

報告番号	甲 第 (3136 号)
------	--------------

## 主 論 文 の 要 旨

論文題目    **Study on new plasma processes for growth and etching of GaN thin films (GaN の新しいプラズマ成膜及びエッチングに関する研究)**

氏 名    谷 出 敦

## 論 文 内 容 の 要 旨

本研究は、安価且つ高性能な GaN (ガリウムナイトライド) パワー半導体デバイス創成に向けた新しいプラズマ成膜及びエッチング技術に関するものである。GaN は高耐圧・高周波特性を有する次世代パワー半導体デバイスの候補材料である。GaN 基板を用いた MOSFET(電界効果トランジスタ)は、高い放熱性を備え小チップサイズで 100A を超える大電流を取り扱えることから、電気自動車や鉄道分野への貢献が期待される。GaN ヘテロエピタキシャル成長基板を用いた HEMT (高電子移動度トランジスタ)は高周波特性に優れ、家電機器やデータサーバ用のコンバータ及び次世代通信デバイス用の素子として有力視されている。それら GaN パワーデバイスの普及のためには製造コストとその性能が鍵を握る。GaN 成長にかかるコストは依然高く、またデバイス加工時のプラズマダメージやエッチング形状の歪みはデバイス性能を大きく劣化させる。そこで GaN ヘテロエピタキシャル成長基板のコスト削減に向けた新しい GaN 成膜プロセス、並びにダメージレス且つ垂直な加工形状を得るためのエッチングプロセスの確立を目指した。

第 1 章では、背景技術の課題を踏まえ、本研究の目的を提示すると共に課題解決のための新プロセスについて言及した。GaN ヘテロエピタキシャル成長方式として主流の MOVPE (有機金属気相成長法) は、製造コストにおけるガス (アンモニア) コストの占める割合が大きく、また大口径基板上への成膜が困難である。故に近年、プラズマを用いた低ガスコスト且つ低温で大口径基板上に成膜が可能なスパッタリング成膜手法が有力視されている。当手法は、Ga ターゲットの窒化に伴う連続成膜の困難性と共に、プラズマ中のイオンダメージによる膜質低下が課題に残る。また低温でスパッタリング成膜された GaN は多

結晶性を示しやすく、三次元成長により荒れた表面を持つ傾向にある。そこで、ターゲット窒化及びイオンダメージ抑制のため、Ga と窒素 (N) を分離供給可能なプラズマソース分離設置型スパッタリング成膜手法を提案した。スパッタリングにはアルゴン/塩素混合ガスを使用した。その狙いは成長中の GaN 表面と塩素プラズマとの反応によるエッチング・成膜機構を介した膜質改善である。窒素プラズマ放電には低インダクタンスアンテナ (LIA) を採用し、高密度の原子状窒素を基板に供給し結晶化を促進した。さらに水素を窒素に混合し原子状水素を基板に供給することで、Ga の表面マイグレーション促進と多結晶化抑制を狙った。当プロセスにより AlN 基板上にヘテロ成長した GaN の特徴を把握しつつ高品質の成膜を実現することを本研究の目的とした。一方、GaN 基板の加工プロセスでは、目的形状を容易に得られるプラズマエッチングが主に利用される。ただし、シースで加速された高エネルギーイオンにより GaN 基板中の N が優先脱離しデバイス性能を劣化させる。基板昇温下での塩素プラズマエッチングは、N に対する Ga の揮発促進によりイオンダメージ (窒素欠損) を低減させ得る有力手法である。しかしながら当手法では、アンダーカット形成によりエッチング形状が悪化する課題が残る。三塩化ホウ素 (BCl<sub>3</sub>) 添加塩素プラズマは、III-V 族化合物半導体のエッチングにおいて、エッチング形状やラフネスを変化させ得ることが知られている。本研究では、基板昇温下での BCl<sub>3</sub> 添加塩素プラズマによる GaN 加工により、低ダメージ且つ所望の垂直エッチング形状を実現することを一目的とした。

第 2 章では、評価で活用するプラズマ診断手法、及び GaN 膜の評価手段とその基本原理について言及した。塩素プラズマ中の成分分析には発光分光分析手法 (OES) を活用した。GaN 成膜時における原子状窒素の供給密度は深紫外吸収分光法 (VUVAS) を用いて算出した。成膜された GaN の結晶状態及び原子配向性は X 線回折法 (XRD) 及び透過型電子顕微鏡 (TEM) により確認した。成膜後表面のモルフォロジ確認、及びエッチング形状の把握には走査型電子顕微鏡 (SEM) を活用した。エッチングダメージは GaN 表面からのフォトルミネッセンス (PL) で評価すると共に、エッチング後表面の残留成分分析には X 線光電子分光法 (XPS) を活用した。

第 3 章では、プラズマソース分離設置型反応性スパッタリング手法による AlN/Sapphire 基板上への GaN 成長条件の見極めと共に、成膜された GaN の特徴把握を狙いとした。当手法により 670 °C で成膜した GaN は、三次元成長が抑制される一方で塩素プラズマによるピット発達が強く進み島状成長を呈した。XRD 評価結果より、得られた GaN は僅かな多結晶性を有する六方晶 GaN であり、GaN (0002) 面の結晶配向性を示すロックングカーブ半値幅は約 0.80 ° であった。次に GaN 成長のプロセスウインドウ把握のため、成膜温度及び添加塩素濃度を変化させ評価を行った。アルゴンに対する塩素添加量が 1 % 以下の条件では、600 °C 以下の成長温度で三次元成長となるものの 1 μm/h の成長速度が安定し得られるのに対して、670 °C 以上の成長温度では塩素プラズマのエッチング促進により、急激に成長速度が低下することが判明した。成長速度と結晶性の窒素流量依存性を確認したところ、窒素流量の増加に伴い成長速度は向上し、また GaN (0002) 面のロックングカー

ブ半値幅は  $0.40^\circ$  まで縮小し得た。一方でピット形成により荒れた表面モルフォロジは改善されなかった。

第 4 章では、3 章で課題となった表面モルフォロジ改善と共に添加した塩素及び水素の役割明確化を目指した。塩素プラズマによるエッチング効果低減のため、成膜温度を  $600^\circ\text{C}$  に下げ、且つ当温度で十分な塩素プラズマ反応を得るために基板とプラズマ間距離を近接させた構成で成膜を行った。窒素の過剰供給により GaN 表面に隆起物が形成しモルフォロジ悪化を招く一方、適切な窒素ガス供給量を選択することにより、 $0.8\ \mu\text{m/h}$  以上の成長速度でピット発達の無い平坦膜の成長を実現した。しかしながら、GaN (0002) 面のロックンクカーブ半値幅は約  $0.6\sim 0.7^\circ$  とその結晶性に課題を残した。次に水素/塩素添加に伴う原子状水素及び塩素プラズマの GaN 成長への影響を見極めた。塩素・水素を添加しない条件では多結晶性の三次元成長が促進された一方で、水素添加によりラフネスは残るものの単結晶化と二次元成長が進み、原子状水素の効果が明らかとなった。また塩素添加のない条件では、成長初期時に基板表面に微小な結晶核が成長した一方、塩素を添加した条件では、成長初期の結晶核同士の結合により平坦化された表面が見受けられた。塩素プラズマの平坦化への寄与は基板とプラズマ間距離を離すことで急激に得られなくなることから、塩素イオンが重要な支配因子であると判明した。これら結果より、塩素/水素を用いたプラズマソース分離設置型反応性スパッタリング成膜手法は、結晶性の課題を残すものの、ターゲット窒化とイオンダメージを抑制しつつ低温で平坦な GaN 膜を成長させるための有力手段であることが示された。

第 5 章では、基板昇温下で  $\text{BCl}_3$  添加塩素プラズマと GaN 表面との反応制御により、目的的低ダメージ且つ垂直エッチング形状実現を目指した。PL 評価より  $\text{BCl}_3$  を添加した条件においても塩素プラズマの低ダメージエッチング性能は維持されることを確認した。エッチング形状に関して、 $\text{BCl}_3$  を添加しない条件ではアンダーカットが発生し、さらにバイアスを印加することでアンダーカット下部に斜面のエッチング形状が形成された。一方、バイアスを印加しつつ  $\text{BCl}_3$  添加量を増やすことでエッチング形状は垂直化することが判明した。この改善要因を検証するため、チャンバ圧力を維持した状態でエッチング時の総ガス流量、即ち排気効率を変化させ、GaN エッチング速度の変化を確認した。塩素のみでエッチングした条件では、ガス流量のエッチング量への依存性は見られない一方、 $\text{BCl}_3$  添加時はガス流量増加に伴いエッチング量の増加がみられ、エッチング生成物の表面保護が形状改善の主要因と特定した。さらに  $\text{BCl}_3$  添加プラズマによるエッチング後表面のホウ素 (B) 及び塩素 (Cl) の混入状態を XPS で評価した。低温でエッチングした条件では B 及び Cl の混入が確認された一方、 $400^\circ\text{C}$  以上の基板温度ではそれら成分の混入が急激に低減した。これら結果より、基板昇温下での  $\text{BCl}_3$  添加塩素プラズマによる GaN エッチングは、異元素混入を抑制しつつ、低ダメージ・高垂直エッチング形状を得るための有力な手段であることが示された。

最後に第 6 章では、本論文の総括を行い今後の展望を述べた。