系デバイスと比較して、GaN は速いピーク電子速度、優れた熱安定性、広いバンドギャップを有していることから、マイクロ波パワーデバイスのチャネル材料にとっても適しています。更に AlGaIn/GaN HFETs の性能には、 $10^{13}/\text{cm}^2$  のシートキャリア濃度を有する二次元電子ガス (2DEG) を形成する能力があります。これらのデバイスは、一般的に高電子移動度トランジスタ (HEMTs) と呼ばれます。

製造における関心時は 2DEG 層を成長する基板にあります。GaN 基板上の成長は、GaN 基板と成長層間で正確な格子整合が得られるので理想的です。このことは、基板から 2DEG を分離するために成長する、デバイスの活性領域の欠陥を回避するための GaN バッファ層を非常に厚くする必要がないことを意味します。残念ながら現状では、コストの観点から、GaN 基板ではデバイスを商業的に実現可能にするために十分に大きなサイズの基板を用いて成長させることができません。そのために代替の基板を使用する必要があります。SiC 単結晶基板については、その電気的および熱伝導特性からの理由もありますが、主な理由は GaN との格子不整合率が 3% とよいことです。しかし、それは同様にとても高価になります。サファイア基板は安価ですが、熱伝導性が悪く (高出力デバイスでは欠点になります)、高い格子不整合率 (13%) を有しています。従って、すでに確立された製造技術とプロセス技術に関する膨大な基盤のあるシリコンが可能性のある基板として多くの注目を集めています。しかし、Si は GaN に対して格子整合性が悪く、Si 基板上に成長した GaN 層には多くの欠陥が生じます。そのために、Si 基板のプロセスでは、2DEG を形成する領域の欠陥密度を低減するために、Si 基板と 2DEG を形成する層の間に、主に AlGaIn から構成される厚いバッファ層を必要とします。この例は、図 1 および図 2 に示されています。

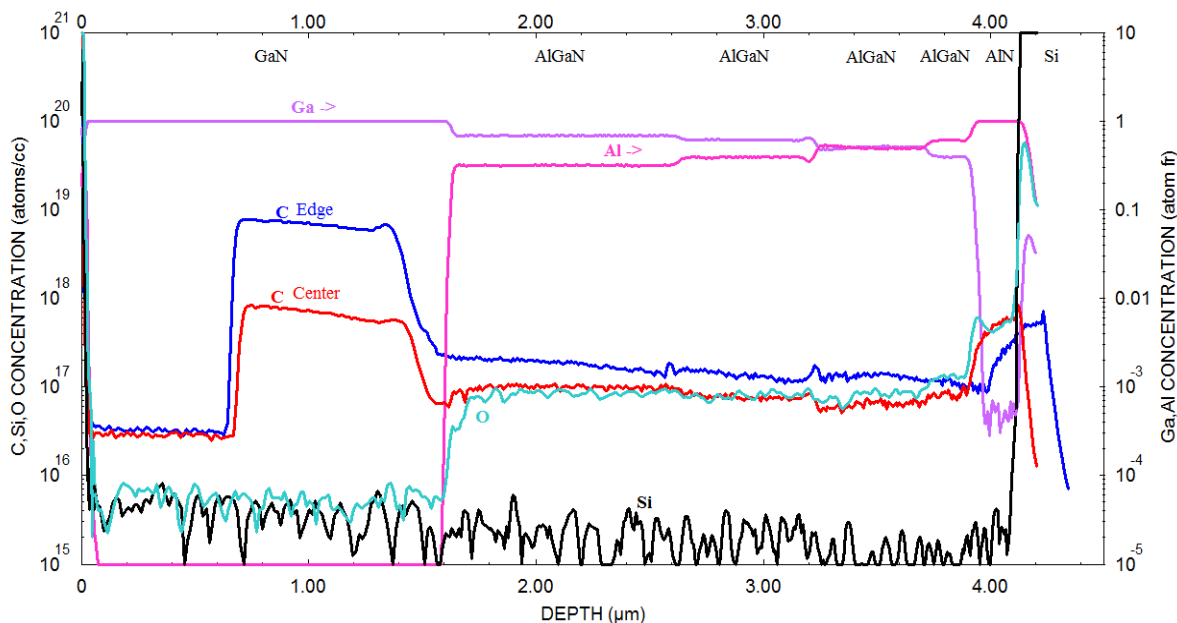


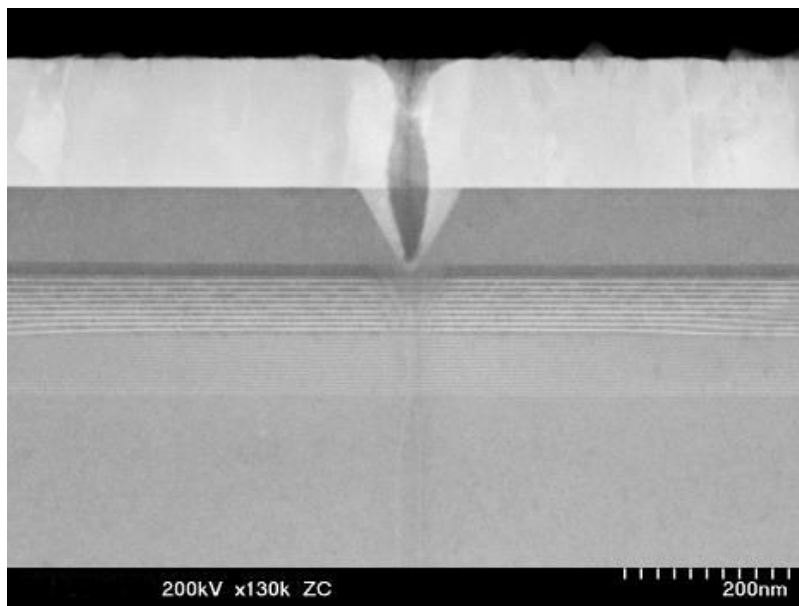
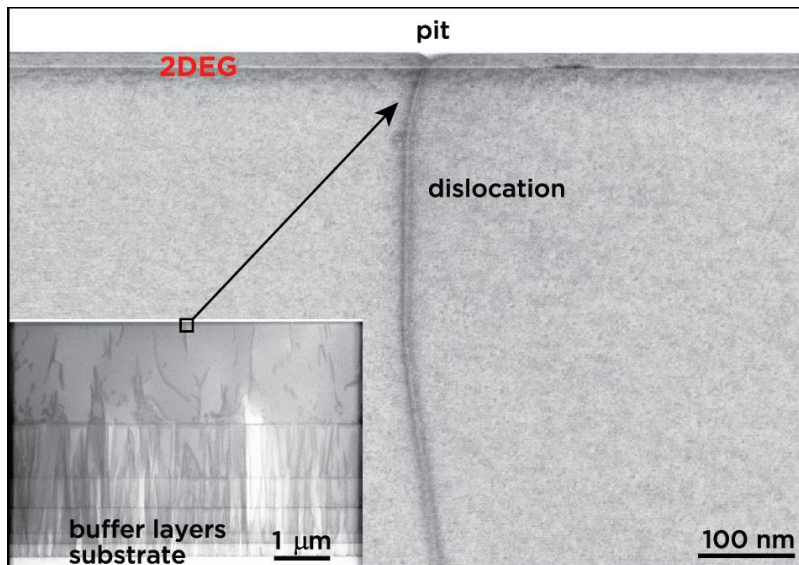
Figure 1. Center and Edge comparison of a HEMT epi measured by PCOR-SIMS<sup>SM</sup>

図1は直径150mmのSiウェハ上に成長させたGaN HEMT構造全体のPCOR-SIMSによる深さプロファイルを示しています。(この図の中の2DEG領域は、表面近傍に存在するために検出できていませんが、後述致します。)この例では、バッファ層はAlN層から始まります。この材料は、下地Siと良い格子整合性ではありませんが、基板から上の層を分離するための絶縁層になっています。また、このAlN層は、引き続き低いAlレベルのAlGaN層の連続層を成長させるためのシード層としても機能します。Al含有量の減少は、図2の左下のTEM写真にこの試料の写真が示されているように、GaNバリア層を成長するまでに、欠陥密度を許容できるレベルに低下させます。PCOR-SIMSによる解析では、様々なAlとGaの組成比率と膜厚を正確に求めることができます。PCOR-SIMS<sup>SM</sup>に関する詳細は以下のサイトをご覧ください。

<http://www.eag.com/documents/BRO16.pdf>

図1は、GaNバリア層の下半分に炭素がドーピングされていることを示しています。この炭素ドーピングは、AlGaNバッファにおける意図しないn型不純物(図に示すように主にSiとO)を補償し、破壊電界強度の増大に影響します。また、この図はウェハ端部におけるGaN部分の炭素ドーピング量が、中心部に比べ10倍高い濃度であることを示しています。このことから、150mmのウェハ上の異なる位置では、バリア層の電界緩和特性が異なり影響が生じることが予想されます。一方、バッファ層のC含有量と厚さについては、ウェハの中心部と端部で類似していることがわかります。バリア層中の炭素レベル(並びにSiと酸素レベル)は、過度に高いレベルになるとデバイスのリークにつながるため重要です。

2DEGの近傍では、炭素ドーピングが垂直リーク電流を促進し、2DEGチャネル電子のキャリア密度およびキャリア移動度の低下を引き起こすことがあり、オン抵抗と電流コラプスの原因になることが報告されています。これらのすべての事柄は、デバイスの性能と信頼性にとって有害なものです。しかしながら、2DEGとデバイス特性に炭素ドーピングは有害な特性があるにもかかわらず、活性層（AlNのスパイクとAlGaInバリア層）中の残留炭素レベルを扱っているレポートもあります。これは、おそらくこの表面近傍領域の炭素濃度の測定が、バッファ層の奥深くに由来する貫通転位に起因する表面ピットによって大きく阻害されるためと思われます。（図2参照）



**Figure 2 Cross sectional TEM images of generation of surface pits (left) and the higher magnification of the details (right)**

炭素は、空气中に露出された試料表面に吸着し、ピット全体がスパッタされるまで SIMS のスパッタリングプロセスによって完全に除去されることはありません。この見かけ上検出される深い炭素プロファイルは、2DEG 領域内の本来の重要な分布を完全に不明瞭にしています。

この問題を回避するために、EAG では、このように炭素プロファイル (図 3) の深いテールを排除し、表面汚染 C の大部分を除去する独自の表面洗浄手順を開発しました。この手法によって 2DEG 直上の AlGa<sub>N</sub> バリア層内だけでなく、2DEG 直下の AlN スパイクにおいても真の C 濃度を測定することができます

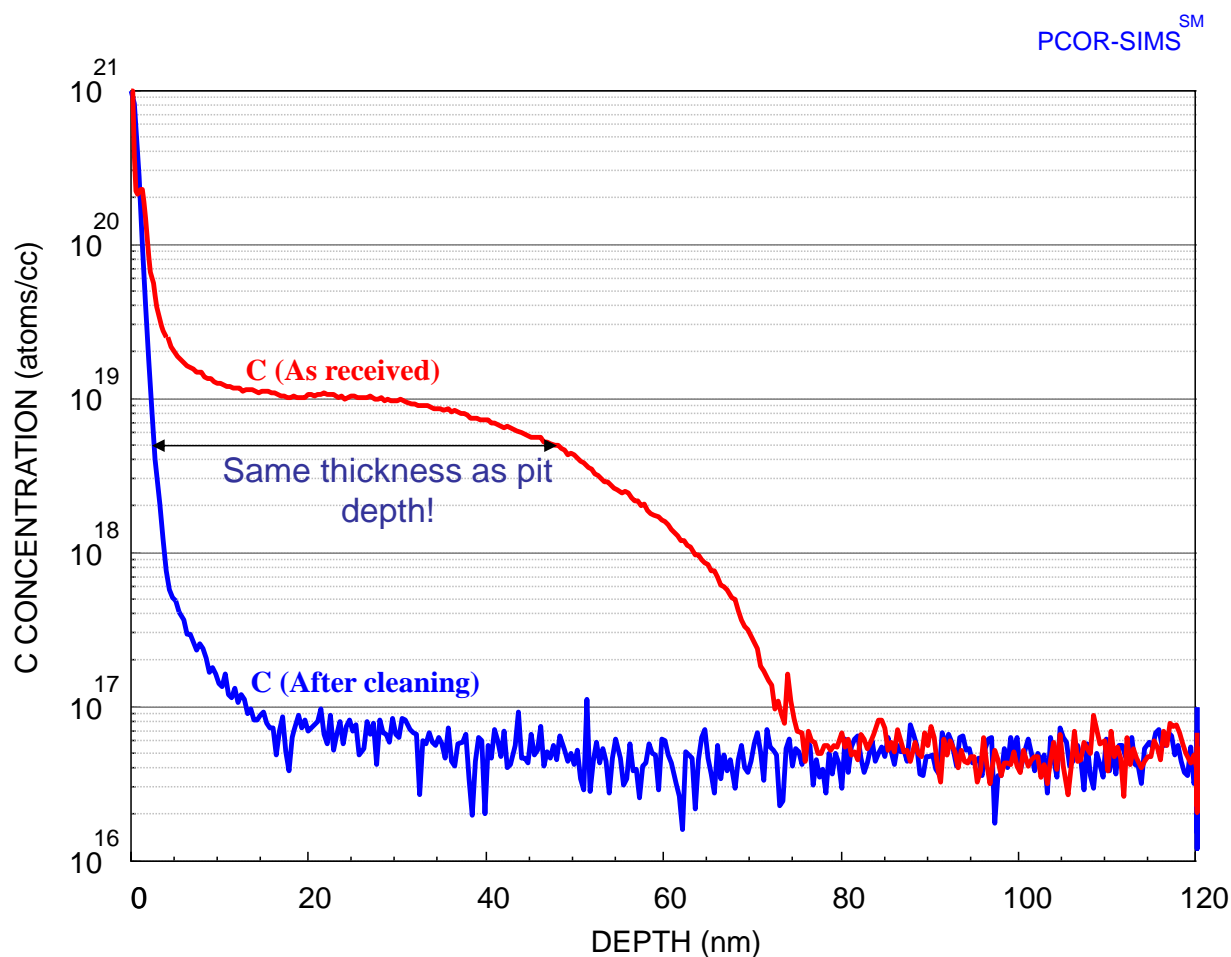


Figure 3 SIMS profiles for C in the 2DEG region as-received (red) and after cleaning (blue)

バッファ層には、Fe、Mg をドーピングすることができます。これらは、SIMS で非常に低い検出下限で測定することができます（図 4）。GaN バリア層の内部の Fe プロファイルのピークに注意して下さい。このピークはウェハのエッジ部には存在していないので、基板全体に均一な層を成長させる際の別の問題を指摘しています。

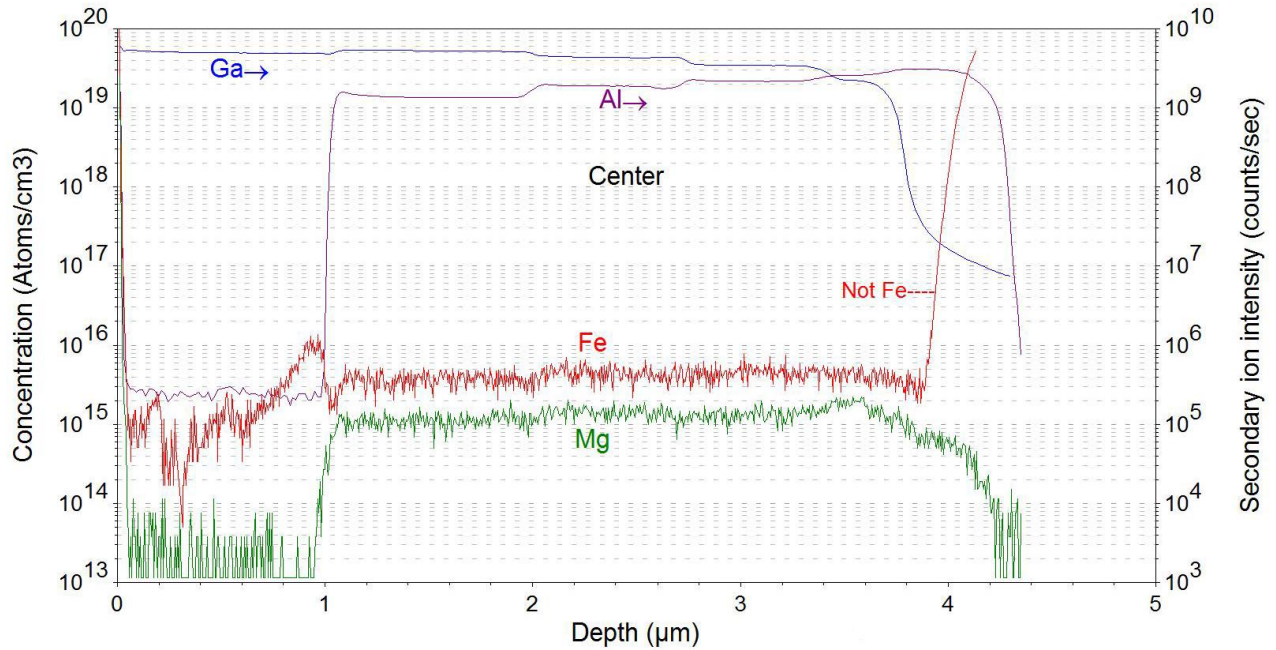


Figure 4. Fe and Mg impurity SIMS measurements in HEMT epi .

また、GaN バリア層における非金属不純物レベルを制御することが重要です。このデバイスはドーパントが存在しない状態で機能するため、2DEG 直下 GaN 中では、できるだけ低い Si のレベルにすることが重要です。図 5 に示されるように、EAG では約  $5 \times 10^{14}$  atom/cm<sup>3</sup> の Si の検出限界を得ることができます。この値は、図にみられる 2DEG 下の  $2 \times 10^{15}$  atom/cm<sup>3</sup> の Si レベルを把握するのに十分低い値です。

図 5 は GaN バリア層における H 不純物のレベルを示しています。H はデバイスの信頼性に悪影響を与えるため、できる限り低い H レベルに維持されます。しかし、この例ではバリア層の炭素ドーピング部分における H レベルが少し上昇していることがわかります。これは炭素ドーピングに使用される原料ガスから生じていると思われる。

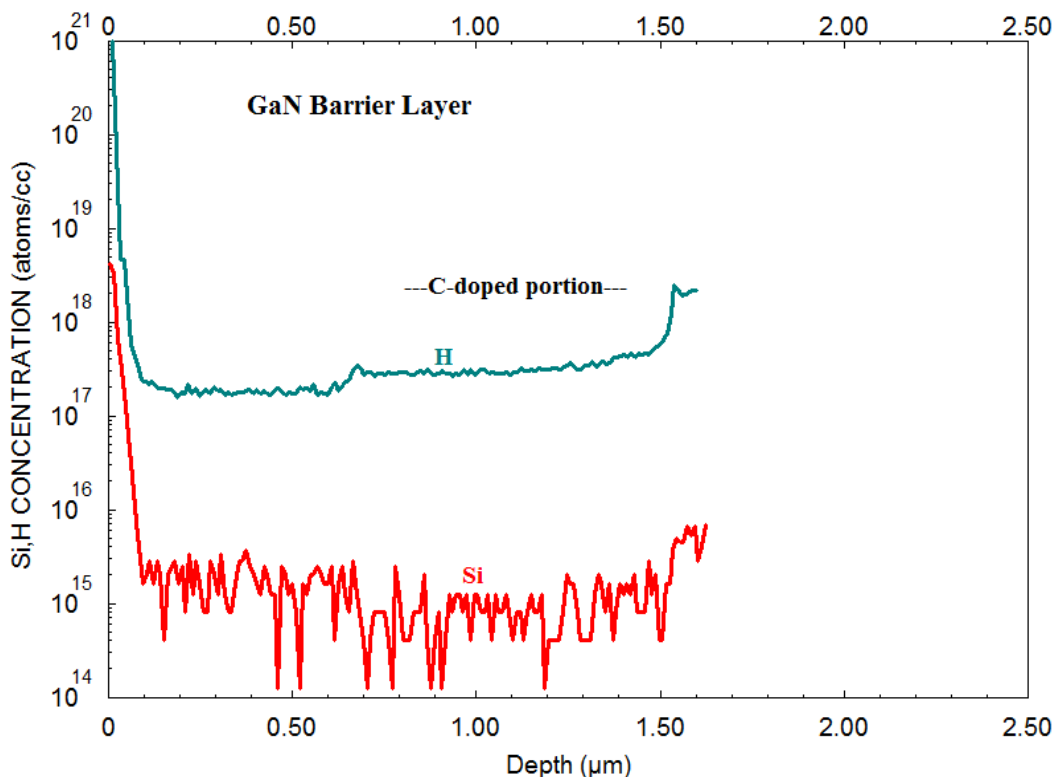


Figure 5 Low detection limit measurement of H and Si in GaN Barrier layer of a HEMT epi.

この構造では、表面に近い領域がデバイス内の電流の流れを作る二次元電子ガスが形成される場所です。薄い上部ドーピング AlGaIn 層とアンドーピング GaN 層間の伝導帯の不連続性により 2DEG が形成され、電子が蓄積された量子井戸が形成されます。このアクティブ領域は極めて薄いため (20-30nm)、細心の注意を払った SIMS により正確に測定することができます。図 6 は、HEMT の 2DEG 形成領域における PCOR-SIMS プロファイルを示したものです。C, H, O 及び Si 不純物と同時に、最上層の AlGaIn の位置と濃度を示す Al が表示されています。

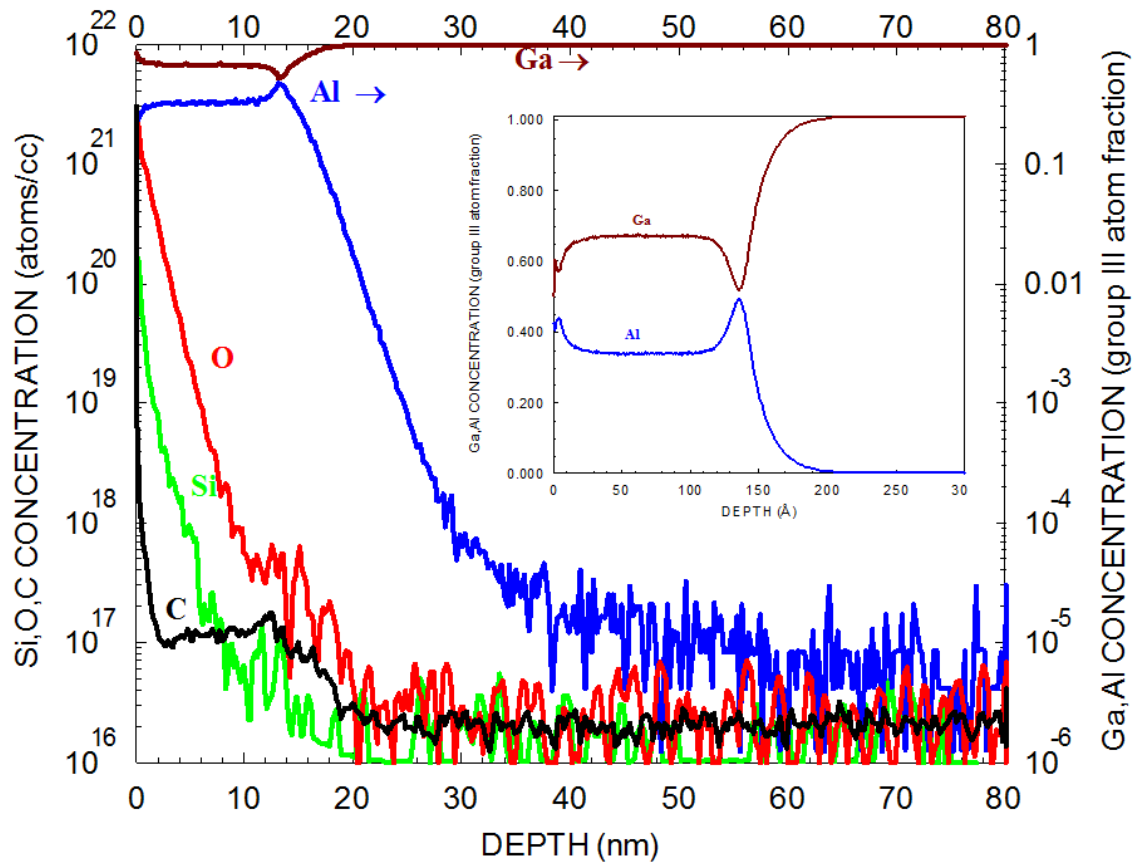


Figure 6 Channel region higher depth resolution PCOR-SIMS profiling of a HEMT device.

AlGa<sub>N</sub>層はこの構造の最表面にあるので、常に空気中に露出されています。そのため表面汚染の影響を最小化するための措置をとることが重要です。図6では、試料表面に存在する炭素をEAGで開発した独自の洗浄方法で除去することで、試料表面から15nmの領域のAlGa<sub>N</sub>層中のC濃度が1-2e17atoms/cm<sup>3</sup>レベルで存在することを示しています。

また、図6は別の重要な情報も示しています。それはAlGa<sub>N</sub>バリア層の厚さのことで、この層に生じるゲート電位は2DEGの電子密度をコントロールする役割を持ち、それによってデバイスのコンダクタンスが制御されます。図6の中のリニアプロットにこの層の厚さが示されています。

図7は、図6と類似のプロファイルの一部についてリニアスケールで表示し、同じ領域の断面TEM写真の上に重ねたものです。AIのプロファイルはAlNデルタ層の位置を示しています。この構造は、AlGaIn層のドナーによるクーロン散乱を緩和することにより2DEGのキャリア移動度を向上させるための構造です。TEMとSIMSを重ねた図から、AlNデルタ層の幅がAlGaIn層の一定濃度の上側にみられるAIプロファイルの半値幅にほぼ一致していることがわかります。しかしながら、図3にみられる表面ピットによって生じたGaN側に伸びる裾の影響によって、それがわかりにくくなっています。

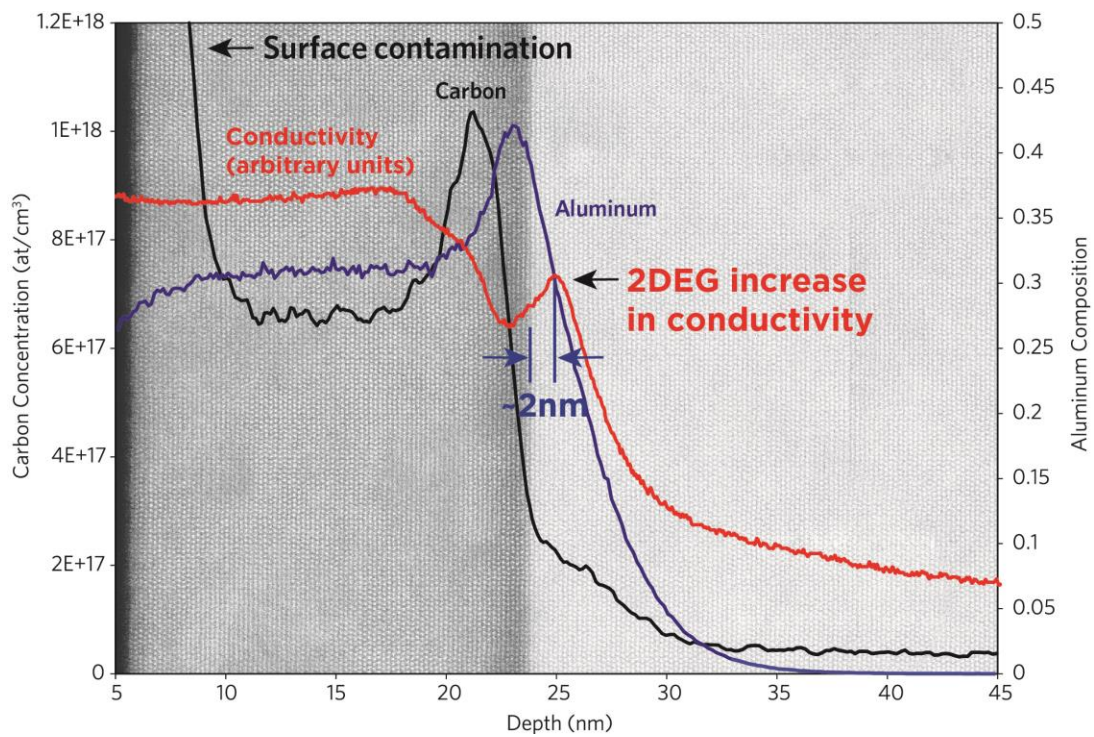


Figure7. Overlay of SIMS and cross-section TEM showing detailed analysis of HEMT channel region with an arbitrary conductivity change curve.

Cプロファイルについても、正確な界面（AIプロファイルによって示された位置）に対するドーピング領域を示すためにプロットされています。TEMではこのCを検出することができません。EDXやEELSでもこのCは検出することはできません。

また、各深さ位置における表面電位の影響を反映した、表面導電性を推測することが可能なプロファイル（赤色）を示します。



バリア層内部のホールの蓄積によって導電性が減少し、その領域を通過した後に再び導電性が回復する深さについてこのデータから知ることができます。

以上、本アプリケーションノートでは、データの各深さについて補正が行われる SIMS (PCOR-SIMS) が GaN HEMTs 構造における正確な主成分濃度とドーパント濃度を定めるための有効な方法であり、エピタキシャル層の成長条件の最適化や故障解析の方法として利用できることを示しました。

ご質問などがございましたら、お気軽にエバンス・アナリティカル・グループ (ナノサイエンス株) にお問い合わせ下さい。