



窒化ガリウムトランジスタに原子レベルで平坦な結晶層を新発見

～半導体/絶縁膜界面に準安定な酸化ガリウム層が存在 次世代パワーデバイス実現へ道～

配布日時：平成 29 年 10 月 23 日 14 時

国立研究開発法人 物質・材料研究機構

概要

1. NIMS を中心とする研究チームは、次世代パワーデバイスとして期待される窒化ガリウム (GaN) を用いたトランジスタにおいて、GaN 結晶と絶縁膜との界面に、これまでまったく知られていなかった、原子レベルで平坦な準安定¹⁾ 酸化ガリウム結晶の層が存在することを発見しました。さらに、この酸化ガリウムと同様の層が、絶縁膜をつける前に GaN 結晶の表面が自然に酸化されることでも形成される可能性を明らかにしました。GaN 結晶と絶縁膜の界面に欠陥がないことは、トランジスタの性能向上につながるため、今回の発見は高性能な GaN トランジスタ開発に向けた指針となることが期待されます。

2. GaN をベースとした金属-酸化物-半導体電界効果トランジスタ (MOSFET)²⁾ は、次世代パワーデバイスとして期待されています。しかし、シリコン製のトランジスタに比べて、電子やホール³⁾の移動度が低いことが実用化への問題となっています。移動度は、GaN 結晶とゲート絶縁膜の界面構造に大きく影響を受けるため、界面を制御する方法として、これまで GaN 表面の洗浄方法等のプロセス検討、ゲート絶縁膜に使われる材料の検討等が行われてきました。しかし、いずれのプロセス条件およびゲート絶縁膜を用いても、電氣的な計測では界面に特異な差は見つからず、その原因も分かっていませんでした。

3. そこで本研究チームは、二酸化ケイ素 (SiO₂) を絶縁膜に使ったトランジスタを作製し、GaN 結晶との界面を電子顕微鏡で直接観察したところ、1.5 nm 程度という非常に薄い、GaN 結晶とエピタキシャル関係⁴⁾を持つ結晶状の酸化ガリウム (Ga₂O₃) の層がある事を発見しました。また、この Ga₂O₃ 層は、一般に良く知られている安定な β 相とは異なり、準安定相である ε 相と呼ばれる構造と γ 相と呼ばれる構造が混じった構造であることを明らかにしました。観察された準安定 Ga₂O₃ 結晶は、原子レベルで平坦なため、界面での伝導を阻害する界面準位密度⁵⁾を低減できると考えられます。さらに、同様なエピタキシャル成長した準安定相からなる Ga₂O₃ は、ゲート絶縁膜形成前の GaN 基板表面にも、1 nm 程度の自然酸化膜として存在している事を明らかにしました。絶縁膜形成前の Ga₂O₃ 層が、GaN 結晶/絶縁膜界面で観察された構造と同じかは、今後詳細な解析が必要ですが、結晶状の準安定酸化ガリウム層が幅広い条件で形成されることを示しています。

4. パワーデバイスは、自動車や電車のモーターなどの大電流をスイッチングするために利用される素子であり、より低損失でより大きな電流を制御することが求められますが、本研究成果によって、GaN をベースとしたパワーデバイスにおいて、半導体/絶縁膜界面を制御することにより、パワーデバイスがオン状態の際の抵抗を低減し、より大きな電流を流すための手がかりが得られました。今後、今回発見された準安定 Ga₂O₃ 層の生成条件や、デバイスの電氣的特性との関係を明らかにするとともに、界面層を最適化していく事で、シリコンや炭化ケイ素をベースとした従来の MOSFET に代わる次世代パワーデバイスの実用化を目指します。

5. 本研究は文部科学省「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—」の委託を受けて行われました。MOS 界面の Ga₂O₃ 層に関する研究成果は、先端材料解析研究拠点 三石和貴グループリーダーを中心とし、機能性材料研究拠点、技術開発・共用部門、富士電機株式会社、山梨大学からなる研究チームによって実施され、Japanese Journal of Applied Physics Rapid Communication (JJAP RC) 誌にて 2017 年 10 月 23 日にオンライン掲載されます。また、自立 GaN 基板⁶⁾上の自然酸化膜に関する研究成果は、機能性材料研究拠点 色川芳宏主幹研究員を中心とし、先端材料解析研究拠点、技術開発・共用部門、エネルギー・環境材料研究拠点からなる研究チームによって実施され、Japanese Journal of Applied Physics (JJAP) 誌にて 2017 年 11 月にオンライン掲載される予定です。

研究の背景

窒化ガリウム (GaN) をベースとした金属-酸化物-半導体電界効果トランジスタ (MOSFET) は、高効率でモーターなどの大電流を制御する、次世代のパワー半導体素子材料として期待されています。MOSFET は、ベースとなる半導体の上に酸化膜をはさんで電極を配置し、電極に電圧を掛けることで半導体中を流れる電流を制御することが出来る素子です(図1)。 GaN パワー半導体に用いるのに優れた性質を多く備えていますが、幾つかの問題があり実用化には至っていません。その問題の一つとして、移動度が理論的に予測される値ほど高いデバイスが実現できていないことが挙げられます。ゲートとして用いられる誘電材料には、様々な酸化物が用いられていますが、二酸化ケイ素 (SiO_2) をゲート酸化膜とした SiO_2/GaN MOSFET では、界面準位密度が低い等、比較的特性が良いことが報告されています。しかしながら、その理由は良く判っていませんでした。これまでの研究において、 SiO_2/GaN 界面に意図的に Ga_2O_3 層を付けたところ、特性が向上したという報告はありますが、意図的に Ga_2O_3 層を作製していない界面については、特別な構造があるとは考えられていなかったため、詳細な観察はされていませんでした。今回の研究では、高特性な MOSFET の実現を目指して、 SiO_2/GaN 界面の Ga_2O_3 層の構造を詳細に解析しました。

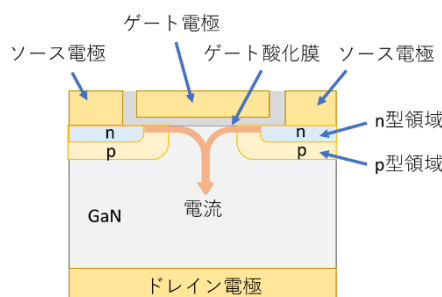


図1. GaN-MOSFET の模式図

研究内容と成果

今回、自立 GaN 基板上に作製された SiO_2 と GaN の界面を電子顕微鏡で観察したところ、1.5 nm 程度という非常に薄い、GaN 結晶とエピタキシャル関係を持つ原子レベルで平坦な結晶状の層がある事が観察されました(図2)。特性 X 線分光法⁷⁾ (EDS) による分析から、その層は Ga と酸素からなる、酸化ガリウムの層である事が明らかになりました。GaN パワーデバイスのゲート酸化膜界面にエピタキシャル関係をもった結晶状の酸化ガリウムの存在が明らかになったのは初めてです。また、酸化ガリウムは ϵ 相と呼ばれる構造と γ 相と呼ばれる構造が混じった構造であることも明らかになりました。原子レベルで平坦な準安定 Ga_2O_3 結晶が存在することで、界面での伝導を阻害する界面準位を低減できると考えられます。また、 SiO_2 を製膜する前の自立 GaN 基板の表面を、低速イオン散乱分光⁸⁾および反射高速電子線回折解析⁹⁾ を用いて調べたところ、表面が自然に酸化されることで生じたエピタキシャルな準安定 Ga_2O_3 結晶が存在することが明らかになりました(図3)。これらが同じ構造かどうかは今後の観察により明らかにする必要がありますが、今回の発見は、結晶状の準安定酸化ガリウム層が幅広い条件で存在することを示しています。さらに、一般的な GaN MOS デバイスで報告されている低い界面準位密度をもたらす要因が、この準安定 Ga_2O_3 層の存在である可能性を示した結果であり、今後の GaN パワーデバイスの実用化に繋がる重要な結果です。

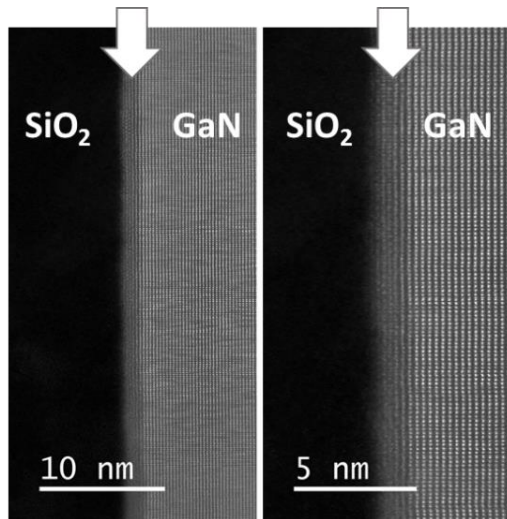


図2. PCVD 法で自立 GaN 基板上に作製された SiO₂ と GaN の界面の高分解能電子顕微鏡像。右側の GaN 基板と左側 SiO₂ (図の黒い領域) の間の矢印の部分に、異なる周期で配列した非常に薄い Ga₂O₃ の層が観察されている。

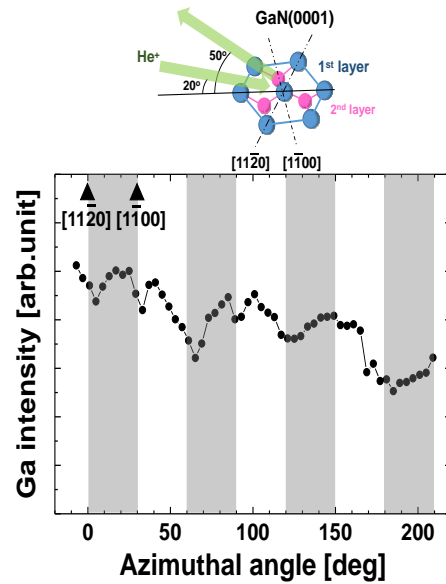


図3. 自然酸化膜から散乱されるヘリウムイオンにおいて、Ga の輝度に対する方位角の依存性を示したものの。60°毎に Ga 輝度が変動しており、表面構造の周期性を反映している。Copyright (2017) The Japan Society of Applied Physics.

今後の展開

窒化ガリウム (GaN) のパワーデバイスは、次世代自動車、ロボット応用及び長距離マイクロ送電などの新たなスマート社会の基盤デバイスとして期待されており今回の成果はその実現に大きく貢献するものです。今後、このエピタキシャルな準安定 Ga₂O₃ の生成条件と、デバイスの電気的特性との関係を系統的に明らかにすることで、これまでのシリコンや炭化ケイ素をベースとした MOSFET よりも飛躍的に高い性能が期待される、GaN をベースとした MOSFET の実用化を目指していきます。

掲載論文

題目 : Electron microscopy studies of the intermediate layers at the SiO₂/GaN interface

著者 : Kazutaka Mitsuishi¹, Koji Kimoto, Yoshihiro Irokawa, Taku Suzuki¹, Kazuya Yuge, Toshihide Nabatame, Shinya Takashima, Katsunori Ueno, and Masaharu Edo, Kiyokazu Nakagawa, and Yasuo Koide

雑誌 : Jpn. J. Appl. Phy. Rapid Comm.

掲載日時 : 2017年10月23日

題目 : Low-energy ion scattering spectroscopy and reflection high-energy electron diffraction of native oxides on GaN(0001), Jpn. J. Appl. Phy.

著者 : Yoshihiro Irokawa, Taku T. Suzuki, Kazuya Yuge, Akihiko Ohi, Toshihide Nabatame, Koji Kimoto, Tsuyoshi Ohnishi, Kazutaka Mitsuishi, and Yasuo Koide

雑誌 : Jpn. J. Appl. Phy.

掲載日時 : 2017年11月掲載予定

用語解説

- (1) 準安定: ある状況, 条件における本来の安定状態とは異なる状態に系がかなり長い時間とどまるとき, この状態を準安定状態という。
- (2) 金属-酸化物-半導体電界効果トランジスタ (MOSFET) : 電界効果トランジスタ (FET) の一種で, ベースとなる半導体の上に酸化膜をはさんで電極を配置し, 電極に電圧を掛けることで半導体中を流れる電流を制御することが出来る素子。
- (3) 移動度: 半導体材料中の電子やホールなどのキャリアの動きやすさ。移動度が高いほど性能が良くなる。
- (4) エピタキシャル: 二つの異なる結晶が, 特定の方位関係をもって揃う事。
- (5) 界面準位密度: 界面では, 欠陥などによって電子やホールなどのキャリアをトラップする多くのエネルギー準位が存在し, 界面準位と呼ばれる。これを下げる事が性能向上には重要となる。
- (6) 自立 GaN 基板: GaN 結晶を成長させる際に, サファイヤやシリコンカーバイドなどの異種基板上に成長させると, 基板と成長層の格子定数の違いから成長層に高密度の欠陥が導入されるため, 薄く成長したところで異種基板を剥離し, 応力の無い状態にしてから厚膜成長する事で, 欠陥の少ない基板が得られる。
- (7) 特性 X 線分光法 (EDS) : 電子顕微鏡で用いられる分析手法の一つで, 電子を当てる事で試料から発生する X 線の波長を調べる (分光) 事で, 電子の当たったところにある原子の種類を明らかにする手法。電子線が当たると, 原子は原子固有の波長の X 線 (特性 X 線) を放出するため, 発生する X 線を調べることで原子種が判る。
- (8) 低速イオン散乱分光: 低速のイオンを試料に当て, 試料によって散乱されてきたイオンのエネルギーや強度, 散乱方向の分布を調べる事で試料の結晶を構成する元素や, 構造を明らかにする手法。通常 He 等の希ガスイオンを用いる。試料の内部に入り込んだ He イオンは中性化するため検出されない。したがって, 試料の極表面の情報を取得することが出来る。
- (9) 反射高速電子線回折解析: 試料表面に電子を照射し, 反射・散乱してくる電子の分布を調べる事で, 試料の原子配列を明らかにする手法。電子を当てる角度を調整することで, 電子線が拾う情報の深さを変えることが出来る。

本件に関するお問い合わせ先

(研究内容 (測定手法) に関すること)

国立研究開発法人 物質・材料研究機構 窒化ガリウム評価・基盤領域 最先端電子顕微鏡グループ
グループリーダー 三石和貴 (みついし かずたか)

E-mail: Mitsuishi.Kazutaka@nims.go.jp

TEL: 029-863-5474

URL: https://samurai.nims.go.jp/profiles/mitsuishi_kazutaka

(研究内容 (デバイス) に関すること)

国立研究開発法人 物質・材料研究機構 機能性材料研究拠点/電気・電子分野/ワイドバンドギャップ材料グループ

主幹研究員 色川 芳宏 (いろかわ よしひろ)

E-mail: IROKAWA.Yoshihiro@nims.go.jp

TEL: 029-860-4549

URL: https://samurai.nims.go.jp/profiles/irokawa_yoshihiro

(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