

審査の結果の要旨

氏名 奥村 滋一

本論文は、「InAs/GaSb および InAs/GaAs 歪みヘテロエピタキシャル結晶の高品質化」と題し、格子定数差により歪みが印加される III-V 族化合物半導体の分子線エピタキシー法によるヘテロエピタキシャル成長において、GaSb 層上の InAs 成長において伸長歪みにより形成されるピットや、InAs 量子ドット上の GaAs 埋め込み成長において異方的な歪みにより導入される転位を抑制する結晶成長法を考察し、成長初期の低温ヘテロ成長が支配因子であることを明確化したものであり、英文 6 章から構成される。

第 1 章は序論であり、InAs/GaSb タイプ II の超格子を用いた赤外線センサや、GaAs 基板上の InAs 量子ドットを用いた 1.3 μm 帯光通信デバイスなどの応用を述べ、それらデバイスの活性層となる結晶構造を成長する際の課題と目標を明確化している。

第 2 章では、本論文で結晶成長に用いる固体ソース分子線エピタキシー法を解説し、原子間力顕微鏡や X 線回折、フォトルミネッセンスなどの結晶評価法を述べている。

第 3 章では、InAs 結晶層を成長するための GaSb 基板の表面処理法を述べている。III-V 族化合物半導体単結晶基板として技術的蓄積の大きい GaAs に比べ、GaSb 基板は保管中に形成される表面酸化膜を除去した後に原子層レベルで制御された表面を形成するのが困難であり、とくに表面に深さ数 nm の空孔(ピット)が形成されやすい。そこで、550°Cにて表面酸化膜を除去した後で温度を下げて 440°Cにてピットの無い表面を形成し、その後に表面マイグレーションを促進できる 520°Cにてステップフローモードにより規則的なステップ・テラス構造を形成する 2 段階成長法を開発した。さらに、440°C成長により基板表面を平坦化するメカニズムを考察している。

第 4 章では、前章で得た原子層平坦な GaSb 結晶層上における、伸長歪みを受ける InAs の格子不整合ヘテロエピタキシャル成長について述べている。InAs 層内の貫通転位が GaSb 界面から発生することを明らかにし、貫通転位と InAs 層表面に出現する逆ピラミッド型のピット形成を同時に抑制できる結晶成長手法を検討した。その結果、第 3 章で述べた GaSb 成長と同様に、低温(400°C)で 10 nm の初期 InAs 層を成長した後、高温(520°C)で InAs を厚膜成長する 2 段階成長により貫通転位と表面のピットをとともに低減できることを見出した。そ

のメカニズムとして、低温成長は GaSb/InAs 界面での InAsSb 層形成とその圧縮歪みによる格子緩和が起点となる貫通転位の発生を抑制し、続く高温成長は InAs の(001)面を他の高指数面に比べて安定化することにより表面ピットの出現を抑制するというモデルを提示している。

第5章では、GaAs 結晶中に埋め込まれた InAs 量子ドットからのフォトルミネッセンス発光強度を、InAs ドットの成長温度、GaAs カバー層および中間層の成長温度および層厚を変化させて最大化する試みをまとめている。いずれのパラメータについても最適値が存在したが、その最適化指針を説明するモデルとして以下を提唱している。量子ドット成長においては、複数のドットが融合した巨大ドットの生成を抑制し、ドットの高さを均一化することが重要である。続く GaAs カバー層の成長では、InAs との相互拡散抑制およびドットにより凹凸化した表面を平坦化する観点から、低温で成長する必要がある。さらに、GaAs カバー層の成長においては、InAs ドット上で局所的に伸長歪が印加されるため、InAs ドット上にはピットが形成されやすい。そこで、GaAs カバー層の厚さは、ドットの頂上まで十分に被覆するように設定される必要がある。ドット頂上の露出部が直上の中間層における貫通転位の起点となる。一方、ドットを完全に被覆した後も GaAs の低温成長を続けると点欠陥が導入されるため、ドットを被覆した後は高温で GaAs 中間層を成長する必要がある。

第6章は結論であり、GaSb 基板上の InAs 成長と、GaAs 基板上に形成される InAs 量子ドット上の GaAs カバー層・中間層成長に共通する結晶成長条件最適化の指針をまとめている。成長初期を低温で行うことの意義、歪みが印加される結晶層成長において表面のピット形成を抑制するための結晶成長条件について、最適化指針を述べている。

以上のように、本論文は、格子定数差により歪みが印加される III-V 族化合物半導体のヘテロエピタキシャル成長における成長表面の平坦化や貫通転位の抑制について、ヘテロ界面における原子の相互拡散や表面吸着原子のカイネティクス、高指数結晶面の相対的な安定性などの観点から考察して成長条件の最適化指針をまとめたものであり、半導体光デバイス高性能化の観点から先端学際工学とくに半導体工学に貢献するところが少なくない。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。