

氏 名	吉 川 陽
国 籍 ・ 本 籍	静岡県
学 位 の 種 別	博士（工学）
学 位 の 番 号	甲第292号
学位授与の日付	平成30年 3 月20日
学位授与の要件	名城大学学位規程第 3 条第 3 項該当
学 位 論 文 題 目	AlGa _N 薄膜のヘテロエピタキシャル成長と 紫外線センサへの応用に関する研究
論文審査委員	主 査 竹 内 哲 也
	副 査 上 山 智
	副 査 岩 谷 素 顕

論文内容の要旨

本論文は窒化物AlGa_N/AlGa_N構造のヘテロ界面に誘起される二次元電子ガス（2DEG）を用いた高感度な深紫外線センサの実現を目指し、AlN薄膜およびAlGa_N薄膜のヘテロエピタキシャル成長およびセンサの作製と評価について論じたものであり、全6章からなっている。

第1章では本論文の背景、目的および構成について論じている。近年、深紫外線LEDの高輝度化に伴い、深紫外線センサの報告例も増え始めている。高性能かつ安価、小型な深紫外線センサが実現されることにより、計測用途、尿素センサ、NO_xセンサ、炎センサなどの多岐にわたるアプリケーションが期待されている。深紫外線領域では光電子増倍管やSiフォトダイオードなどの、可視光領域に用いるセンサをフィルターと併用して深紫外線領域に適用しているが、性能とコスト、サイズ、印加電圧にそれぞれ欠点を抱えている。AlGa_Nは上記の問題を解決するポテンシャルを持つため、光電子増倍管に匹敵する性能（感度 10^5 A/WおよびS/N 10^6 ）を得ることができれば市場に与える影響は大きい。光電子増倍管に匹敵する感度を得るためにはゲインを得ることが必須であり、AlGa_N/AlGa_Nヘテロ構造の界面に誘起される2DEGに着目した。2DEGは結晶品質に影響を受けるとされているため、まずは下地であるAlNとAlGa_Nそれぞれの高品位エピタキシャル成長技術の開発

に取り組んでいる。センサとしてS/Nを得るためには得られた2DEGを暗状態では空乏する必要がある。この2DEGを用いたセンサは世界初の試みであり、p-GaNゲート層およびショットキー電極をそれぞれ用いて空乏することを目指している。

第2章はAlGaInの下地となるサファイア基板上のAlNヘテロエピタキシャル成長について論じている。簡便な手法で高品位なAlNを得るという目標に対して、課題とこれまでの研究について整理し、ナノサイズの凹凸をもつサファイア基板と3段階成長法を組みわせることを提案した。ナノサイズの凹凸はGaInなどの窒化物半導体が堆積したリアクター内においてサファイア基板を1150°C以上でアニール処理することにより、表面に30~40 nm程度の径と深さが~80 nm程度の凹凸が形成される（NCC：Nano-Convex-Concavo）簡易な手法を示した。この基板上に（870°C/1250°C/1100°C）の3段階成長をすることにより、シングルステップを保有する平坦な表面かつ、結晶性が(0002)面：50 arcsec および (10-12)面：250 arcsec である、世界トップレベルの下地を得られることを示した。さらに転位密度が 10^4 cm^{-2} 以下であるAlN単結晶基板と本研究で得られたAlN下地上に同時に量子井戸構造を作製し、PL発光の強度を比較したところ、発光強度はほとんど変わらない結果を得たことから高品位な下地が作製できていることを示した。

第3章ではAlN下地上へのAlGaIn薄膜とAlGaIn/AlGaInヘテロ構造のエピタキシャル成長およびAlGaIn/AlGaIn界面に誘起される2DEGの構造、物性について論じた。これまでAlGaIn/AlGaInに誘起される2DEGの物性についての報告例は少なく、作製上の課題、物性を明らかにしておくことはデバイス作製において必須である。具体的にはAlGaIn成長は組成とAl組成の緻密な制御ができることはもちろんのこと、急峻な界面を形成するための表面平坦性が重要である。そのためにはGaの脱離を如何に制御するかがポイントである。本章ではAlGaInの成長温度、V/III比、成長レート、膜厚およびGaの原料を検討することで最適なAlGaIn成長条件を示した。さらにその条件におけるAlGaIn/AlGaInのヘテロ構造を成長し、構造評価と、界面に誘起された2DEGのHallやC-V測定などの電気物性およびPLやCL測定などの光学物性を示した。

第4章では前章で作製されたAlGaIn/AlGaIn界面に誘起された2DEGを空乏させる方法としてp-GaNゲート層を用いたセンサについて論じた。p-GaNゲート層を用いることでp-n接合がゲート下部に形成され、2DEGが空乏されることで暗電流が抑制される。一方で、紫外光照射時には2DEGを介して著しく高い光電流が得られる。そこでAlGaInと格子ミスマッチの大きいp-GaNのヘテロエピタキシャル技術を開発し、p-GaNだけを選択エッチングする技術の開発を行い、センサの作製と評価を行っている。AlGaIn/AlGaIn界面に誘起される2DEGをp-GaNゲート層で空乏できること

を初めて実証し、ソーラーブラインド特性と受光感度 10^4 A/W、リジェクション比 10^4 が得られることを示した。このときソーラーブラインド領域では p-GaN ゲート層における紫外光の吸収が問題となること明らかにした。

第 5 章では AlGaIn/AlGaIn 界面に誘起された 2DEG を空乏させる方法としてショットキー電極を用いたセンサについて論じた。AlGaIn/AlGaIn 構造における最適なショットキー電極は明らかにされていないことから、電極の選定を行い、断面 TEM-EDX 測定を用いてコンタクトのメカニズムを解明した。結果として、ソーラーブラインド特性と受光感度が 10^6 A/W、リジェクション比が 10^6 と光電子増倍管に匹敵する値を得ており、AlGaIn センサのポテンシャルを示した。センサの応答速度と照射強度依存性を明らかにすることで、捕獲準位によって高いゲインが得られていることを示した。また、AlN 単結晶基板上と AlN 下地上との比較を行うことで、捕獲準位は電極と AlGaIn 界面に形成されていることを示した。さらに商業化への可能性を評価するため、室温通電試験やプレッシャークッカーテスト (PCT) などの信頼性試験についても検討し、SiN などの表面保護層が必須であることを示した。

第6章は、本研究の総括と、今後の課題についてまとめている。また、それを基にして、深紫外センサにおける将来の展望についても述べている。

論文審査の結果の要旨

本論文では、深紫外領域にバンドギャップを有する AlGaIn 薄膜のヘテロエピタキシャル成長による高品質化を推し進めるとともに、AlGaIn/AlGaIn ヘテロ界面に誘起する二次元電子ガスを利用した二つの深紫外線センサを作製し、炎センサとして要求される、受光感度 10^6 A/W、リジェクション比 10^6 を両立する超高感度深紫外線センサを実証した。全 6 章で構成されている。

第 1 章では、AlGaIn 薄膜を用いた深紫外線センサの可能性と、その高感度化に向けた課題と解決に向けたアプローチが記載されている。第 2 章では、その高感度深紫外線センサに必須であり、かつ新規手法でもある、ナノ凹凸サファイア基板上への AlN エピタキシャル成長を遂行し、世界最高水準の結晶性を有する AlN 薄膜を実現している。第 3 章で、その高品質 AlN 薄膜上 AlGaIn/AlGaIn ヘテロ界面の二次元電子ガス濃度を検証した後に、第 4 章では、p-GaN ゲート層を有する HFET 型深紫外線センサ、第 5 章では、ショットキー電極を有する MSM 型深紫外センサについて検討している。HFET 型センサでは、エッチング工程の最適化により、受光感度 10^4 A/W、リジェクション比 10^4 を実現した。MSM 型センサでは、電極材料とその形成工程を詳細に検討することで、受光感度 10^6 A/W、リジェクション比 10^6 を両立する超高感度深紫外線センサを実現し、炎センサとしての動作も実証した。この高い感度実現には、空乏領域内のキャリア蓄積効果が関与している可能性を指摘している。最後の第 6 章は総括である。以上の成果は、筆頭筆者として Applied Physics Letters に 2 編、Japanese Journal of Applied Physics に 1 編、掲載されている。

以上のように、本博士論文は学位論文としての条件を備えていると評価できる。従って、学位を授与することを妥当なものと判断する。