氏 名 （ 本 籍 ）	大塚　信幸（神奈川県）
学 位 の 種 類	博　士（工学）
学 位 授 与 番 号	甲 第１０３号
学 位 授 与 日 付	令和３年３月２５日
専　　攻	システム工学専攻
学 位 論 文 題 目	Ⅲ—Ⅴ族化合物半導体の原子層エピタキシーに関する研究
学位論文審査委員	（主査）教　授　　田中　一郎 （副査）教　授　　恵下　　隆 講　師　　小田　将人

論文内容の要旨

本論文では、現在の半導体デバイス作製に広く使われている原子層成膜技術の基礎となるⅢ-Ⅴ族化合物半導体の原子層エピタキシー（ALE）を対象としている。従来の ALE の特徴と課題を抽出した上で、新たな ALE 技術を開発し、その対象となる材料を広げるとともに新たな原料を用いて成膜温度領域を拡大し、成膜技術としての自由度を向上させ、さらにデバイスへの応用の可能性を実証した。また、第一原理計算により、成膜表面での原料分子および原子の安定性を検討し、ALE の成膜機構に関する従来モデルを検証した。

以下，本論文の概要を示す。

第 1 章では、本研究の背景と従来研究について述べた後、本研究の目的を明確にした。

第 2 章では、これまでの ALE の課題を解決した新たな ALE 技術である PJE 法を開発し、広い温度領域で、GaAs の ALE における 1 分子層でのセルフリミッティングを初めて実現した。また、成膜条件を制御することにより、基板面内膜厚均一性の向上と、結晶の高純度化が可能であることを示した。次に、AlAs の ALE に関する検討を行い、 2 分子層でセルフリミッティングすることを見出した。また、適切な原料を選択することにより、AlAs の ALE 成長の低温化を実現し、成膜温度領域を拡大した。さらに、InAs の ALE についての検討を行い、1 分子層でのセルフリミッティングを確認した。新たに開発した In 原料である TMIDMEA を用いて InAs の ALE の成長温度を GaAs の場合と同じ温度領域まで拡張させた。

第 3 章では、PJE 法を用いることで、$(GaP)_n(GaAs)_n$ 短周期歪層超格子の作製が可能であることを実証した。また、将来のデバイス作製に向けて ALE 技術を活用することにより、1.3 μm 帯で強く発光する自己形成 InGaAs 量子ドットの作製と、InGaAs への高濃度ドーピングが可能であることを実証した。さらに、ALE を用いると、AlAs が Si 基板上で従来法に比べて早く 2 次元成長へ移行するという特徴を活かして、GaAs on Si の良好なバッファ層となることを実証した。

第 4 章では、第一原理計算によるⅢ族原料およびその中間生成物の基板表面での吸着エネルギーの計算を行った。その結果、メチル基を 1 つ有する中間生成物が単体で吸着する場合は最も安定であるが、一方全サイトに吸着する場合では不安定であることを明らかにし、従来の成長モデルを検証した。さらに、As 終端 GaAs（100）基板表面上での Ga 原子と Al 原子の吸着エネルギーの計算を行い、基板表面での安定性を比較検討した。その結果、両原子とも 1 層分で安定に吸着するが、2 層分の吸着エネルギーには差があることが確認された。この結果を基に、AlAs の ALE では 2 分子層でセルフリミッティングする機構を明らかにした。

第 5 章では，本論文のまとめと今後展開について述べた。

論文審査の結果の要旨

学位申請者はIII-V族化合物半導体の薄膜を1原子層毎に成長させる原子層エピタキシーの新規技術としてパルスジェットエピタキシー法の開発に従事するとともに、これをGaAsだけでなくAlAs, InP, InAsなどの材料に広く適用する技術を開発した。また、これらの技術を用いてデバイスに応用できる急峻なヘテロ構造や量子構造の作製に成功した。

さらに、原子層を1層毎に成長させるメカニズムであるセルフリミッティング機構について第一原理計算による検討を行った。特に、Ga原子とAl原子がGaAs基板表面に吸着する際のエネルギーの違いからGaAsでは1分子層毎に、AlAsでは2分子層毎にセルフリミッティング機構が働くという違いが生じる原因を明らかにすることができた。

以上の研究成果に加えて、予備審査において必要とされた草稿内容の整理と構成の見直しも指摘に沿って実施されており博士論文に値すると評価できる。

最終試験の結果の要旨

2月15日にオンラインにて博士論文公聴会・最終試験を実施し、15名が参加した。約45分間の発表の後に30分間程度の質疑応答が行われた。質疑応答では、従来技術との違い、InGaAs量子ドットの成長機構と発光特性、セルフリミッティング機構に関する実験結果や計算の方法などについての質問があったが、いずれの質問にも適切な回答があった。

論文審査及び最終審査の結果から総合的に判断し、学位申請者は博士の学位を授与するに値すると評価できる。したがって、最終試験は合格と判定する。