

氏名・(本籍)	木 村 忠 (兵庫県)
学位の種類	博 士 (工 学)
学位記番号	工博甲第 248 号
学位授与の日付	平成 15 年 9 月 29 日
学位授与の要件	学位規程第 5 条第 1 項該当
研究科・専攻の名称	電子科学研究科 電子材料科学
学位論文題目	III-V 族化合物半導体結晶成長における重力効果に関する 研究
論文審査委員	(委員長) 教授 葉 原 弘 助教授 早 川 泰 弘 教授 宮 澤 政 文 教授 熊 川 征 司

論 文 内 容 の 要 旨

本論文は化合物半導体の結晶成長における重力依存性を明らかにすることを目的として論じている。研究対象材料としてエレクトロニクス上有用な InGaSb 及び InP を選択し、前者は溶液成長の溶解過程、また後者は気相成長の原料輸送過程に着目した。論文は 2 部構成である。第 I 部は InGaSb を対象とする第 2 章、3 章からなり、第 II 部は InP を対象とした第 4 章、5 章、6 章からなる。

本研究では結晶成長実験を回収衛星、小型ロケット及びスペースシャトルを用いた微小重力環境 (μG) および地上での重力環境下 (1G) において行った。さらに、実験結果を理解し、さらなる結晶成長条件の指針を得るため、数値解析を実施した。その結果、両結晶成長系において結晶成長過程において重力の影響を受けることを明らかにし、また対流の抑制と拡散律速への移行が結晶品質の向上の一要素であることを実証した。以下、各章の概要を述べる。

第 1 章は序論で、本研究の背景および研究課題の問題点を明らかにし、研究目的とその意義を述べた。

第 2 章では化合物半導体 InGaSb の溶液成長における原料溶液生成過程における重力依存性に関し述べた。Czochralski 法により成長させた InSb および GaSb インゴットを円筒状に成形し、GaSb/InSb/GaSb サンドウィッチ構造の試料を用意し石英アンブル中に真空封入し昇温した。InSb の融点到達後、InSb 融液中に GaSb が溶解し、その溶解の固液界面形状を EPMA (Electron Probe Micro Analysis) により調べた。その結果、回収衛星による μG 試料では円筒径方向にほぼ平坦であったのに対し、1G 試料では重力方向に広がる傾向が見られた。

第 3 章では第 2 章における実験結果を受け、数値解析を行うためのモデルと溶液内の対流と濃度

分布に関し記述した。解析では連続式、運動方程式、エネルギー方程式、拡散方程式を連立させ、実験条件に適合した境界条件を与え数値計算を行った。解析の結果、第2章で得られた固液界面の重力依存性は InSb と GaSb の濃度差による対流が支配要因であり、温度差による寄与は小さいことが定性的に確認された。さらに対流と拡散の寄与に関し、重力加速度をパラメータとする解析を行った。その結果、 $10^{-4}G$ において両者の寄与がほぼ等しくなり、拡散支配の溶液成長を行うには $10^{-4}G$ より小さい μG 環境が必要であるとの指針を得た。

第4章では InP の閉管エピタキシャル成長の可能性に関し原理的検討を行い、さらに有人宇宙船にて結晶成長実験を行うための実験装置開発ならびに安全性保証に関し述べた。石英アンブル中にソース InP (添加不純物 S)、基板 InP (Fe) 並びに輸送剤 $InCl_3$ を真空封入し温度勾配を与え、エピタキシャル成長を行い成長層厚の分布から InP 気相成長の原料気相種輸送過程の重力依存性を調べる方法を提案した。前半は InP エピタキシャル成長の原理的可否について記述した。気相種分圧計算、化学ポテンシャル計算から成長可能との結論を得た。また、後半は本実験を実施するための装置、結晶成長のための試料設計に関し述べ、通常考えられ得る極限状況においても実験系に損傷が発生せず、安全であることを実証した。

第5章では第4章前半の結晶成長の原理的検討を受け、地上での予備実験に関し記述した。理論的予想通り、閉管法により InP のエピタキシャル成長に成功した。実験の結果、InP 成長層厚の分布は輸送剤 $InCl_3$ 封入量の増加、また基板 InP の対重力方位により大きく変化することがわかった。InP 成長層厚の分布の重力依存性をより顕著にするための成長条件を探索し、宇宙での μG 実験の条件とした。

第6章では小型ロケット及びスペースシャトルを用いた μG 実験および地上での 1G 実験の結果に関し述べた。小型ロケット実験では設計した実験試料がロケット着地時のショック振動に耐えられることを実証し、スペースシャトルでの実験に適用可能であることを確認した。また、僅かではあるが InP の成長が確認された。さらにスペースシャトルによる長時間成長実験を実施した。 μG 試料では輸送剤 $InCl_3$ 封入量によらず高い均一性が得られ、気相種輸送過程が拡散により支配されていたことを層厚分布より実証した。一方、地上の 1G 試料では輸送剤 $InCl_3$ 封入量の増加と共に対流による循環流を示唆する層厚不均一性が見られた。

第7章では本研究の結論を述べ、総括した。

以上をまとめると、InGaSb 溶液成長系および InP 気相エピタキシャル成長系の両者において、結晶成長過程において重力の影響を受けることを明らかにすることにより、対流の抑制と拡散律速への移行が結晶品質の向上の一要素であることを示した。

論文審査結果の要旨

本論文は化合物半導体の結晶成長に対する重力効果を明らかにしたものである。研究対象材料としてエレクトロニクス上有用な InGaSb 及び InP を選択した。前者は溶液成長の溶解過程、また後者は気相成長の原料輸送過程に着目した。結晶成長実験を回収衛星、小型ロケット及びスペースシャトルを用いた微小重力環境 (μG) および地上での重力環境下 (1G) において行った。さらに、実験結果を理解するため、数値解析を実施した。

論文は2部構成である。第I部は InGaSb を対象とする第2章、3章、第II部は InP を対象とした第4章、5章、6章からなる。第1章は序論で、本研究の背景、問題点、目的とその意義を述べた。第2章では InGaSb 溶液成長における原料溶液生成過程の重力依存性を記述した。GaSb/InSb/GaSb サンドウィッチ構造試料を昇温した。InSb の融点到達後、InSb 融液中に GaSb が溶解した後、温度降下で InGaSb が成長した。回収衛星による μG 試料では固液界面形状が円筒径方向にほぼ平坦であり、半径方向の In 組成比分布は均一であったが、1G 試料では重力方向に広がり、組成分布は不均一となった。第3章では数値解析結果を記述した。固液界面の重力依存性は InSb と GaSb の濃度差による対流が支配要因であり、温度差による寄与は小さかった。重力加速度をパラメータとする解析を行った結果、拡散支配の溶液成長を行うには 10^{-4}G より小さい μG 環境が必要であるとの指針を得た。第4章では InP の閉管エピタキシャル成長の原理的検討と有人宇宙船内での結晶成長実験を行うための実験装置開発と安全性保証を記述した。石英アンプル中にソース InP (添加不純物 S)、基板 InP (Fe) 並びに輸送剤 InCl_3 を真空封入し温度勾配を与え、エピタキシャル成長を行い、成長層厚分布から輸送過程の重力依存性を調べる方法を提案した。第5章では地上予備実験を行い、InP のエピタキシャル成長に成功した。InP 成長層厚分布は輸送剤 InCl_3 封入量の増加や基板 InP の対重力方位により大きく変化した。これを基に、宇宙での μG 実験条件を確定した。第6章では、実験試料がロケット着地時のショック振動に耐えられることを実証した。また、スペースシャトルによる長時間成長実験を実施し、 μG 試料では輸送剤 InCl_3 封入量によらず高い均一性結晶薄膜が得られ、気相種輸送過程が拡散支配されることを実証した。一方、1G 試料では輸送剤 InCl_3 封入量の増加と共に対流による循環流を示唆する層厚不均一性が見られた。第7章では本研究の結論を述べ、総括した。

以上のように、両結晶成長系において結晶成長過程において重力の影響を受けることを明らかにし、また対流の抑制と拡散律速への移行が結晶品質の向上の一要素であることを実証しており、博士(工学)の学位を与えるに十分な内容があると認定する。