

最先端・次世代研究開発支援プログラム
事後評価書

研究課題名	窒化物半導体との融合を目指したエピタキシャル二ホウ化物薄膜の表面・界面研究
研究機関・部局・職名	北陸先端科学技術大学院大学・マテリアルサイエンス研究科・准教授
氏名	高村 由起子 (山田 由起子)

【研究目的】

発光ダイオード(LED)を使用したソリッドステートライティング(固体照明)は、熱フィラメントや水銀蒸気の放電を使用した従来の照明方法と比較して寿命やエネルギー効率、安全性に優れるため、一般照明用として広く使用される様になれば、世界のエネルギー消費量の削減に大きく寄与すると期待されている。現在、白色LEDの発光効率は、従来法では最も効率に優れる蛍光管に匹敵するまでに向上しており、その上、1980年代からほとんど効率の向上が見られない蛍光管と異なり、更なる高効率化の可能性を残している。

白色LEDに使用されている主な半導体材料は、バンドギャップの広い窒化ガリウム(GaN)であるが、経済的なホモエピタキシャル基板が存在しないため、格子整合性が悪く、絶縁体である単結晶サファイアを成長基板とした素子が実用に供されている。サファイア基板の問題は電気と熱の伝導性が低い点にある。このため、電極を横に並べた素子構造になってしまい、光の取り出し効率が悪く、また電極配置と放熱の悪さから大電流を流しにくい。縦型素子を作製しようとする化学的あるいは物理的にサファイアから窒化物膜を剥がして(リフトオフ)、熱及び電気伝導性に優れた材料に貼付ける工夫が必要になる。シリコンやシリコンカーバイドといった電気・熱伝導性に優れた基板へのGaN成長も行われているが、格子整合性の悪さと導電性バッファ層の欠如、及びサファイア上ほど成長研究が行われていないことから、高品質膜が得られていないのが現状である。高輝度・高効率白色LED実現のためには、格子整合性に優れ、電気及び熱の伝導性に優れた成長基板が望まれており、本研究課題ではこの新しい成長基板の開発とその上の窒化物半導体膜の成長と高品質化を目的とする。

本研究課題では、補助事業者が新たに立ち上げた反射高速電子線回折(RHEED)による成長表面のその場観察が可能な独自設計の超高真空化学気相エピタキシー(UHV-CVE)装置を使用し、二ホウ化物薄膜のエピタキシャル成長に対して表面科学的手法を適用し、その成長過程の理解と薄膜の高品質化に取り組む。特に核生成を決める界面と成長を決める表面の原子・元素レベルの微細構造に着目して研究を進める。シリコン基板上に成長したZrB₂膜に関しては、STM観察から原子レベルで平坦なテラスが数100nmに渡って存在すること、高分解能STM像からZrB₂(0001)-(2x2)再構成構造を有すること、この(2x2)が基板から拡散して来たSiによるものであることなどが明らかになりつつある。また、最近の詳細なSTM観察の結果、テラスとは方位の異なる微

結晶が核生成・成長していることが分かって来た。シリコン基板上の ZrB_2 膜を GaN の成長基板として利用するには、このような異方位結晶の核生成・成長を抑制する必要があるため、表面・界面の視点から研究を進め、結晶の核生成・成長を決定する原子・元素を含めた表面・界面構造と、その相対的な安定性を明らかにし、得られた知見をプロセスにフィードバックすることでエピタキシャル二ホウ化物薄膜の高品質化を目指す。より具体的には、UHV-CVE 法を用いた高純度気体原料からの二ホウ化物薄膜成長と、我々が特に得意とする STM などの走査プローブ顕微鏡による薄膜成長表面の系統的な観察を進めることで、二ホウ化物薄膜の微視的成長機構を解明する。異配向結晶粒を安定化させている界面構造や結晶面、再構成構造、元素などを明らかにし、その知見をもとに成長プロセスを制御することで核生成・成長の抑制を試み、補助事業期間内に二ホウ化物薄膜の高品質化とより完全な単結晶配向を目指す。

本研究課題では、さらに、得られた単結晶配向二ホウ化物薄膜上の窒化物の核生成・成長過程の観察と考察、特に表面・界面構造の原子・元素レベルでの解明を試みる。二ホウ化物薄膜表面の選択的窒化による不活性化を利用した窒化物結晶の横方向成長を試みるなどして、補助事業期間内に窒化物薄膜の欠陥の更なる低減を目指す。

【総合評価】

	特に優れた成果が得られている
○	優れた成果が得られている
	一定の成果が得られている
	十分な成果が得られていない

【所見】

① 総合所見

基礎的な研究であるが、エピタキシャル二ホウ化物薄膜の表面の製造技術は世界トップレベルにあり、固体の界面・表面研究で新規な手法を提案しており、ケイ素版グラフェン「シリセン」の発見は、実用化に不可欠となる学術体系の基盤作りに特筆すべき成果を上げた。

② 目的の達成状況

- ・所期の目的が
(全て達成された ・ 一部達成された ・ 達成されなかった)

所期の目的とは異なっても、シリコンの新たな2次元結晶の発見に至った点は研究に関する取り組みの着実性がもたらした成果として評価でき、新しい成長基板の開発とその上の窒化物半導体膜の成長と高品質化を行う研究を実施し、結晶の核生成・成長を決定する原子・元素を含めた表面・界面構造と、その相対的な安定性を明らかにし、得られた知見をプロセスにフィードバックすることでエピタキシャル二ホウ化物薄膜の高品質化を行った。得られた単結晶配向二ホウ化物薄膜上の窒化物の核生成・成長過程の観察と考察、特に表面・界面構造の原子・元素レベルの解明と、窒化物薄膜の欠陥のさらなる低減化を試みた基礎研究である。

③ 研究の成果

・これまでの研究成果により判明した事実や開発した技術等に先進性・優位性が
(ある ・ ない)

・ブレークスルーと呼べるような特筆すべき研究成果が
(創出された ・ 創出されなかった)

・当初の目的の他に得られた成果が (ある ・ ない)

エピタキシャル二ホウ化物薄膜の表面の製造技術は世界トップレベルにあり、固体の界面・表面研究で新規な手法を提案しており、本研究課題の成果は十分な先進性と優位性を有していると判断された。

ケイ素版グラフェン「シリセン」の発見は、実用化に不可欠となる学術体系の基盤作りに特筆すべき研究成果である。

シリセンの存在の推測と確認はすでに報告されているが、ZrB₂上に形成したシリセンの確認は、当初の目的の他に得られた成果であった。

④ 研究成果の効果

・研究成果は、関連する研究分野への波及効果が
(見込まれる ・ 見込まれない)

・社会的・経済的な課題の解決への波及効果が
(見込まれる ・ 見込まれない)

発見された「シリセン」は新しい「二次元材料」として大きな注目を受けており、その研究成果は関連する研究分野への波及効果が見込まれると判断される。

研究成果から高効率・高輝度の発光素子の開発が可能になることは、社会的・経済的な課題の解決への波及効果が見込まれると判断される。

⑤ 研究実施マネジメントの状況

・適切なマネジメントが (行われた ・ 行われなかった)

研究目的の達成に向けて研究計画は適切に実行されており、研究実施体制は適切に組織され、各年度、研究実施上必要な設備を随時導入されており、指摘事項への対応も適切に実施された。さらに、研究成果の発信は適切に行われ、国民との科学・技術対話についても効果的に実施されており、適切な研究実施マネジメントが実施された。