

氏名	い ひょん じえ 李 賢 宰		
授与学位	博士(工学)		
学位授与年月日	平成21年3月25日		
学位授与の根拠法規	学位規則第4条第1項		
研究科, 専攻の名称	東北大学大学院工学研究科(博士課程) 応用物理学専攻		
学位論文題目	Fabrication of High-Quality Free-Standing GaN Substrates by Using a Novel Evaporable Buffer Layer (EBL) (新しい蒸発可能なバッファ層(EBL)を用いることによる高品質 GaN 自立基板の作製)		
指導教員	東北大学教授 松岡 隆志		
論文審査委員	主査 東北大学教授 松岡 隆志	東北大学教授 山根 久典	
	東北大学教授 北上 修	客員教授 八百 隆文	
			(学際科学国際高等研究センター)

論文内容要旨

本論文は新しい蒸発可能なバッファ層(EBL)を用いることによる高品質 GaN 自立基板の作製に関する。本論文はサファイア基板から GaN 膜を自然剥離するためのバッファ層を開発し、それを用いて極性(Polar)基板、半極性(Semi-polar)基板、および非極性(Non-polar)GaN 自立基板の作製に関する内容で構成されている。

GaN 系半導体は、次世代の照明素子および電子素子材料として、近年大きな注目を集めている。照明分野では、蛍光灯や電球を代替する白色 LED 素子として、また電子素子分野では将来の IT 産業の基盤となるパワー電力素子としての応用が期待されている。GaN 系半導体は異種基板を利用して成長されているが、大きい格子不整合及び熱膨張係数の不整合により、高密度の貫通転位とストレスが発生し、デバイス性能と効率の向上が困難である。そのため、GaN 膜の成長と素子の作製においては、GaN 基板を用いるのが最良の解決方法である。しかし、ハライド気相成長(HVPE)法による GaN 自立基板の作製に関する多くの試みにもかかわらず、サファイアの機械的硬度および化学的安定性のために、サファイア基板からの GaN 膜の剥離技術は未解決であった。この問題点を解決するために、Void-assist separation(VAS)法と Facet-controlled lateral epitaxial overgrowth(FACLEO)法が開発された。しかし、これらの方法は HVPE 法による GaN 成膜の前に マスク形成及び有機化学気相成長法による GaN テンプレート成長などの複雑で多段のプロセスが必要である。このような複雑で多段のプロセスは、高価な GaN 基板の原因となっており、GaN 自立基板の汎用化の大きな障害となっている。

本研究では、複雑で多段の GaN 自立基板作製のプロセスを単純化させ、1ステップでの GaN 自立基板作製を実現させるために、蒸発可能なバッファ層(EBL)を開発した。EBL 材料として、GaN の HVPE 成長において、HVPE 成長装置内に形成される塩化アンモニウム(NH₄Cl)に着目した。EBL は二つの役割を持つ。一つは高温 GaN 成長のための温度上昇過程で蒸発させてサファイア/GaN 界面にヴォイドを形成させることであり、これにより、高温 GaN 層成長後の室温までの降温過程において、GaN 膜が自然剥離し自立基板形成が可能になる。二つ目は EBL 層中に GaN 微細結晶が形成され、GaN 膜成長のシードとして作用する。これにより、良質の GaN 厚膜成長が可能になる。c 面 GaN 基板の成長において、EBL をサファイア基板に堆積させることで、GaN 自立基板を、HVPE 成長のみの1ステップで得られることを実証した。さらに、EBL を用いた半極性および非極性 GaN 自立基板作製にも適用可能であることを実証した。

本論文は全9章で構成されている。

第1章では GaN 自立基板研究の背景を述べ、従来の GaN 自立基板研究の調査から GaN 自立基板作製研究の課題を抽出し、それらを解決する方法として EBL を提案するとともに本研究の目的を設定した。

第2章では EBL のコンセプトを述べ、EBL 材料の検討を行い、次いで EBL を用いた HVPE 成長プロセス設計を行った。

第3章は本研究で用いた実験方法に関する。

第4章では EBL の成長条件と自然剥離に必要なヴォイドの形成及びその形成過程について論議した。

第5章では高品質 GaN 成長条件と自然剥離のためのヴォイド最適化について述べた。

第6章では EBL を用いた c 面 GaN 自立基板の作製と c 面 GaN 自立基板の結晶評価について述べた。

第7章は EBL を用いた半極性(10 $\bar{1}\bar{3}$)面 GaN 自立基板の作製と半極性(10 $\bar{1}\bar{3}$)面の結晶評価に関する。

第8章では EBL を用いた非極性(11 $\bar{2}$ 0)面 GaN 自立基板の作製と非極性(11 $\bar{2}$ 0)面の結晶評価について述べた。

第9章は本研究の総括である。

以上要するに、本研究は従来の GaN 自立基板作製における多段で複雑な作製プロセスという問題点を解決するものであり、HVPE 成長のみの1ステップによって高品質 GaN 自立基板を作製できる技術を実現したものである。本研究は学問的にも技術的にもさらには産業的にも大きな重要性を有するものであり、応用物理学ならびに結晶工学、半導体工学、結晶成長学に貢献するところがたとえ認められる。

論文審査結果の要旨

本論文は新しい蒸発可能なバッファ層 (EBL) を用いた高品質 GaN 自立基板の作製に関する。本論文はサファイア基板から GaN 膜を自然剥離するためのバッファ層を開発し、それを用いて極性 (Polar) 基板、半極性 (Semi-polar) 基板、および非極性 (Non-polar) GaN 自立基板の作製に関する内容で構成されている。

GaN 系半導体は、次世代の照明素子および電子素子材料として、近年大きな注目を集めている。照明分野では、蛍光灯や電球を代替する白色 LED 素子として、また電子素子分野では将来の IT 産業の基盤となるパワー電力素子としての応用が期待されている。GaN 系半導体は異種基板を利用して成長されているが、大きい格子不整合及び熱膨張係数の不整合により、高密度の貫通転位とストレスが発生し、デバイス性能と効率の向上が困難である。そのため、GaN 膜の成長と素子の作製においては、GaN 基板を用いるのが最良の解決方法である。しかし、ハライド気相成長 (HVPE) 法による GaN 自立基板の作製に関する多くの試みにもかかわらず、サファイアの機械的硬度および化学的安定性のために、サファイア基板からの GaN 膜の剥離技術は未解決であった。この問題点を解決するために、Void-assist separation (VAS) 法と Facet-controlled lateral epitaxial overgrowth (FACLEO) 法が開発された。しかし、これらの方法は HVPE 法による GaN 成膜の前にマスク形成及び有機化学気相成長法による GaN テンプレート成長などの複雑で多段のプロセスが必要である。このような複雑で多段のプロセスは、高価な GaN 基板の原因となっており、GaN 自立基板の汎用化の大きな障害となっている。

本研究では、複雑で多段の GaN 自立基板作製のプロセスを単純化させ、1 ステップでの GaN 自立基板作製を実現させるために、蒸発可能なバッファ層 (EBL) を開発した。EBL 材料として、GaN の HVPE 成長において、HVPE 成長装置内に形成される塩化アンモニウム (NH_4Cl) に着目した。EBL は二つの役割を持つ。一つは高温 GaN 成長のための温度上昇過程で蒸発させてサファイア/GaN 界面にヴォイドを形成させることであり、これにより、高温 GaN 層成長後の室温までの降温過程において、GaN 膜が自然剥離し自立基板形成が可能になる。二つ目は EBL 層中に GaN 微細結晶が形成され、GaN 膜成長のシードとして作用する。これにより、良質の GaN 厚膜成長が可能になる。c 面 GaN 基板の成長において、EBL をサファイア基板に堆積させることで、GaN 自立基板を、HVPE 成長のみの 1 ステップで得られることを実証した。さらに、EBL を用いた半極性および非極性 GaN 自立基板作製にも適用可能であることを実証した。

本論文は全 9 章で構成されている。

第 1 章では GaN 自立基板研究の背景を述べ、従来の GaN 自立基板研究の調査から GaN 自立基板作製研究の課題を抽出し、それらを解決する方法として EBL を提案するとともに本研究の目的を設定した。

第 2 章では EBL のコンセプトを述べ、EBL 材料の検討を行い、次いで EBL を用いた HVPE 成長プロセス設計を行った。

第 3 章は本研究で用いた実験方法に関する。

第 4 章では EBL の成長条件と自然剥離に必要なヴォイドの形成及びその形成過程について論議した。

第 5 章では高品質 GaN 成長条件と自然剥離のためのヴォイド最適化について述べた。

第 6 章では EBL を用いた c 面 GaN 自立基板の作製と c 面 GaN 自立基板の結晶評価について述べた。

第 7 章は EBL を用いた半極性 ($10\bar{1}\bar{3}$) 面 GaN 自立基板の作製と半極性 ($10\bar{1}\bar{3}$) 面の結晶評価に関する。

第 8 章では EBL を用いた非極性 ($11\bar{2}0$) 面 GaN 自立基板の作製と非極性 ($11\bar{2}0$) 面の結晶評価について述べた。

第 9 章は本研究の総括である。

以上要するに、本研究は従来の GaN 自立基板作製における多段で複雑な作製プロセスという問題点を解決するものであり、HVPE 成長のみの 1 ステップによって高品質 GaN 自立基板を作製できる技術を実現したものである。本研究は学問的にも技術的にもさらには産業的にも大きな重要性を有するものであり、応用物理学ならびに結晶工学、半導体工学、結晶成長学に貢献するところが大きく認められる。

よって、本論文は博士(工学)の学位論文として合格と認める。