

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 7 日現在

機関番号：22604

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26390056

研究課題名(和文) 族窒化物半導体中のプラズマ照射誘起欠陥の発生と移動機構の解明

研究課題名(英文) Generation and migration of plasma-induced defects in III-nitride semiconductors

研究代表者

中村 成志 (NAKAMURA, Seiji)

首都大学東京・理工学研究科・准教授

研究者番号：70336519

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,600,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、III族窒化物半導体中のプラズマ照射誘起欠陥の発生・移動メカニズムの解明を目的として、特に欠陥の荷電状態に着目して研究を行った。プラズマ照射誘起欠陥の導入されたショットキーバリア・ダイオードに対して、熱・光・電圧を個別もしくは同時に印加する実験を行うことで欠陥挙動を明らかにした。その結果、ドーパントを不活性化しているプラズマ照射誘起欠陥の荷電状態変化が、ドーパントの再活性化のみならず欠陥の移動に重要な役割を果たしていることがわかった。

研究成果の概要(英文)：In this study, we have focused on the effect of the charge state of the plasma-induced defects responsible for the dopant deactivation in III-nitride semiconductors. Anneal experiments of the plasma-damaged GaN Schottky diodes were carried out in order to clarify the effects of bias voltage as well as the photoirradiation on the reactivation of the passivated dopants. We revealed that the charge state of the plasma-induced defect plays an important role in the reactivation of the passivated dopants as well as the migration.

研究分野：半導体結晶工学

キーワード：プラズマ照射誘起欠陥 III族窒化物半導体 バイアスアニール プラズマダメージ

1. 研究開始当初の背景

族窒化物半導体を用いた高性能パワーデバイスや高周波デバイスの開発・実用化が進んでいるが、すでに実用化されている光デバイスを含め、結晶成長に起因した欠陥およびデバイス加工プロセスに起因した欠陥がデバイスの高性能化・高信頼性を阻害している。特に、プラズマプロセスによる欠陥については未解明な点が多く、欠陥の起源・欠陥物性の基礎的な理解が必要不可欠である。最近の族窒化物半導体結晶の高品質化はめざましく、欠陥物性について踏み込んだ議論が行える水準に到達したと考える。

これまで、申請者らの研究グループにおいて、n型 GaN のプラズマ照射誘起欠陥について様々な現象を明らかにしてきた。代表的なものを以下に示す。

(1) プラズマ照射によって、n型 GaN の表面領域にはドナー型欠陥、表面からサブ μm の内部領域にはキャリア密度を減少させる(Si ドナーを不活性化または補償する)欠陥が発生する。

(2) プラズマ照射誘起欠陥が導入された GaN に対してショットキーバリア・ダイオードを作製し、逆バイアスを印加しながら加熱すると 130 程度の温度でキャリア密度の回復が起こる。

(3) プラズマ照射誘起欠陥が導入されたショットキーバリア・ダイオードに紫外線を照射すると、GaN 表面から内部方向への欠陥のマイグレーションが起こる。

このように、欠陥挙動としては多くの情報が得られているが、プラズマ照射誘起欠陥の発生・移動・消滅過程の解明には至っていない。

2. 研究の目的

(1) プラズマ照射誘起欠陥の発生・導入機構の解明

これまでの予備的実験において、軽元素プラズマの方が短時間に大量の欠陥を導入していることが分かっている。そこで、プラズマ照射誘起欠陥発生・導入のメカニズムを解明するために、プラズマ種のフラックスおよびエネルギーを制御した貴ガスプラズマ照射を行い、欠陥発生・導入に対するガス種依存性を明らかにし、物理衝突の効果に着目して系統的な実験を行う。また、p型 GaN についても実験を行い、伝導型の違いによる影響を確認する。さらに、導入過程についてシミュレーションにより欠陥の挙動解析を行う。

(2) プラズマ照射誘起欠陥の挙動に対する光の影響の解明

これまでの申請者らの研究成果により、プラズマ照射誘起欠陥に対する GaN のバンドギャップエネルギー以上の光の照射効果は明らかになっている。一方、GaN のバンドギャップエネルギーよりも小さい光の影響については、プラズマ照射中にはその光の影響は

確認できず、検証が十分に行えていない。本研究では欠陥準位自身の光イオン化(荷電状態変化)の効果に注目し、実験を実施する。

(3) プラズマ照射誘起欠陥のバイアスアニールによる移動・消滅過程の解明

プラズマ照射誘起欠陥が導入された GaN ショットキーバリア・ダイオードに対して、熱・光・電圧を個別もしくは同時に印加する実験を行い、各パラメータと欠陥の移動・消滅との関係を明らかにする。

3. 研究の方法

(1) プラズマ照射誘起欠陥の発生・導入過程における物理衝突の影響

プラズマ種の物理衝突の効果に着目し、質量の異なる貴ガスについて、各プラズマ種の比率・フラックス、発光スペクトル、シース電圧を、ラングミュアプローブ、光ファイバーおよびファラデーカップを用いて計測した。同条件でプラズマ照射を行った GaN 試料についてショットキーバリア・ダイオードを作製し、各プラズマパラメータに対する欠陥導入量を調査した。

(2) プラズマ照射誘起欠陥が導入されたショットキーバリア・ダイオードの熱・光・電圧印加実験

予めオーミック電極を形成した GaN エピ基板に、プラズマ照射を行った後、ショットキー電極を形成してショットキーバリア・ダイオードを作製した。デバイスに熱・光・電圧を個別もしくは同時に印加する実験を行い、電流・電圧測定、容量・電圧測定、光容量分光測定により欠陥挙動を解析・評価した。

(3) プラズマ照射中およびバイアスアニール中の欠陥挙動シミュレーション

GaN 中の欠陥挙動として、拡散・ドリフトによる移動、電子と正孔の放出・捕獲、さらにドーパントとの結合・解離を考慮し、GaN 表面から内部方向への 1 次元のシミュレーションを行った。

4. 研究成果

(1) プラズマ照射誘起欠陥量のガス種依存性

族窒化物半導体中のプラズマ照射誘起欠陥の発生・導入過程を解明することを目的とし、プラズマに用いる貴ガスを変化させてプラズマダメージ量の原子量依存性を評価した。使用したガスは He、Ne、Ar、Kr で、ラングミュアプローブによりプラズマパラメータ・条件を計測しながらプラズマ照射実験を行った。代表的な結果を図 1、図 2 に示す。プラズマ種と構成元素である Ga および N が衝突する場合、Ar や Kr では原子量が大きいため N と Ga の両方に変位を引き起こす。一方、He や Ne といった軽元素は Ga との原子量が大きいため、窒素変位を選択的に引き

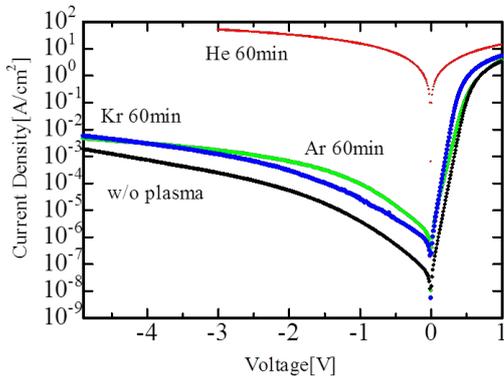


図1 電流 - 電圧特性のプラズマガス依存性

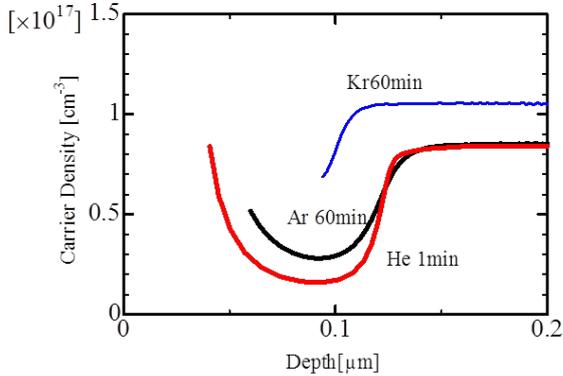


図2 キャリア密度分布のプラズマガス依存性

起こすと予想される。実際に、プラズマフラックスと弾性衝突伝達比を考慮した計算により、プラズマダメージ量の原子量依存性の実験結果がよく説明できることを明らかにした。これらの結果から、プラズマ照射誘起欠陥の起源として、窒素変位に関する窒素空孔、格子間位置の窒素が関与していることが示唆される。

(2) プラズマ照射誘起欠陥特性と GaN の伝導型との関係

n 型 GaN と p 型 GaN の両方にプラズマ照射を行って欠陥の電気的特性および挙動を調査した結果、図 3~6 に示す結果が得られ、半導体表面に発生・導入された欠陥はドナー型、半導体内部に発生・導入された欠陥は、p 型 GaN 中ではドナー型、n 型 GaN 中ではアクセプター型の挙動を示すことが分かった。導入された欠陥は negative-U 型の欠陥であり、半導体内部でのフェルミ準位との位置関係により挙動が異なるのではないかと考えられる。p 型 GaN の結果より、表面および内部の欠陥は同じ欠陥であり、n 型 GaN も同様に同じ欠陥の起源であるが、フェルミ準位との位置関係により荷電状態が異なっていると考えられ、起源としては窒素空孔が有力な候補として挙げられる。

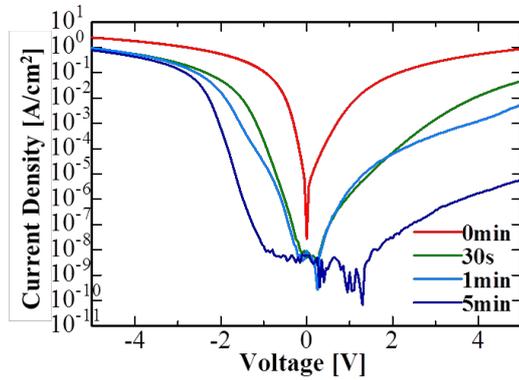


図3 p-GaN の SBD 特性のプラズマ照射時間依存性

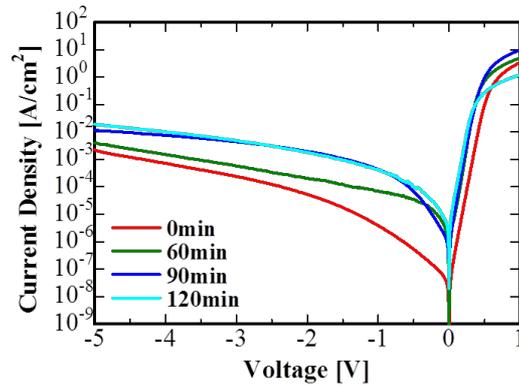


図4 n-GaN の SBD 特性のプラズマ照射時間依存性

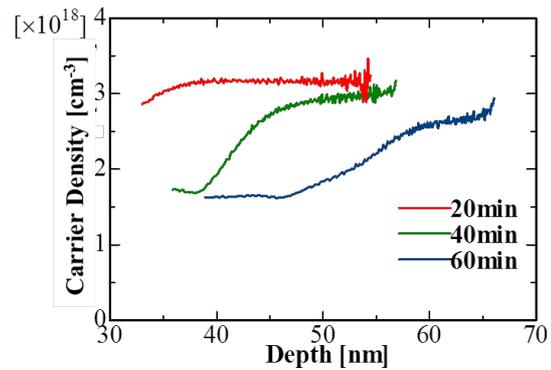


図5 p-GaN 中正孔分布のプラズマ照射時間依存性

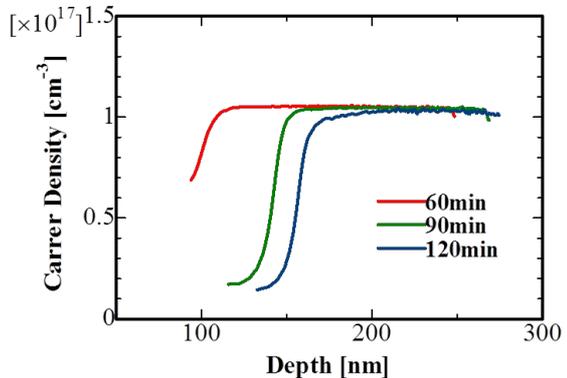


図6 n-GaN 中電子分布のプラズマ照射時間依存性

(3) プラズマ照射誘起欠陥が導入されたショットキーバリア・ダイオードの熱・光・電圧印加実験

これまでの研究成果により、バンドギャップエネルギー以上の光(紫外線)は、n型GaN中のプラズマ照射誘起欠陥を結晶表面から内部方向へ移動させる効果があることが分かっているが、バンドギャップエネルギーより小さい光についてはその影響は明らかにされていなかった。そこで、プラズマ照射誘起欠陥が導入されたn型GaNショットキーバリア・ダイオードに対して、熱・光・電圧を個別もしくは同時に印加することで、各パラメータと欠陥の移動との関係を調査した。プラズマ照射誘起欠陥によりドナーが不活性化されている状況を欠陥とドナーとが結びついているものと仮定した場合、ドナーの再活性化にはそれらの解離と欠陥の移動との2過程が必要となる。図7~10に得られた実験結果を示す。図7は90℃、図8は室温での結果である。図7に示す熱と逆バイアスの同時印加の場合、100℃以下のアニールにおいてもドナーの再活性化が起きることが分かった。90℃の熱エネルギーでもドナーと欠陥の解離と移動が起こっていることが分かる。一方、図8に示す光と逆バイアスの同時印加の場合でも、長時間必要であるがドナーの再活性化が起きている。室温の熱エネルギーと逆バイアスの同時印加だけでは変化はほとんど観測できなかった。また、照射光のエネルギーが1.2eV以下では変化は起きなかったことから、照射光は欠陥の荷電状態変化に関与していることが示唆される。これらの結果から、熱は、欠陥とドナーとの解離および欠陥の移動の両方に関与していること、バンドギャップエネルギーよりも小さい光は欠陥の荷電状態変化とそれともなう欠陥とドナーとの解離に関与していること、電圧は欠陥の荷電状態とその欠陥が移動する方向に関与していることが明らかになった。特に重要な点は、欠陥の荷電状態にかかわる電圧の効果、すなわち欠陥準位とフェルミ準位との位置関係である。n型GaN中の欠陥準位は通常フェルミ準位よりも下に位置するが、逆方向電圧を印加することで欠陥準位がフェルミ準位よりも上に位置することができ、荷電状態を変化させることができる。それにより欠陥とドナーとの解離と欠陥の移動が起こると考えられる。一方、p型GaNの場合には、欠陥準位は電圧印加のあるなしにかかわらず、常にフェルミ準位よりも上にあることから、荷電状態は変化しないと考えられる。p型GaN中のプラズマ照射誘起欠陥によるアクセプターの不活性化に関しては、180℃以下の温度の逆バイアスアニールでは変化が見られないが、図9、10に示すように、200℃以上では再活性化が確認できた。また、印加電圧の順・逆の向きおよび大きさにより、プロファイルの変化方向が変わることも確認できた。

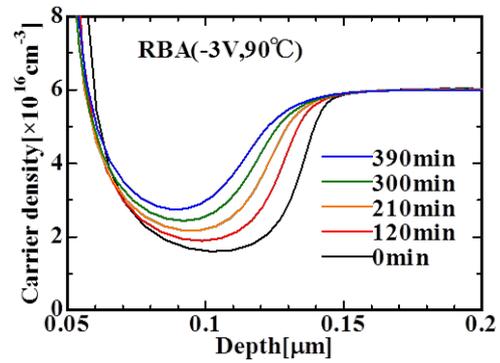


図7 n-GaN 中欠陥の逆バイアスアニール挙動

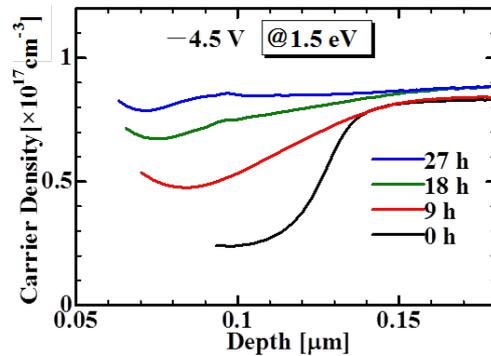


図8 n-GaN 中欠陥のバイアス光照射挙動

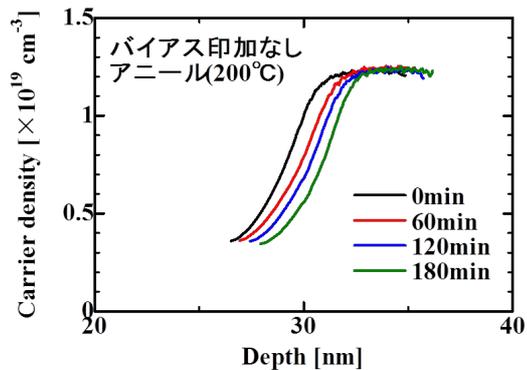


図9 p-GaN 中欠陥のアニール挙動

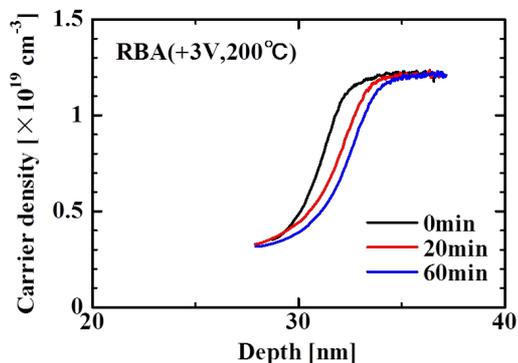


図10 p-GaN 中欠陥の逆バイアスアニール挙動

(4) プラズマ照射中およびバイアスアニール中の欠陥挙動シミュレーション

これまで得られた研究結果に基づき、欠陥の導入・移動・消滅過程をモデル化し、シミュレーションによりプラズマ照射誘起欠陥の挙動を解析した。プラズマ照射誘起欠陥の起源には構成元素である窒素の変位が関与しており、窒素空孔または格子間原子位置の窒素を候補として検証してきた。n型 GaN ショットキーバリア・ダイオードの逆バイアスアニール実験より、正の荷電状態の欠陥が表面に集まり蓄積されることでダイオード特性が劣化すること、紫外線照射実験より、表面付近に形成された正の荷電状態の欠陥が減少することでダイオード特性が改善することがわかっており、表面付近の欠陥は窒素空孔であると考えられる。また、結晶内部のドナーを不活性化させる欠陥についても、n型およびp型 GaN 中の欠陥分布、バイアスアニール実験結果、図 11 に示すシミュレーション結果より、表面と同じ窒素空孔が起源と考えられ、フェルミ準位との位置関係により荷電状態が変化することでn型とp型中での振る舞いが異なっていることを示した。

半導体デバイスの作製プロセスで多く利用される酸素プラズマアッシングについても、GaN に対しては容易に多くのプラズマ照射誘起欠陥が導入されてしまうことが分かり、GaN のプラズマプロセスにおいて、プラズマ照射誘起欠陥導入を減少させるためには、N 原子の変位を選択的に引き起こす軽元素ガスの使用を避け、Ga 原子と N 原子の両方の変位を同等もしくは Ga 原子の変位を選択的に引き起こす元素を用いたガスの使用することが重要であるといえる。

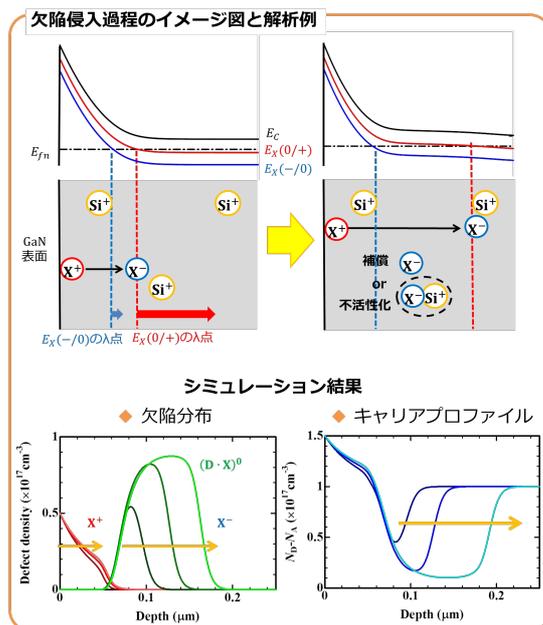


図 11 n-GaN 中プラズマ照射誘起欠陥の侵入過程解析イメージ

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計 1 件)

T. Takimoto, K. Takeshita, S. Nakamura, T. Okumura, Effects of plasma-induced defects on electrical characteristics of AlGaIn/GaN heterostructure before and after low-temperature annealing, Thin Solid Films, 査読有, Vol.557, 2014, pp.212-215
DOI: 10.1016/j.tsf.2013.10.086

〔学会発表〕(計 8 件)

井上 凌兵、若杉 勇作、中村 成志、奥村 次徳、GaN 中のプラズマ照射誘起欠陥の挙動解析(2)、第 64 回応用物理学会春季学術講演会、2017.3.14~3.17、パシフィコ横浜
若杉 勇作、中村 成志、奥村 次徳、GaN 中のプラズマ照射誘起欠陥の挙動解析、第 77 回応用物理学会秋季学術講演会、2016.9.13~9.16、朱鷺メッセ
折茂 力都、大西 健太、中村 成志、奥村 次徳、フォトキャパシタンス測定による GaN 中のプラズマ照射誘起欠陥の評価、第 63 回応用物理学会春季学術講演会、2016.3.19~3.22
古賀 祐介、井上 凌兵、中村 成志、奥村 次徳、n 型および p 型 GaN 中のプラズマ照射誘起欠陥挙動、第 63 回応用物理学会春季学術講演会、2016.3.19~3.22
古賀 祐介、中村 成志、奥村 次徳、伝導型の違いからみた GaN 中プラズマ照射誘起欠陥の挙動解明、電子情報通信学会研究会、2015.11.26~11.27
折茂 力都、横山 大樹、中村 成志、奥村 次徳、光照射下における n 型 GaN 中プラズマ照射誘起欠陥の挙動の温度依存性、第 62 回応用物理学会春季学術講演会、2015.3.11~3.14、東海大学
横山 大樹、中村 成志、奥村 次徳、プラズマ照射により不活性化された n 型 GaN 中ドナーの再活性化メカニズムの検討、第 75 回応用物理学会秋季学術講演会、2014.9.17~9.20、北海道大学

6. 研究組織

(1)研究代表者

中村 成志 (NAKAMURA, Seiji)

首都大学東京・大学院理工学研究科・准教授

研究者番号：70336519