

(様式 3)

論文の内容の要旨

氏名 豊田 英之

論文題目：「高品質アンチモン系化合物半導体薄膜のシリコン基板上ヘテロエピタキシーとその結晶構造に関する研究」

本論文は、近年注目を集めているシリコンフォトニクスや、シリコン基板上高速電子デバイスの実現を目的とした、シリコン基板上アンチモン系化合物半導体 (GaSb, AlSb) ヘテロエピタキシャル成長に関する研究についてまとめたものである。

第 1 章では本研究の背景・目的について述べる。GaSb を始めとする Sb 系化合物半導体は比較的小さなバンドギャップを持つことを特徴とし、光情報通信に必要とされる $1.30 \sim 1.55 \mu\text{m}$ 帯の発光・受光素子や、他の III-V 族化合物半導体と同様高いキャリア移動度を持つことから、高速電子デバイスへの応用も期待される材料である。したがって Si 基板上 Sb 系化合物半導体薄膜の高品質ヘテロエピタキシーは、光通信用赤外光素子の低価格化や、Si 光導波路や Si 集積回路との融合によるシリコンフォトニクス実現につながる。ところが Si 基板-Sb 系薄膜間に存在する約 12% の格子不整合のため、低転位密度のエピタキシャル薄膜の成膜は非常に困難であり、Si 上 Sb 系材料による赤外発光素子実現の報告は私の知る範囲では存在しない。本研究ではこのような背景に基づき、分子線エピタキシー (MBE) 法による GaSb 薄膜の Si 基板上ヘテロエピタキシーの高品質化を目的とした。

第 2 章では各薄膜試料の成膜・評価方法について述べる。MBE 法の概要、フラックス測定等成膜方法に関する説明、及び反射高速電子線回折 (RHEED)、フォトルミネッセンス (PL) の原理、実際の測定方法等各試料の評価に関する説明を行なう。

第 3 章では AlSb 緩衝層を使用した、Si(001) 面上 GaSb/AlGaSb 多重量子井戸 (MQW) の作製及び評価について述べる。本章ではミスフィット転位低減のため、GaSb バッファ層に超格子バッファ層 (SL-BL) を加えることにより、MQW 層の貫通転位のさらなる低減を行なった。作製試料は良好な表面モホロジー、結晶性を示し、SL-BL を含む $1 \mu\text{m}$ 厚の GaSb バッファ層は $3 \mu\text{m}$ 厚の GaSb バッファ層に相当する貫通転位抑制の効果を持つことが明らかとなった。断面 TEM 観察においても、SL-BL の Si/GaSb 界面から発生する転位の上方への伝搬の抑制が確認された。 $2\theta/\theta$ XRD 測定では MQW の周期構造によるサテライトピークが観測され、このパターンの解析のため制作したシミュレーションプログラムを用いて井戸層、障壁層幅の推定を行なった。さらに、MQW 層より、光情報通信で必要とされる $1.30 \sim 1.55 \mu\text{m}$ のフォトルミネッセンスが室温で観測された。この発光波長は本研究において制作した有限井戸型ポテンシャルモデルによるシミュレーションプログラムの結果と良く一致した。以上の成膜・解析から、SL-BL の貫通転位抑制効果が確認され、従来の成膜方法と比較し 50% 以下の総膜厚の成膜で同等の表面モホロジー、発光特性が得られることが明らかとなった。

第 4 章では薄膜結晶性向上の新たな試みとして、Si(111) 面を使用した GaSb/AlSb MQW の作

製及び評価を行なった。Si(111) 面においても AlSb 緩衝層は島状 (3 次元成長) を示し、エピタキシャル膜表面は Si(001) 面試料と同等の表面モホロジーを示した。これらの結果から AlSb 緩衝層は Si(111) 成長においても有効に作用することが明らかとなった。 ϕ -scan XRD 測定より、今回の成長条件では GaSb 膜が Si 結晶に対して 30° 回転することによる格子整合は起こらないこと、及びエピタキシャル膜は Si(111) 結晶と同じ結晶方位を持つ領域、及びそれに対して 60° 回転した領域からなる 2 ドメイン構造となっていることが判明した。GaSb/AlSb MQW からの発光波長は有限井戸型ポテンシャルモデルと良く一致し、これらの発光は MQW/Si(111) 試料については $E_1 \rightarrow HH_1$ の遷移、MQW/Si(001) 試料については $E_1 \rightarrow LH_1$, $E_1 \rightarrow HH_1$ の 2 つの遷移によるものと同定された。これらの成膜・評価により、Si(111) 面上においても AlSb 緩衝層を使用することにより GaSb 薄膜のヘテロエピタキシーが可能であることが示された。

第 5 章では、さらに新しい成長方法として、Sb テンプレートを導入した Si(111) 面上 GaSb 薄膜成長について報告する。この方法による GaSb 薄膜成長時の RHEED パターンや AFM による表面観察より、成長初期には AlSb 緩衝層に似た島状構造となることが判明した。成長後の薄膜は本研究で作製した全試料の中で最も良好な表面モホロジーを示した。 ϕ -scan, $2\theta/\phi$ -scan XRD 測定、逆格子マップ測定の詳細な結晶性評価により、副ドメインの比率は AlSb 緩衝層試料よりも小さく、さらに低歪みであることが明らかとなった。また成長初期の結晶構造解析を行うため、成長中に観察された RHEED パターンを解析するためのシミュレーションプログラムを製作した。このシミュレーションにより、実際に観測された RHEED パターンの再現に成功し、またその結果から、成長中に観測された全ての RHEED パターンは閃亜鉛鉱構造による回折で説明できること、成長初期の 3 次元成長の時点で GaSb の格子定数を持つ閃亜鉛鉱構造となっていること、及び副ドメインはこの時点で形成されていることが明らかとなった。Sb テンプレート作製時の RHEED パターンが Si(111) 表面のパターンから変化しないこと、また Sb テンプレートのみを成膜した試料には Sb 薄膜の形成が見られないことから、Sb テンプレートは 1×1 Sb が吸着した Si(111) 表面であると考えられる。以上の結果は、Sb テンプレートの GaSb 薄膜内副ドメイン比率の低減効果、及び成長開始直後の成長条件のさらなる最適化による、シングルドメインの Si 基板上高品質 GaSb 薄膜実現の可能性を示唆するものである。

第 6 章において本研究全体の総括を行なう。本研究により、MBE 法による Si(111) 面上高品質 GaSb 薄膜ヘテロエピタキシーの可能性が示された。特に Sb テンプレートの様な、AlSb 緩衝層を使用しない Si 基板上 GaSb 薄膜ヘテロエピタキシーの報告は本研究が初であり、良好な表面モホロジー、低い副ドメイン比率の薄膜が得られるだけでなく、Sb, Ga 原料のみで成膜が可能であるという大きな利点がある。本研究成果を基に基板温度等の成長条件をさらに最適化することにより、高品質 GaSb/Si ヘテロエピタキシーの実現、及び光通信用の Si 基板上赤外光デバイス、シリコンフォトニクスをはじめ、Si 上高速電子デバイスなど様々な工学的応用への発展が期待できる。