

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
(静岡理工科大学)

[2] 研究経過

研究目的・概要：

InGaSb や SiGe 等の混晶半導体は組成比により、禁制帯幅や格子定数を制御できる。しかし、均一で高品質な混晶半導体バルク単結晶成長のためには(1)結晶成長時における結晶組成と溶液組成の変化、及び(2)溶液の濃度分布と温度分布の揺らぎに起因した成長界面不安定と多結晶化の問題を解決する方法が求められている。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。そのために、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。

本プロジェクトの目的は(1) X線透過法を用いて、様々な温度条件のもとで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) X線透過法を用いて、Ge 溶液中への Si 溶質の溶解過程と SiGe 結晶成長過程の観察を行い、溶質対流が溶解過程に及ぼす効果を調べた。重力の変数とした数値解析により、溶質対流効果を明らかにした。(2) 熱電素子材料として有望な均一

組成 SiGe バルク結晶を成長させ、熱電特性を調べた。

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) 2012年4月23日 静岡大学電子工学研究所、岡野先生と研究打ち合わせ
- (2) 2012年6月5日 静岡大学電子工学研究所、岡野先生と研究打ち合わせ
- (3) 2012年7月22日-23日 静岡大学電子工学研究所、岡野先生と研究打ち合わせ
- (4) 2012年10月28日—11月3日 中華人民共和国桂林市、稲富先生と研究打ち合わせ
- (5) 2013年1月30日大阪大学大学院基礎工学研究科、岡野先生、稲富先生と研究打ち合わせ

[3] 成果

(3-1) 研究成果

図1に測定システムを示す。X線源はタングステンターゲットを用いており、印加電圧150kV、電流100mAまで制御できる。X線画像検出器は、0.1mmのCdTe素子を縦に1,510個、横に64個配列した二次元検出器である。試料のX線透過強度を時間と温度の関数として測定し、Si溶解過程、SiGe溶液中の濃度分布変化とSiGe結晶成長過程を測定した。

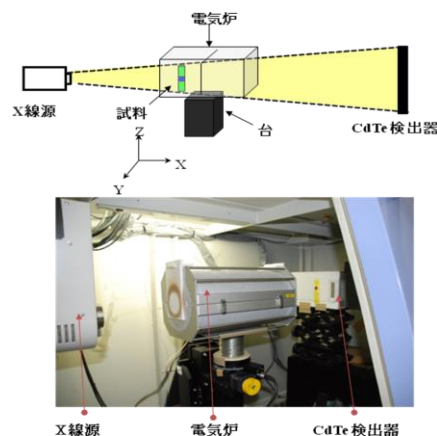


図1 X線透過測定システム。

図2に実験に用いたアンプル形状を示す。Si種結晶/Ge/Si 供給原料から構成されるサンドイッチ構造試料を窒化ボロン管に入れ、これをさらに石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。温度勾配を1.16°C/mmに

設定した。図3はX線透過イメージ像を温度と時間の関数として測定結果である。また、図4にX線透過強度分布変化を示す。室温のX線透過像からSi種結晶/Ge/Si供給原料の配置を明瞭に観察できる。参照温度が970°Cに達するとGe結晶が融解し体積が約5%減少する。これはGeの液体密度(5.60 g/cm³)が固体密度(5.323 g/cm³)よりも大きいためである。さらに温度を上昇させると、Si種結晶がGe融液中に溶解し、SiGe溶液が形成される。本実験から、種結晶側の温度が供給原料側の温度よりも低いにも関わらず、低温側のSi種結晶の溶解が促進されることが示された。これは、Siの液体密度(2.390 g/cm³)がGeの液体密度よりも低いいため、軽いSi溶質が密度差に起因した溶質対流により上部に輸送され種結晶側の溶液が未飽和になるためである。一方、上部の供給原料近傍では、Si溶質濃度が高くなるため、供給原料の溶解が抑制される。以上の結果は結晶の溶解過程に重力が大きな影響を及ぼすことを示している。

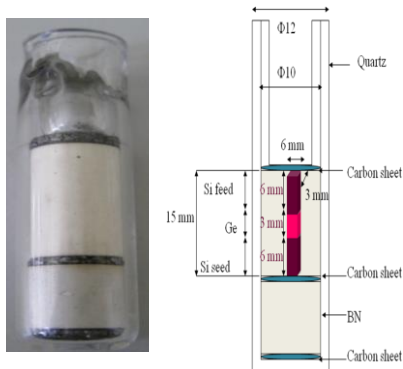


図2 アンプル形状。

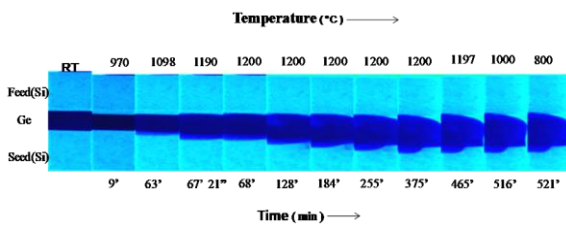


図3 X線透過イメージ像。

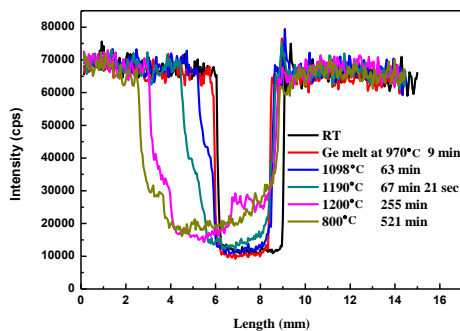


図4 X線透過強度分布変化。

(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、大阪大学、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、熱・溶質対流や界面方位が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。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。

[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 Mg₂Si_{1-x}Ge_x bulk crystals for thermoelectric applications", Transworld Research Network (Edited by A. Gayathri), Research Developments in Crystal Growth (in print).

論文リスト

- (1) M.Arivanandhan, G.Rajesh, A.Tanaka, T.Ozawa, Y.Okano, Y.Inatomi and Y.Hayakawa, "Bulk growth of InGaSb alloy semiconductor under terrestrial conditions: A preliminary study for microgravity experiments at ISS", Defect and Diffusion Form, vol.323-325 pp.539-544 (2012).
- (2) Y.Takagi, N.Suzuki, Y.Okano, A.Tanaka, Y.Hayakawa and S.Dost, "Numerical simulation of the dissolution process of GaSb into InSb melt under normal and microgravity conditions", Transactions of the Japan Society for Aeronautical and Space Sciences, Aerospace Technology, Japan, vol. 10, Ph_1-Ph_7 (2012).
- (3) Y.Inatomi, K.Sakata, Y.Hayakawa, A.Tanaka, T.Ozawa, Y.Okano, T.Ishikawa, M.Takayanagi, S.Yoda and Y.Yoshimura, "Current status of alloy semiconductor crystal growth project under Microgravity" Transactions of the Japan Society for Aeronautical and Space Sciences, Aerospace Technology Japan, vol. 10, pp. Th_1-Th_4 (2012).
- (4) D.Mouleeswaran, T.Koyama, A.Tanaka and Y.Hayakawa, "Selective epitaxial growth of GaAs by current controlled liquid phase epitaxy". J.Cryst. Growth, vol.362, pp.238-2427 (2013).

(2013.2).

出張報告

氏 名：岡野 泰則

所 属：大阪大学大学院基礎工学研究科

期 間：2012年7月22日—7月23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