

課題番号 P-3

## X線イメージセンサーを用いた半導体結晶成長過程 その場観察

### [ 1 ] 組織

代表者：稲富 裕光  
(宇宙航空研究開発機構)  
対応者：早川 泰弘  
(静岡大学電子工学研究所)  
分担者：  
田中 昭  
(静岡大学電子工学研究所)  
青木 徹  
(静岡大学電子工学研究所)  
Mukannan Arivanandhan  
(静岡大学電子工学研究所)  
岡野 泰則  
(静岡大学創造科学技術大学院)  
小澤 哲夫  
(静岡理科大学)

### [ 2 ] 研究経過

#### 研究目的・概要：

混晶半導体の特色は組成比を変えることにより、禁制帯幅や格子定数を制御できることにある。現在、Si や GaAs 等の元素半導体や化合物半導体がデバイス用基板として使用されているが、デバイス設計の自由度を大きくするためには、InGaSb や SiGe 等の均一組成で高品質な混晶半導体バルク単結晶成長技術の開発が望まれている。しかし、均一で高品質な混晶半導体バルク単結晶成長には、困難な課題が残されている。問題点は、(1)結晶成長につれて結晶と溶液の組成が変化すること、及び(2)溶液の濃度分布と温度分布に揺らぎが生じる結果、成長界面が不安定になり多結晶化することである。

任意の組成を有する均一組成の混晶半導体単結晶成長を達成するための根本的な課題は、高温溶液中の熱・溶質輸送過程と結晶溶解・成長との関係を定量的に把握することである。しかし、高温融液は光を透過しないために、レーザー等を用いる光学的方法では結晶成長過程や溶液中の濃度分布を測定することは困難であった。しかし、X線は溶液を透過するため、X線イメージセンサーを用いた結晶成長過程の観察は極めて有効な方法であると期待される。

本プロジェクトの目的は、X線イメージセンサーを用いて溶液中の溶質濃度分布の温度と時間変化を観察し、混晶半導体結晶の溶解・成長と溶質輸送との関係を把握することである。また、本研究は国際宇宙ステーション内の微小重力環境下実験の地上参照実験としても位置づけられており、対流の極めて小さい環境下での実験結果と地上実験結果を比較することで、熱・溶質対流や界面方位が均一組成混晶半導体バルク単結晶成長に及ぼす効果を明らかにする。

本プロジェクトは、本年度が初年度であった。X線イメージセンサーを用いた半導体結晶成長過程のその場観察および宇宙ステーション内実験のための予備実験に重点を置いた。GaSb 種結晶、InSb、GaSb 供給結晶から形成されるサンドイッチ構造試料を GaSb 供給結晶が高温側になるように電気炉に設置し、X線透過強度の温度、時間依存性を測定した。その結果、地上では密度差に起因した濃度差対流が発生するため、高温側の GaSb 供給結晶よりも低温側の GaSb 種結晶が溶解しやすいことがX線透過像の観察により明確に示された。

今後、対流の抑制される微小重力環境下(国際宇宙ステーション内実験)の実験との比較により、結晶溶解に及ぼす重力効果を明らかにする。

以下、研究活動状況の概要を記す。研究打ち合わせ・研究討論会を下記の日程で開催した。

(1) 2009年5月22日(金)

場所：宇宙航空研究開発機構 筑波宇宙センター  
内容：「微小重力環境下における混晶半導体結晶成長」の2009年度第1回検討会

(2) 2009年7月14日(火)

場所：宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究本部  
内容：「きぼう」船内実験室第2期利用候補テーマ「微小重力環境下における混晶半導体結晶成長」の2009年度第2回検討会の開催および地上予備実験

(3) 2009年12月1日(木)

場所：静岡大学電子工学研究所  
内容：共同研究の打ち合わせ(X線イメージセンサーを用いた半導体結晶成長過程その場観察)

(4) 2010年1月26日(火) 13:30~17:00

場所：宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究本部  
内容：「微小重力環境下における混晶半導体結晶成

長」の2009年度第3回検討会

(5) 2010年3月17日(水) - 3月18日(木)

場所: 宇宙航空研究開発機構 筑波宇宙センター

内容: 「微小重力環境下における混晶半導体結晶成長」の予備実験(結晶成長準備)

(6) 2010年3月22日(月) - 3月25日(木)

場所: 宇宙航空研究開発機構 筑波宇宙センター

内容: 「微小重力環境下における混晶半導体結晶成長」の予備実験(成長実験)

### [ 3 ] 成果

#### ( 3 - 1 ) 研究成果

InGaSb 混晶半導体結晶成長への溶質輸送効果を明らかにするために、X線イメージセンサーを用いて溶液中の溶質濃度分布を温度と時間の関数として測定した。GaSb 種結晶/InSb/GaSb 供給原料から構成される試料を窒化ボロン管と石英管に入れて真空封入した。この試料を電気炉の中に入れ、温度制御しながらX線を試料に照射した。X線透過強度の温度と時間依存性を電子工学研究所の青木准教授が開発しているCdTe X線イメージセンサーで測定した。GaSbとInSbのX線透過強度を標準として、X線強度分布を組成分布に変換した。

半導体溶液は光を透過できないため、結晶の溶解過程、成長過程及び溶液中の組成分布変化を測定することが困難であったが、半導体溶液を透過したX線強度をX線イメージセンサーで測定することで、溶液中の濃度分布の時間変化をリアルタイムで測定することが可能となった。測定の結果、高温側のGaSbよりも低温側のGaSbの溶解が促進されることが明瞭に示された。これは、GaSbの液体密度(6.058g/cm<sup>3</sup>)がInSbの液体密度(6.32g/cm<sup>3</sup>)よりも小さいため、InSb融液に溶解した低温側のGaSbが密度差対流により、高温側へ輸送される結果、低温側近傍の溶液が未飽和になり、GaSbの溶解が促進されるためであった。これは、X線イメージセンサーを用いた半導体結晶成長過程その場観察により、初めて観察できた現象である。

#### ( 3 - 2 ) 波及効果と発展性など

本研究は、画像科学と結晶成長を融合させた学際研究である点に特色がある。また、熱・溶質輸送効果と界面方位効果を把握し、任意の組成を有する均一組成混晶半導体バルク単結晶成長の手法を実験的、理論的に提案する点に学術的意義がある。

本共同研究プロジェクトは、静岡大学、宇宙航空研究開発機構、静岡理工科大学との研究者ネットワークを構築している。本研究は国際宇宙ステーション内の微小重力実験の地上参照実験としても位置づけ

ており、対流の極めて小さい環境下での実験結果と地上実験結果を比較することで、熱・溶質対流や界面方位が均一組成混晶半導体バルク単結晶成長に及ぼす効果を把握できると期待される。

### [ 4 ] 成果資料

本研究プロジェクトで得られた成果を国内会議で講演した。また、インド国ペリア大学に招待され、セミナーを行った。

(1) GRajesh, Y.Okano, T.Tanaka, A.Tanaka, T.Koyama, Y.Momose, T.Ozawa, Y.Inatomi and Y.Hayakawa, Orientation dependence on the growth of InGaSb ternary bulk crystals, 第56回応用物理学関係連合講演会, 1pE14 (2009年4月).

(2) GRajesh, H.Morii, T.Aoki, T.Koyama, Y.Momose, A.Tanaka, T.Ozawa, Y.Inatomi and Y.Hayakawa, Growth of homogeneous InGaSb ternary bulk crystal and the observation of composition profile in the solution by X-ray penetration method, 電子情報通信学会, 電子部品・材料研究会, 信学技報, ED2009-26, CPM2009-16, SDM2009-16, pp.43-47 (2009年5月)

(3) GRajesh, M.Arivanandhan, H.Morii, T.Aoki, T.Koyama, Y.Momose, A.Tanaka, T.Ozawa, Y.Inatomi, Y.Hayakawa, Observation of dissolution, growth and composition profile in InGaSb solution, 第70回応用物理学学会学術講演会, 8p-N-16 (2009年9月).

(4) GRajesh, M.Arivanandhan, H.Morii, T.Aoki, T.Koyama, Y.Momose, Y.Inatomi and Y.Hayakawa, Observation of dissolution process of GaSb into InSb melt by X-ray penetration method, 第24回日本マイクログラフィティ応用学会学術講演会, P28 (2009年10月).

(5) 早川泰弘, GRajesh, M.Arivanandhan, 田中 昭, 岡野泰則, 小澤哲夫, 稲富裕光, 宇宙ステーション内における混晶半導体バルク結晶成長の予備実験, 第24回日本マイクログラフィティ応用学会学術講演会, B203 (2009年10月).

(6) GRajesh, M.Arivanandhan, H.Morii, T.Aoki, T.Koyama, Y.Momose, A.Tanaka, T.Ozawa, Y.Inatomi, Y.Hayakawa, In-situ observation of dissolution process of GaSb into InSb melt by X-ray penetration method, 第39回結晶成長国内会議, 12PS37 (2009年11月)

(7) Y.Hayakawa, M.Arivanandhan, GRajesh, T.Koyama, Y.Momose, H.Morii, T.Aoki, A.Tanaka, T.Ozawa and Y.Inatomi, Microgravity experiments for the growth of III-V ternary crystals, Invited Seminar at Periyar University (Selem, India) (2010.2).

## 出張報告

- (1) 氏名： 稲富 裕光  
所属：宇宙航空研究開発機構  
期間：2009年12月1日  
用務先：静岡大学電子工学研究所（浜松市中区城北3-5-1）  
用務内容：共同研究の打ち合わせを行った。  
主たる対応者：早川泰弘