SURE 静岡大学学術リポジトリ
Shizuoka University REpository

微小重力環境下と地下における均一組成InGaSb結晶成長に関する研究

メタデータ	言語: ja 出版者: 静岡大学大学院電子科学研究科 公開日: 2008-03-31 キーワード (Ja): キーワード (En): 作成者: 村上, 倫章 メールアドレス: 所属:
URL	http://hdl.handle.net/10297/1201

氏名・(本籍)	村　上　倫　章 (北海道)
学位の種類	博　士　(工　学)
学位記番号	工博甲第　262　号
学位授与の日付	平成17年3月24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	**微小重力環境下と地上における均一組成InGaSb結晶成長に関する研究**
論文審査委員	(委員長) 教授　福家俊郎　教授　江間義則 助教授　田中　昭　教授　早川泰弘

論文内容の要旨

国際宇宙ステーションを利用した長時間の微小重力環境下において、均一組成で良質なInGaSb結晶を成長させることを目指し、本研究は(1)航空機や落下塔を用いた短時間の微小重力環境下を利用して重力がInGaSbの凝固過程に及ぼす効果を調べること、さらに(2)均一組成のInGaSbバルク結晶成長技術を開発することを目的とした。InGaSbは組成比を変化させることで、格子定数や発光受光の波長域を制御できるため、中赤外光域の発光受光デバイス材料として有用である。また、融点が712°C以下と低いため、電力使用に制限のある宇宙実験材料として最適である。

論文は二部構成とした。Ⅰ部の第2章と第3章では航空機や落下塔を用いた微小重力環境下実験について、またⅡ部の第4章、第5章、第6章、第7章では地上の1G環境下におけるInGaSb結晶成長実験について記載した。第8章では、本研究から得られた成果を纏め、さらに国際宇宙ステーション実験内容を提案した。

第1章では、国際宇宙ステーションに至るまでの宇宙開発の歴史、微小重力環境下における結晶成長実験の意義と実験試料であるInGaSbの特長を述べた。

第2章では、航空機のパラボリックフライトによる微小重力環境実験について記載した。微小重力時間が約20秒であり、結晶を成長させるには短いため、In-Ga-Sb溶液を急冷・凝固させて、凝固過程に及ぼす重力効果を調べた。微小重力環境下では1G環境に比べて大きな針状結晶が成長した。これは、結晶周りの空気の流れが抑制される結果、熱輸送が遅くなり、冷却速度が鈍ったためであった。

第3章では、落下塔を用いた微小重力環境下実験について述べた。微小重力時間が約4.5秒と極め

て短いため、高速度カメラを用いて In-Ga-Sb 溶液の凝固過程をその場観察した。高速度カメラの映像と突起物の組成分析結果から、1G 下では結晶が歪むのに対して、微小重力環境下では球状の突起物が発生することが明らかになった。

第 4 章では、重力方向と結晶径の相違が InGaSb 結晶の固液界面形状や組成分布に及ぼす効果を記載した。国際宇宙ステーション内では、電気炉へのアンプル挿入方向に対し53° の方向に10^{-4}G の残留重力が存在している。アンプル設置角度を 0°、53°、90° に変えて 1G 下で InGaSb 成長実験を行ない、重力方向の影響を調べた。一方向に温度勾配を形成した電気炉内に GaSb/InSb/GaSb サンドウィッチ構造試料を設置した。低温側の GaSb 種結晶上に InGaSb が成長するとともに、高温側の GaSb が溶液中に溶解することで、結晶成長につれて不足するGaSb成分を供給した。溶解界面形状は 0° の場合には平坦、53° の場合には上に凸、90° の場合には下に凸の界面形状になった。GaSb 供給原料は0° と53° の場合には溶け残っていたが、90° では完全に溶解した。均一組成長結晶長さはアンプル角度を増すにつれ長くなった。0° の場合には対流は中心軸に対して対称であり、温度勾配に起因した温度差対流と InSb と GaSb の濃度差に起因した濃度差対流は小さかった。しかし、アンプル角度が大きくなるにつれて、濃度差対流が支配的となり、界面形状が大きく歪むことが示された。さらに、結晶径が小さいほど、また成長温度が低いほど対流が小さくなり、成長界面形状が平坦になることがわかった。

第 5 章では、GaSb 種結晶上への高Ga組成のInGaSb均一組成結晶成長実験について記載した。温度差法による成長実験では、結晶成長につれて成長界面が高温度側に移動するため、結晶中の In 組成が減少する。均一組成の結晶を成長させるために、冷却を加えることで成長界面温度を一定に保つ実験を行った。成長結晶の In 組成分布と InSb-GaSb 擬似二元相図から溶液中の温度勾配を見積もった。また、結晶成長時に熱パルスを印加することで意図的に Te 不純物縞を成長結晶中に導入し、不純物縞の間隔から成長速度を調べた。溶液中の温度勾配と成長速度から結晶成長界面温度を一定に保つために最適な冷却速度を求め、均一組成の InGaSb 結晶成長を達成した。

第 6 章では、InSb 種結晶を用いた高 In 組成の InGaSb 均一組成結晶成長実験について述べた。種結晶と成長結晶の格子不整合を小さくするために、GaSb の代わりに InSb を種結晶とする実験を行った。一定の温度勾配下で温度を保持すると、InGaSb 成長結晶のIn組成は徐々に低くなるので、所望の In 組成に達するまで温度を一定に保持した後、最適な速度で冷却することで均一組成結晶の成長に成功した。第 5 章の結果とあわせ、あらゆる組成において均一組成結晶成長が可能であることを明らかにした。

第 7 章では、実験スペースの限られた宇宙実験で結晶成長領域を長くするための結晶成長条件を検討した。温度差法による結晶成長をモデル化して $In_xGa_{1-x}Sb$ の組成変化や成長長さに関する一次元数値解析を行った。その結果、成長に伴い供給原料が不足する状態と供給原料が残っているにもかかわらず溶液が無くなる状態が存在することや高い結晶化収率を得るために最適な InSb 長さが存在することが示された。InSb 長さを種々変えて $In_{0.03}Ga_{0.97}Sb$ 結晶成長実験を行った結果、InSb 長を2mm にした場合、試料全体の71％が成長しており、InSb 長が1mm, 4mm, 6mm の場合よりも結晶化長さ

が大きくなることが示された。

第 8 章では結論を纏めた。また、本研究で得られた知見を基に、国際宇宙ステーション内の微小重力環境下における結晶成長実験の提案内容を記述した。

論 文 審 査 結 果 の 要 旨

本研究は、国際宇宙ステーションを利用した長時間の微小重力環境下における均一組成で良質なInGaSb結晶成長を目指し、(1)航空機や落下塔を用いた短時間の微小重力環境下でInGaSbの凝固過程を調べること、および(2)均一組成のInGaSbバルク結晶成長技術を開発することを目的としてなされた。

第1章では、国際宇宙ステーションに至るまでの宇宙開発の歴史、微小重力環境下における結晶成長実験の意義と実験試料であるInGaSbの特長を述べている。

第2章では、航空機実験を記述している。微小重力環境下では1G環境下に比べて大きな針状結晶が成長したが、これは、結晶周りの空気の対流が抑制される結果、熱輸送が遅くなり、冷却速度が鈍ったためであった。1G環境下と微小重力下における熱輸送の相違を明らかにしている。

第3章では、落下塔実験を述べている。高速度カメラを用いてIn-Ga-Sb溶液の凝固過程をその場観察した結果、1G環境下では結晶が歪むのに対して、微小重力環境下では球状の突起物が発生すること等を明らかにしている。

第4章では、重力方向と結晶径が成長界面形状や組成分布に及ぼす効果を述べている。溶解界面形状はアンプル設置角度が重力方向に対して0°の場合には平坦、53°では上に凸、90°では下に凸となった。アンプル設置角度を大きくするにつれて均一組成領域が長くなった。また、結晶径が小さいほど、また成長温度が低いほど成長界面形状が平坦になることから、結晶成長に及ぼす対流の効果を論じている。

第5章では、GaSb種結晶上への高Ga組成のInGaSb結晶成長を記載している。成長結晶のIn組成分布とInSb-GaSb擬似二元相図から溶液中の温度勾配を見積もり、また、結晶成長時に熱パルスを印加することで意図的にTe不純物縞を成長結晶中に導入し、不純物縞の間隔から成長速度を調べた。溶液中の温度勾配と成長速度から成長界面温度を一定に保つために最適な冷却速度を求め、均一組成のInGaSb結晶成長に成功している。

第6章では、InSb種結晶を用いた高In組成のInGaSb結晶成長実験を記述している。種結晶と成長結晶の格子不整合を小さくするために、InSbを種結晶とした。所望のIn組成に達するまで温度を一定に保持した後、最適な速度で冷却することで均一組成結晶成長に成功した。

第7章では、温度差法による結晶成長をモデル化して$In_xGa_{1-x}Sb$の組成変化や成長長さに関する数値解析を行ない、高い結晶化収率を得るために最適なInSb原材料の長さを明らかにしている。

第8章では本研究で得られた知見を基に、国際宇宙ステーション内における結晶成長実験内容を提案している。

以上のように、本論文は重力が凝固過程に及ぼす効果や均一組成InGaSb結晶成長に関する知見を得ており、博士(工学)の学位を与えるに充分な内容を有するものと認定する。