

審査の結果の要旨

氏名 金 惠蓮

本論文は、金属ハフニウム箔上への窒化物半導体薄膜成長とその発光素子への応用について述べたものである。

窒化物半導体は、0.65 から 6.0 eV のバンドギャップをカバーする直接遷移型半導体であり、幅広い波長帯において高効率発光が可能な発光素子材料として期待されている。従来、窒化物半導体素子作製用基板として単結晶サファイア基板が主に用いられてきたが、サファイアには高コスト、小面積、硬くて脆いといった問題があり、窒化物半導体系発光素子の応用範囲は極めて限られたものになっていた。一方、金属フォイルなどの基板上に高品質Ⅲ族窒化物薄膜の成長を実現できれば、安価で大面積なフレキシブル発光素子の創製が可能になると期待できる。しかしながら、従来の窒化物薄膜成長技術では、窒化物薄膜/金属基板の界面で反応を抑制できず、良質な結晶成長が困難であった。本論文ではこれらの問題に対して、パルススパッタ法(PSD 法)による低温成長技術の利用と、反応バリア層の導入というアプローチを行い、Hf フォイル上に成長した窒化物半導体薄膜の構造制御を行うとともに、発光素子作製の実現可能性を論じている。本論文は以下の 5 章から構成されている。

第1章では、窒化ガリウム(GaN)系窒化物半導体の基本的な物性、及び薄膜成長技術の現状が述べられた後に、本研究において金属Hfを基板として用いる利点と、Hf上へのGaN系発光ダイオード(LED)作製に向けた課題とその解決にむけたアプローチが論じられている。また、これらの背景を踏まえた上で、本研究の目的が述べられている。

第2章では、Hf フォイルの前処理プロセスの開発と、GaN 薄膜成長における低温成長層の効果について述べられている。一般に入手可能な Hf フォイルでは結晶配向性が低い。本論文では、Hf フォイルを真空中アニール処理することによって Hf フォイルの結晶性の改善を実現している。具体的には、アニール処理の温度や時間などを詳細に検討し、結晶配向性が(0001)配向になること、グレインサイズが 500 μm 以上に増大することを見出している。この真空中アニール処理を施した Hf フォイル上に、パルススパッタ法と呼ばれる結晶成長技術を用いて、GaN 薄膜の成長を行った。Hf フォイル上への GaN 薄膜成長を高温で実施すると、GaN/Hf 界面で反応が起こるため結晶性が劣化してしまうことが知られている。実際に高温成長を行うと、界面反応に起因する Hf 原子の GaN 薄膜中への拡散や、最安定構造であるウルツ鉱型結晶相と準安定構造である閃亜鉛鉱型結晶相の混在が観測された。本章ではこの界面反応の問題を解決するために、GaN 薄膜の低温成長を行うことによって界面反応を抑制した。その結果、Hf 原子の拡散が検出

されなくなることで、ウルツ鉱型 GaN の相純度がほぼ 100%にまで向上することが明らかになり、Hf フォイル上に良質な GaN 薄膜のエピタキシャル成長が実現できることを見出している。

第3章では、界面反応バリア層として HfN を用いた GaN 薄膜成長プロセスの構築と、その特性評価について述べられている。第2章では低温成長 GaN 層を反応バリア層に用いることで GaN 薄膜のエピタキシャル成長が可能になることが明らかになったが、デバイス応用のためには更なる結晶性の向上が不可欠であることも同時に明らかになった。HfN は高い熱的安定性を有しており反応バリア層として機能することに加えて、GaN との格子整合性が高い、電気伝導性が高い、といった結晶成長上およびデバイス応用上の利点がある。HfN バリア層を Hf フォイルに成長後、GaN 薄膜成長を行ったところ、良質なエピタキシャル成長が実現し、低温成長 GaN バリア層を用いた場合よりも結晶性を向上できることが明らかになった。また、GaN はウルツ鉱型構造であり、その c 軸方向に反転対称性がないため N 極性と Ga 極性が存在する。デバイス応用を見据えた場合、単一極性になっていることが不可欠であるが、HfN 上に作製された GaN の極性は両極性が混在したものであった。そこで極性制御を行うために、HfN バリア層上に AlN 中間層を導入し、その表面酸化を行った後に GaN 薄膜成長を行った。その結果、GaN 薄膜の極性は Ga 極性のみで制御されることが明らかになった。このように極性制御を行った GaN 薄膜の結晶性や光学特性、電気特性を調べたところ、デバイス応用可能な品質を有していることが明らかになった。

第4章では、第3章で記された GaN 薄膜成長プロセスを用いて、Hf フォイル上への GaN 系 LED を試作した結果について述べられている。p 型 GaN、InGaN/GaN 量子井戸構造、n 型 GaN を Hf フォイル上に積層し、電極を形成して電流注入を行ったところ、正常な LED 動作が確認され、明瞭な電流注入発光が観測された。また、量子井戸構造内の InGaN 井戸層の In 組成を変えることによって、赤・緑・青のフルカラーLED の作製にも成功している。

第5章では、本論文のまとめと今後の展望について述べられている。

以上のように、本論文は Hf フォイル上への GaN 薄膜成長プロセスの開発と LED 応用について論じたものである。界面反応バリア層材料の検討や極性制御プロセスの開発を行うことによって、Hf フォイル上への良質な GaN 薄膜成長を実現し、最終的に、この技術を用いることで Hf フォイル上へのフルカラーLED の作製に成功している。本技術は、大面積でフレキシブルなフルカラーLED の実現に繋がるものであり、その開発の意義は極めて大きい。本論文で得られた知見は、今後の窒化物半導体の結晶成長および発光素子の新たな発展に大きく寄与するものとして高く評価できる。

よって本論文は博士（工学）の学位請求論文として合格と認められる。