

審査の結果の要旨

論文提出者 劉 才

本論文は“Stress and quality engineering of GaN growth on Si with in-situ wafer curvature analysis (In-situ ウェハ曲率解析によるシリコン上窒化ガリウム成長における応力・結晶品位の制御)”と題し、結晶成長時の基板の湾曲のその場同時観察技術を駆使して、窒化ガリウム (GaN) 結晶の格子歪みと品質を観察・制御し、高輝度な LED を得るに十分な結晶品質のシリコン上 GaN (GaN-on-Si) を実現した成果について英文で纏めたもので、7 章より構成されている。

第 1 章は序論であって、研究の背景、動機、目的と、論文の構成が述べられている。

第 2 章は“Procedure of successful GaN MOVPE on Si”と題し、まず有機金属気相エピタキシー (MOVPE)、その場ウェハ曲率観察装置など、本研究で用いる主要実験装置について述べた後、Si 上に成功裡に GaN 成長を行う手順について論じている。水素雰囲気中では GaN は Si 上に直接成長せず、反応して Si を溶かしてしまう。この Si メルトバック現象の成因と、AlN バッファ層品質との関係を明らかにしている。また成長を成功させる有効な手段として、トリメチルアルミニウムの成長前添加、AlN のダミーコーティングについても言及し、最後に本研究で用いる標準成長手順を纏めている。

第 3 章は“Experimental observation of stress control by conventional AlN”と題し、AlN バッファ層と AlN 中間挿入層の応力および歪み伝搬に与える影響が論じられている。ウェハ曲率のその場観察、断面透過電子顕微鏡観察、原子間力顕微鏡観察を通じて、AlN 層とその上の GaN 層における緩和の様子が明らかにされている。AlN バッファ層と中間挿入層の応力制御における役割が明確化され、準最適な成長条件が見出されている。

第 4 章は“Theoretical analysis of stress and strain behavior”と題し、ウェハ曲率解析データに基づいて、成長時および冷却時の応力と歪みの変化を理論的に論じている。まず種々の成長条件下での AlN と GaN の材料力学的性質を纏めた後、スローニー方程式を用いて、格子不整合応力と熱膨張率不整合応力を理論的に導出し、GaN on Si の成長冷却後の最終的曲率（反り）を設計するモデルを構築している。

第 5 章は“Quality of GaN on conventional AlN”と題し、AlN バッファ層および AlN 中間挿入層の GaN 成長層の質に与える影響について論じている。まず、AlN バッファ層の成長温度、V/III 比、厚さが GaN 成長層品質に与える影響を論じ、次に AlN 中間挿入層が与える影響を論じている。さらに、GaN 成長層の質は 3 次元成長によっても向上することが示されている。最後に、こうして得られた高品質 Si 上 GaN に青色発光ダイオード (LED) を試作した結果を述べている。

第 6 章は“Innovative AlN interlayers”と題し、前章までの知見に基づいて、より高品質な GaN on Si 成長が可能と予想される独自の AlN 中間挿入層を三種類、具体的には、パルスインジェクション成長によるもの、パルスインジェクションと低温成長層の組み合わせからなるもの、高温成長層と低温成長層の組み合わせからなるものを提案し、それぞれについて実験的証左を示している。

第 7 章は結論であって、得られた成果を総括するとともに将来展望について述べている。

以上のように本論文は、Si 基板上の GaN 単結晶成長において、結晶成長時のウェハ曲率その場同時観察技術を活用して GaN 結晶中に発生する応力と格子歪み・緩和を観察し、その知見を基に AlN 層を用いた新たな成長制御法を開発して、従来のサファイア基板上 GaN と遜色の無い高品質 GaN を Si 基板上に成長することに成功し、発光ダイオードとしての動作を実証したものであって、半導体材料工学への貢献が少なくない。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。