

窒化ガリウム (GaN) に注入した微量元素の分布と電気的狀態をナノスケールで可視化 ～p型 GaN 半導体作成のメカニズム解明と GaN デバイス量産化に向けて大きく前進～

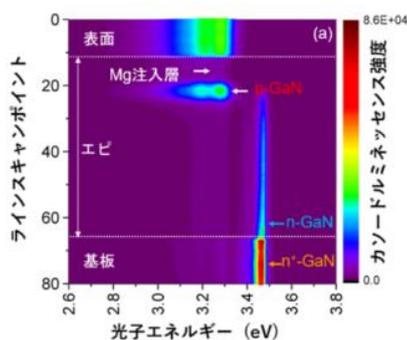
配布日時：2019年5月20日14時

解禁日時：2019年5月22日17時

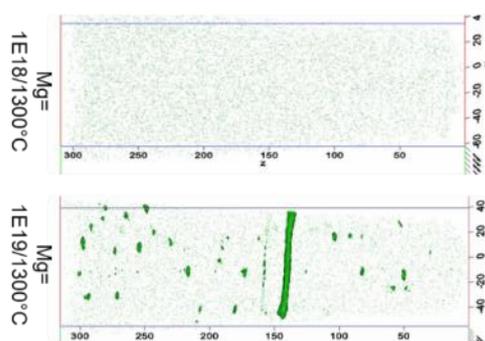
国立研究開発法人 物質・材料研究機構 (NIMS)

概要

1. NIMS は、窒化ガリウム (GaN) ^{※1} に注入した微量なマグネシウム (Mg) の分布や電気的狀態を、ナノスケールで可視化することに世界で初めて成功しました。さらに本手法によって、Mg イオン注入により GaN が p 型半導体に変化するメカニズムの一端が明らかになりました。GaN パワーデバイスの量産に向けて、最適な Mg 注入条件の探索に大きく貢献することが期待されます。
2. 省エネ化の切り札となる“GaN パワーデバイス”実現のためには、n 型、p 型の GaN 半導体を作製する必要があります。特に p 型 GaN 半導体の量産については、GaN ウエハに Mg イオンを注入して熱処理することで p 型を形成する方法が有力視されているものの、添加する Mg の濃度や、熱処理の温度条件によって GaN の内部で Mg の分布や電気的なふるまいがどのように変化しているのか、ナノスケールで評価する方法がなく、p 型が形成されるメカニズムが不明のため、GaN 素子量産に向けた大きな壁となっていました。
3. 今回、Mg イオンを注入した GaN ウエハを斜めに研磨した試料にカソードルミネッセンス (発光分布評価) ^{※2} 法を用いることで、表面付近では Mg は活性化されておらず、表面から数十 nm のところで活性化していることがわかりました (図左)。さらに、アトムプローブトモグラフィー^{※3}を用いることで、Mg の濃度が高くなると、温度によっては Mg が円盤状・ロッド形状に析出することがわかりました (図右)。これら最新の顕微法による解析情報を組み合わせることで、Mg を注入した表面付近では、温度条件によっては Mg が析出して活性化されない可能性があることが明らかとなりました。
4. 本研究成果により、イオン注入での p 型 GaN 層実現に向けた重要な指針を得ることができました。さらに本手法は、今回のように均一なウエハ上の不純物分布の解析だけでなく、さまざまな構造を持った GaN デバイス材料にも適用でき、高性能な GaN デバイス開発を加速することが期待されます。
5. 本研究は、NIMS 技術開発・共用部門 窒化ガリウム評価基盤領域アトムプローブ・CL/EBIC・グループ、大久保忠勝グループリーダー、陳君主任研究員らの研究チームと、富士電機(株)技術開発本部先端技術研究所材料基礎技術研究センター江戸雅清先端材料技術研究部長らの研究チームによって、文部科学省事業「省エネルギー社会の実現に資する次世代半導体研究開発 (評価基盤領域)」の一環として行われました。
6. また、本研究成果の一部は、日本応用物理学会発行の Applied Physics Express 誌にて2019年4月11日にオンライン掲載されました。



Mg イオン注入 GaN のカソードルミネッセンス分析結果



アトムプローブトモグラフィーで得られた Mg イオン注入 GaN 中の Mg の 3 次元原子マップ

研究の背景

半導体結晶の格子歪や欠陥などの結晶性は、製品となる半導体デバイスの特性に影響を及ぼします。そのため、良質な結晶性を有する半導体ウエハを作製するために、精力的に研究、開発が行われています。半導体デバイス製造の分野では、デバイスのサイズが小さくなるにつれ 転位や欠陥を観察し、その結果を結晶製造にフィードバックし、結晶を高品質にすることが産業上非常に重要です。

省エネ化の切り札となる“GaN パワーデバイス”、特に p 型 GaN 半導体の量産においては、GaN ウエハに Mg イオンを注入して熱処理することで p 型を形成する方法が有力視されており、その転位や欠陥の挙動については、これまでも、電子顕微鏡法、フォトルミネッセンス法、陽電子消滅法など種々の方法を駆使したり、それぞれの方法を高度化したりすることは進められてきましたが、注入した Mg 原子、電気的な活性化状態の空間分布を可視化する手法が無く、GaN 素子量産に向けた大きな壁となっており、これらを可視化する評価技術の確立が求められていました。

研究内容と成果

Mg イオン注入試料の電気的・光的特性を評価するために、カソードルミネッセンス (CL) 評価を実施しました。実験方法として、斜め研磨試料を準備し、CL スペクトルのラインプロファイルより、Mg イオン打ち込みで特性がどのように変わっているかを調べました。斜め研磨は、Ar イオンを用いた Cross Sectional Polisher (JEOL Ltd.) を用いて行うことで、図 1 に示すように、斜め研磨試料は断面試料より 2 桁以上の位置精度で発光現象を観察することができます。また、CL 観察を低温 (80 K)、低加速電圧 (3kV) で行うことにより、深さ分解能は約 100nm まで上げることができました。

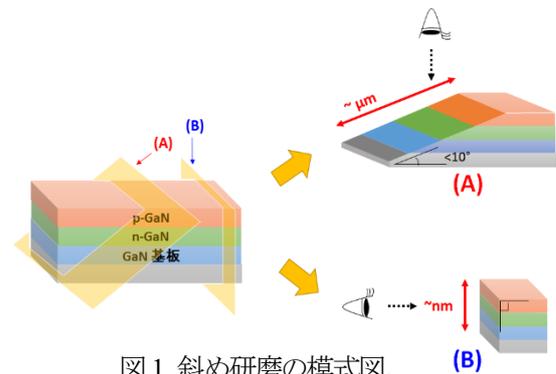


図 1 斜め研磨の模式図。

図 2 に、Mg 注入濃度 $1 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ 、 1300°C アニール試料を斜め研磨した試料における DAP (Mg アクセプタに関連したドナーアクセプタペア) 発光の CL 像を示します。(a) は転位がない場所、(b) は転位が多く集積している領域です。Mg 注入層からの DAP 発光が弱く、その真下に明るい発光領域がある一方で、転位が多い場合には、n-GaN エピ層中にまで発光が広がり、Mg が転位に沿って拡散していることがわかりました。

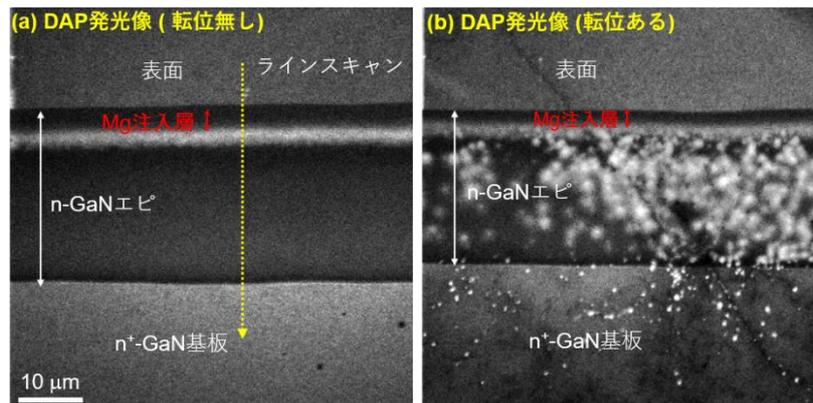


図 2 Mg イオン注入 GaN の CL 像。(a) 転位無し ; (b) 転位ある。

一般にイオン注入試料では、発光強度が厚さ方向で大きく変化するために、CL 像から多くを議論することが困難です。そこで、図 2(a) に示す黄色破線に沿って、電子ビームをスキャンし、図 3 に示すような各位置での CL スペクトルを得ました。Mg 偏析に伴う発光の変化を捉えることで、p 型 GaN の特性をより詳細に解析できることが期待されます。

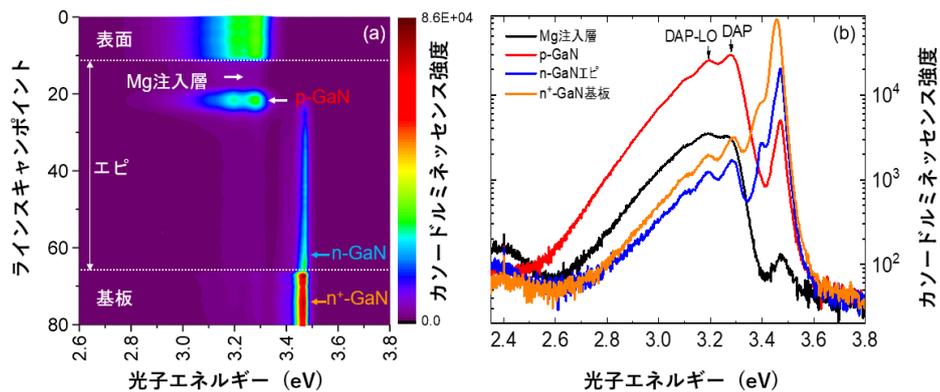


図3 Mg イオン注入 GaN の CL 線分析 (転位無し)。 (a) CL スペクトルのラインスキャン画像； (b) 各位置のスペクトル。

また、近年開発された紫外光レーザーを用いたアトムプローブトモグラフィー(APT)法は、半導体、絶縁体中の微量添加元素の分布を3次元的に可視化することが可能です。この手法を Mg イオン注入試料に適用し Mg 元素の分布を解析したところ、Mg 注入量が少ない ($1 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$) 場合には、図 4(a)に示すよう STEM 像では欠陥に起因する明るいコントラストが確認できるものの、図 4(c)に示す APT 解析結果から、Mg は GaN 中に均一に固溶していることがわかりました。一方、Mg 注入量が増える ($1 \times 10^{19} \text{cm}^{-3}$) と、微細な円盤状欠陥に加えて、ループ状欠陥の形成が確認され (図 4(b))、これらの欠陥に Mg が偏析することが明らかになりました (図 4(d))。同様な欠陥構造は他の試料でも再現性良く観察されています (関連論文)。さらに GaN 相中や欠陥部での Mg 組成も定量的に評価することも可能で、このような微細組織解析は、プロセスと特性との関係明確化に対して貢献が期待できます。

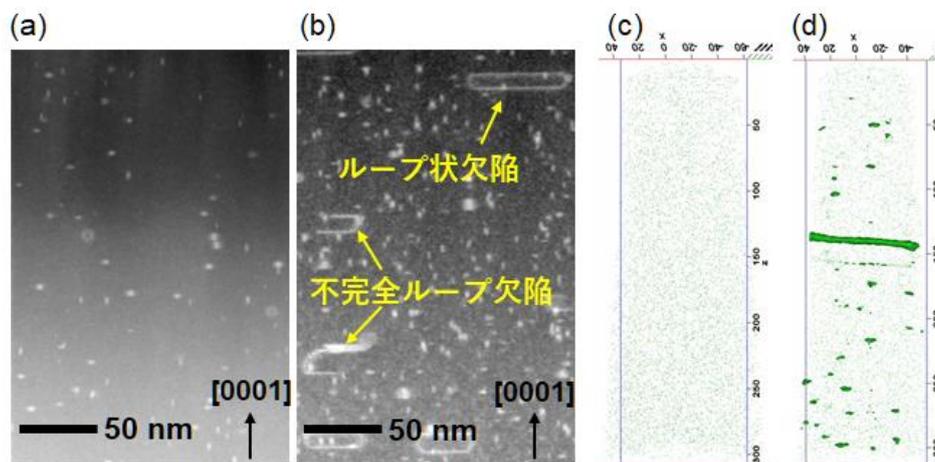


図4 Mg イオン注入 GaN の STEM 解析結果(a,b)及び APT 解析結果(c,d)。 (a,c) Mg 注入量 $1 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$ 、 (b,d) Mg 注入量 $1 \times 10^{19} \text{cm}^{-3}$ 。熱処理温度はいずれも 1300°C 。

今後の展開

GaN パワーデバイスの量産に向けた Mg 注入条件最適化のため、今後も引き続き、欠陥形成と Mg 偏析との関連を、電気的活性化と欠陥、注入 Mg 原子の分布の両面から解析を行っていきます。また、貫通転位に関連した活性化と Mg 分布等にも注目して解析を行う予定です。さらに、本次世代半導体研究開発 (評価基盤領域) のプロジェクト内で試作される種々のデバイスに対してこの手法を適用し、次世代半導体開発に貢献していきます。

掲載論文

題目：Cathodoluminescence study of Mg implanted GaN: The impact of dislocation on Mg diffusion

著者：Jun Chen, Wei Yi, Takashi Kimura, Shinya Takashima, Masaharu Edo, Takashi Sekiguchi

雑誌：Applied Physics Express

掲載日時：2019年5月1日発行号 (Vol. 12, Number 5) <https://doi.org/10.7567/1882-0786/ab14cb>

関連論文

題目：Comparative Analysis of Defects in Mg-Implanted and Mg-Doped GaN Layers on Freestanding GaN Substrates

著者：A. Kumar, K. Mitsuishi, T. Hara, K. Kimoto, Y. Irokawa, T. Nabatame, S. Takashima, K. Ueno, M. Edo, Y. Koide

雑誌：Nanoscale Research Letters

掲載日時：2018年11月11日発行号 (Vol. 13) <https://doi.org/10.1186/s11671-018-2804-y>

用語解説

(1) 窒化ガリウム

ガリウム (Ga) と窒素 (N) からなる六方晶系を有する結晶。青色半導体レーザーの材料。将来のパワーデバイス材料としても開発研究が活発化しています。

(2) カソードルミネッセンス (Cathodoluminescence, CL)

走査電子顕微鏡 (SEM) を用いて、電子ビームを微小領域に照射し、試料により非弾性散乱されてエネルギーを失いますが、一部は価電子帯の電子を伝導帯に励起して電子正孔対を生成します。電子と正孔は拡散し、ある位置で再結合を起こし、その遷移が直接型であれば光が放出されます。これをカソードルミネッセンス (CL) とよびます。この発光は半導体材料のバンド構造を反映し、そこにある欠陥や不純物の光学的・電氣的機能を評価することができます。

(3) アトムプローブトモグラフィー (Atom probe tomography, APT)

解析対象となる試料を先端の曲率半径が 50nm 程度の針状に加工し、高電圧を印加した試料にレーザーパルスを加えることにより試料表面から原子をイオン化させ、そのイオンの質量と位置を位置同定型質量分析器で同時計測します。イオンは針の先端から検出器表面に投影されて検出されるために、投影倍率が 100 万倍以上になり、原子位置をサブナノメートルの位置分解能で決定できます。これらを継続的に行うことで、試料表面から、順に蒸発した原子の位置と種類を 3 次的に解析する手法です。

本件に関するお問い合わせ先

(研究内容に関すること)

国立研究開発法人 物質・材料研究機構技術開発・共用部門 窒化ガリウム評価基盤領域 CL/EBIC/アトムプローブグループ

大久保 忠勝 (おおくぼ ただかつ)

E-mail: OHKUBO.Tadakatsu@nims.go.jp

TEL: 029-859-2716

(報道・広報に関すること)

国立研究開発法人 物質・材料研究機構 経営企画部門 広報室

〒305-0047 茨城県つくば市千現 1-2-1

TEL: 029-859-2026, FAX: 029-859-2017

E-mail: pressrelease@ml.nims.go.jp