

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：

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

(大阪大学大学院基礎工学研究科)

小澤 哲夫

(静岡理科大学)

[2] 研究経過

研究目的・概要：

本プロジェクトの目的は(1) X線透過法を用いて、結晶成長時における高温溶液中の濃度分布測定を行うこと、(2)溶質輸送を考慮した溶液中濃度分布の数値解析により、混晶半導体結晶成長に対する溶質輸送効果を明らかにすること、(3) 均一組成混晶半導体バルク結晶成長技術を確立すること、及び(4) 結晶の組成、不純物濃度、形態を最適化し、熱電特性の向上を図ることである。

本年度は、(1) 国際宇宙ステーション実験に関しては、GaSb(111)A/InSb/GaSb(111)A 構造試料の成長実験を実施し、成長アンブルを回収した。(2) 溶質輸送を考慮した溶液中濃度分布の数値解析に関しては、界面カインेटィクスを考慮した解析を行った。(3) GaSb、InSb、 $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{Sb}$ の粘性、濡れ性、蒸発率の測定結果を解析した。(4) SiGeバルク結晶成長実験と熱電特性の評価を行った。さらに、(5)静岡大学に中国研究者を招聘し、「The 1st Japan-China Joint Workshop on Material Science in Space」を開催し、研究討論を行った。

研究打ち合わせ・研究討論会を下記の日程で開催した。

(1) 開催日：2013年5月24日(金)

参加者：早川泰弘、稲富裕光、早川研究室メンバー
場所：静岡大学電子工学研究所

(2) 開催日：2013年7月17日(水)

参加者：早川泰弘、岡野泰則、早川研究室メンバー

場所：静岡大学電子工学研究所

(3) 開催日：2013年7月31日(水)

参加者：早川泰弘、稲富裕光、早川研究室メンバー

場所：静岡大学電子工学研究所

(4)開催日：2013年10月15日(火)、10月16日(水)

参加者：早川泰弘、稲富裕光、早川研究室メンバー

場所：静岡大学電子工学研究所

(5) 開催日：2013年10月23日(水)

参加者：早川泰弘、稲富裕光、岡野泰則

場所：大阪大学

(6) 開催日：2013年11月19日(火)

参加者：早川泰弘、稲富裕光

場所：宇宙航空研究開発機構

(7) 開催日：2013年12月24日(火)、12月25日(水)

参加者：早川泰弘、稲富裕光、岡野泰則

場所：宇宙航空研究開発機構

(8) 開催日：2014年1月9日(木) 1月10日(金)

参加者：早川泰弘、岡野泰則、早川研究室メンバー

場所：静岡大学電子工学研究所

(9) The 1st Japan-China Joint Workshop on Material Science in Space 開催

開催日：2014年2月8日(土) - 2月9日(日)

参加者：早川泰弘、稲富裕光、早川研究室メンバー
ハルヨ・ミルサンディ (大阪大学大学院)

刘岩 (Liu Yan) (中国科学院上海硅酸盐研究所)

张兴旺 (中国科学院半导体研究所)

钟才民 (中国科学院上海硅酸盐研究所)

余建定 (中国科学院上海硅酸盐研究所)

潘秀红 (中国科学院上海硅酸盐研究所)

赵洪阳 (中国科学院上海硅酸盐研究所)

場所：静岡大学電子工学研究所

(10) 開催日：2014年3月27日(木)、3月28日(金)

参加者：早川泰弘、稲富裕光

場所：宇宙航空研究開発機構

[3] 成果

(3-1) 研究成果

(1) 国際宇宙ステーション内の微小重力環境下で GaSb(111)A/InSb/GaSb(111)A 構造試料の成長実験を実施し、成長アンブルを回収し、解析を行っている。微小重力環境下の方が1G環境下よりも GaSb 種結晶の InSb 融液への溶解量が小さ



図1 宇宙実験と地上実験のアンブル外観

いこと、固液界面形状がより平坦である結果を得た。これは、1 G 環境下では密度の小さい GaSb が密度の高い InSb 溶液に溶解する際、濃度差対流により溶解した GaSb が溶液上部に輸送され、種結晶界面の溶液が未飽和になる結果、溶解が促進されるのに対して、微小重力環境下では溶質輸送が拡散律速になるため、溶解量が少ないことを示している。

- (2) 数値解析では、InGaSb 結晶成長に関して界面カインेटィクスを考慮した解析を行った。カインेटィクス係数が小さくなるにつれて、InGaSb 結晶成長速度および GaSb 供給原料の溶解速度が小さくなる結果が得られた。
- (3) GaSb、InSb、 $In_xGa_{1-x}Sb$ の粘性、濡れ性および蒸発率測定結果を解析し、論文にまとめた。InGaSb の粘性値は GaSb の粘性値よりも低く、InSb の粘性値よりも高いことが示された。また、InGaSb 溶液と石英、窒化ボロン、グラファイトとの濡れ性は低く、InGaSb 溶液と C-103 カートリッジ材料との濡れ性は非常に高いことがわかった。これは、InGaSb 溶液と石英、窒化ボロンとの反応が抑制できることや、アンブルが損傷し InGaSb 溶液が漏れ出した場合でも、溶液は C-103 カートリッジ全域に広がるため、カートリッジの一部分で腐食が促進されて穴があくことがないことを示している。

Sample	GaSb		$In_xGa_{1-x}Sb$		$In_xGa_{1-x}Sb$		$In_xGa_{1-x}Sb$		$In_xGa_{1-x}Sb$		InSb	
Temperature (°C)	900	1100	900	1100	900	1100	900	1100	900	1100	900	1100
Quartz substrate												
BN substrate												
Graphite substrate												
C-103 substrate												

図2 InGaSb 溶液と石英、窒化ボロン、グラファイト及びC103 との濡れ性評価結果。

(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。国際宇宙ステーション内実験と地上実験、および数値解析により、熱・溶質輸送効果と結晶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。本研究は InGaSb、SiGe や InGaAs 等の混晶半導体結晶成長にも適用できる一般的な概念の構築を目指している。本共同研究プロジェクトでは、静岡大学、宇宙航空研究開発機構、大阪大学、静岡理工科大学の研究者ネットワークを構築している。

[4] 成果資料

著書リスト

- (1) M.Arivanandhan, Y.Inatomi and Y.Hayakawa, “Compositionally homogeneous $Si_{1-x}Ge_x$ and $Mg_2Si_{1-x}Ge_x$ bulk crystals for thermoelectric applications”, Transworld Research Network (Edited by A. Gayathri) pp.51-68 (2013).

論文リスト

- (1) M.Nobeoka, Y.Takagi, Y.Okano, Y.Hayakawa and S.Dost, “Numerical simulation of InGaSb crystal growth by temperature gradient method under normal- and micro-gravity fields”, J.Cryst.Growth, vol.385, pp.66-71 (2013).
- (2) K.Sakata, M.Mukai, G.Rajesh, M.Arivanandhan, Y.Inatomi, T.Ishikawa and Y.Hayakawa, “国際宇宙ステーションでの結晶成長実験に関する溶融 $In_xGa_{1-x}Sb$ の粘度測定”, 熱物性誌, vol. 27, No.4, pp.152-156 (2013).
- (3) M.Omprakash, M.Arivanandhan, R.Arun Kumar, H.Morii, T.Aoki, T.Koyama, Y.Momose, H.Ikeda, H.Tatsuoka, Y.Okano, T.Ozawa, S.Moorthy Babu, Y.Inatomi and Y.Hayakawa “Analysis of dissolution and growth process of SiGe alloy semiconductor based on penetrated X-ray intensities”, Journal of Alloys and Compounds, vol.590, pp.96-101 (2014).
- (4) K.Sakata, M.Mukai, G.Rajesh, M.Arivanandhan, Y.Inatomi, T.Ishikawa and Y.Hayakawa, “Thermal properties of molten InSb, GaSb, and $In_xGa_{1-x}Sb$ alloy semiconductor materials in preparation for crystal growth experiments on the international space stations”. Advances in Space Research, vol.53, pp.689-695 (2014).
- (5) R.Basu, S.Bhattacharya, R.Bhatt, M.Roy, S.Admad, A.Singh, M.Navaneethan, Y.Hayakawa, D.K.Aswal and S.K.Gupta, “Improved thermoelectric performance of hot pressed nanostructured n-type SiGe bulk alloys”, J.Materials Chemistry A (2014) in print.

出張報告

氏 名：稲富 裕光

所 属：宇宙航空研究開発機構

期 間：2013年10月15日-10月16日

用務先：静岡大学電子工学研究所

用務内容：研究打ち合わせ

主たる対応者：早川泰弘