

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
 (インド国アンナ大学)
 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

混晶半導体バルク結晶は組成比により禁制帯幅や格子定数を制御できるため、デバイス材料として有用である。しかし、構成元素の比重差の相違により密度差対流が発生し、さらに液相線と固相線の乖離が大きいため、均一組成の良質な混晶半導体単結晶成長が困難である。問題解決のためには、結晶成長に大きな影響を及ぼす高温溶液中の熱・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が必要である。そのために、(1) 国際宇宙ステーション内の対流の極めて小さい微小重力環境下での実験結果と地上実験結果を比較することで、対流や拡散による溶質輸送が混晶半導体結晶成長に及ぼす効果を把握すること、(2) X線イメージセンサーを用いた溶液中の溶質濃度分布のその場観察実験と熱・溶質輸送効果の数値解析を行うことで、混晶半導体結晶の溶解と成長、溶質輸送の関係を把握すること、さらに応用を目指し、(3) 不純物添加均一組成 $Si_{1-x}Ge_x$ 結晶成長と熱電特性評価に取り組んだ。今回は、宇宙実験と $Si_{1-x}Ge_x$ 結晶成長と熱電特性評価について報告する。

[3] 成果

(3-1) 国際宇宙ステーション内の微小重力実験試料の解析と結晶面方位効果の研究
 国際宇宙ステーション「きぼう」内の微小重力環境下において GaSb 種結晶/InSb/ GaSb 原料供給結晶試料

を用いて、 $In_xGa_{1-x}Sb$ 混晶半導体結晶成長実験を行った。実験は、種結晶として GaSb 面方位が {111} A、{111} B、{100} と {110} 面の 4 本の試料を用いた。同様の実験を地上で行い、重力が InGaSb の結晶成長に及ぼす効果を調べた。GaSb 面方位が {111} A の種結晶を用いた微小重力実験試料と地上実験試料の比較により、(1) 微小重力実験結晶は地上実験結晶よりも種結晶の溶解が小さく、供給原料の溶解が大きいこと、(2) 微小重力実験結晶は地上実験結晶よりも界面平坦性が良いこと、In 組成の変動幅が小さく、結晶成長速度が速いことや結晶欠陥密度が低いこと等が明らかとなった。これらの結果は、重力に起因する対流が結晶の溶解過程と成長過程に顕著な影響を与えることを明瞭に示していた。研究成果は、2015 年に Nature Partner Journal の npj Microgravity に掲載された。

微小重力環境下における温度分布と濃度分布を数値解析し、固液界面形状を求めた。基礎方程式は、液体内では運動方程式、エネルギー方程式、拡散方程式及び固体内ではエネルギー方程式であり、Volume-Averaging continuum 法を OpenFORM に導入し、計算した。図 1 に固液界面形状の比較を示す。左側が微小重力実験結果、右側が数値解析結果である。成長界面は溶液側に少し凸状になっており、実験結果と計算結果は良い一致を示している。さらに結晶面方位の効果を取り入れた数値解析を行ない、結晶面方位が結晶溶解と成長に及ぼす効果を調べている。

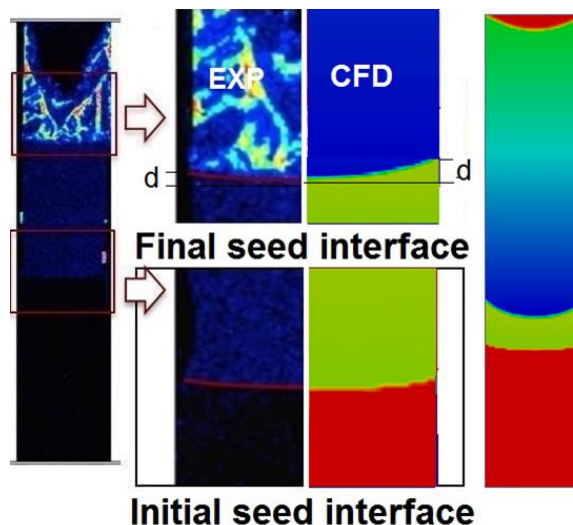


図 1 固液界面形状の比較

(3-2) 均一組成 $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ 結晶成長と熱電特性評価
 熱電材料として有望な SiGe 結晶の単結晶、多結晶、ナノ結晶を成長させ、形態が熱電特性に及ぼす効果を調べている。今回 InGaSb の結晶成長法と同じ温度勾配徐冷法を用いて、 $5 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ の Sb 不純物添加均一組成 $\text{Si}_{0.68}\text{Ge}_{0.32}$ 結晶を成長させた。図 2 に SiGe 成長結晶の断面写真と半径方向の Si 組成分布を示す。組成変動が 0.006 と小さい $\text{Si}_{0.73}\text{Ge}_{0.27}$ 多結晶成長に成功した。これは、温度勾配を $0.5 \text{ }^\circ\text{C/mm}$ と小さくすることで、組成の変化を抑制できたためである。

図 3—7 に抵抗率、ゼーベック係数、熱伝導率と無次元性能指数の温度依存性を示す。温度が高くなるにつれて抵抗率は高くなった。これは、電子—フォノン散乱が大きくなったためで、金属的な性質を示している。900K 以上で減少するのは、電子と正孔の生成によりキャリア濃度が高くなるためである。ゼーベック係数は温度上昇に伴い大きくなるが、さらに温度を高くすると減少した。性能指数は 820 K 近傍で最大値 0.44 が得られた。今までに報告されているリン添加 $5 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ の SiGe バルク結晶の値 0.06 よりも大きな値が得られた。(J.Crystal Growth 印刷中)

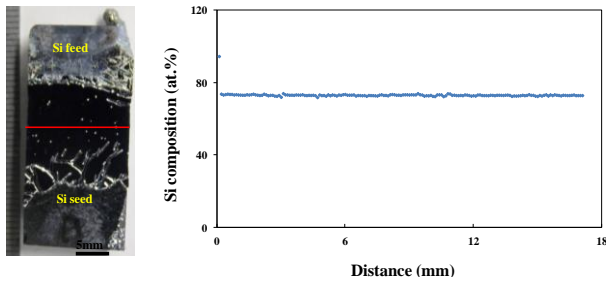


図 2 SiGe 成長結晶の断面写真と半径方向の Si 組成分布図

(3-3) 波及効果と発展性など

熱・溶質輸送効果と結晶界面方位効果を把握し、混晶半導体バルク結晶成長機構を明らかにする。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提案する。SiGe 結晶の熱電特性向上を図ることで、排熱を有効に利用するデバイス作製に取り組む。

[4] 成果資料 (Journal 論文リスト)

- (1) Y.Inatomi, K.Sakata, M.Arivanandhan, GRajesh, VNirmal Kumar, T.Koyama, Y.Momose, T.Ozawa, Y.Okano and Y.Hayakawa, npj Microgravity, vol. 1 (2015) 15011.
- (2) X.Jin, H.Mirsandi, T.Yamamoto, Y.Takagi, Y.Okano, Y.Inatomi, Y.Hayakawa and S.Dost, Jpn. J.Appl.Phys (2016) in print
- (3) M.Omprakash, M.Sabarinathan, M.Arivanandhan, D.K.Aswal, S.Bhattacharya, T.Koyama, Y.Momose, H.Ikeda, H.Tatsuoka, Y.Inatomi and Y.Hayakawa, J. Crystal Growth, vol. 76 (2016) 102.

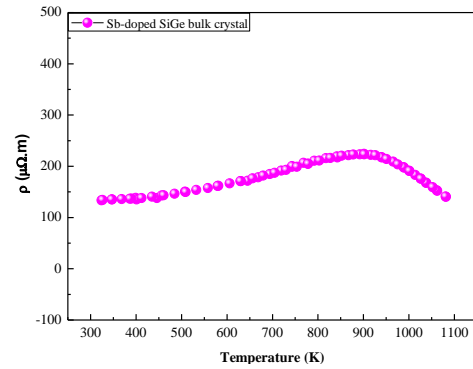


図 3 SiGe 結晶の抵抗率温度依存性

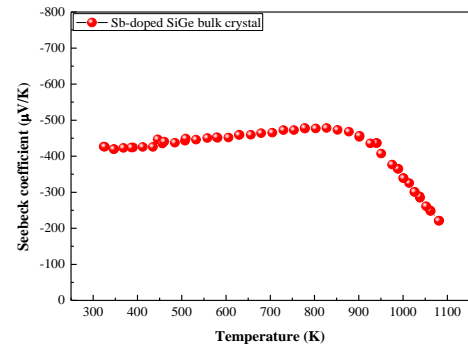


図 4 SiGe 結晶のゼーベック係数依存性

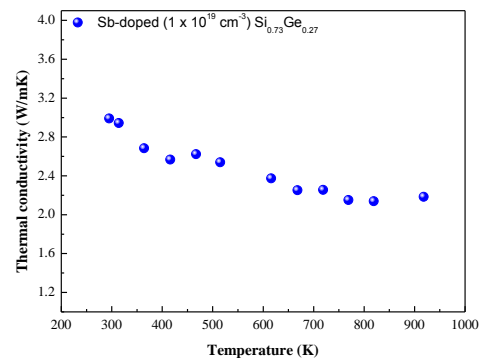


図 5 SiGe 結晶の熱伝導率依存性

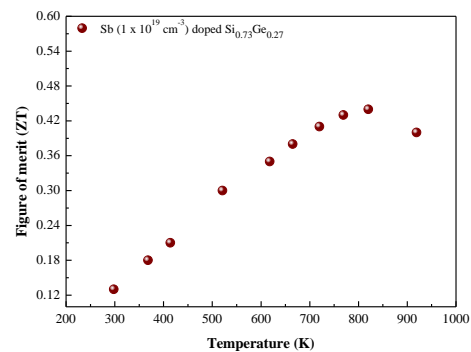


図 6 SiGe 結晶の無次元性能指数温度依存性

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：2015年7月28日 — 7月29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