

SiGe 結晶宇宙実験条件の精密化

木下恭一¹, 荒井康智¹, 稲富裕光¹, 宮田浩旭², 田中涼太², 塚田隆夫³,
高柳昌弘¹, 依田真一¹

¹宇宙航空研究開発機構、²(株) エイ・イー・エス、³東北大学

Refinement of SiGe crystal growth conditions in space

Kyoichi KINOSHITA^{1*}, Yasutomo ARAI¹, Yuko INATOMI¹, Hiroaki MIYATA²,
Ryota TANAKA², Takao TSUKADA³, Masahiro TAKAYANAGI¹, Shinichi YODA¹

¹Institute of Space and Astronautical Science, JAXA, 2-1-1, Sengen, Tsukuba, 305-8505

²Advanced Engineering Services Co. Ltd. Takezono, Tsukuba, 305-0032

³Tohoku University, Aoba-ku, Sendai, 980-8579

E-Mail: kinoshita.kyoichi@jaxa.jp

Abstract: Growth condition refinement for SiGe crystals by the traveling liquidus-zone (TLZ) method in space is described. Although growth conditions in a laboratory furnace on the ground have been established, refinement of crystal growth conditions is required for space experiments since thermal conditions in a furnace aboard the space station are different from the laboratory furnace due to furnace size difference and convection suppression in space. Principle of the TLZ method and objectives of space experiments are also described.

Key words; Space experiment, TLZ method, Si-Ge alloy, GHF, Microgravity, Semiconductor

1. はじめに

微小重力環境下で均一組成の混晶育成を可能とする新しい結晶成長方法 Traveling Liquidus-Zone 法(略称 TLZ 法)を考案し¹⁻⁵⁾、国際宇宙ステーション内日本実験棟「きぼう」を利用した宇宙実験の準備を進めてきた⁶⁾。研究室の炉で確立された TLZ 法 SiGe 結晶成長条件を宇宙実験用のサイズの小さな炉に移し替え、宇宙実験で最適な成長条件を達成すべく検討を進めている。これまでの取り組み状況と今後の計画について記述する。

2. 宇宙実験の目的

TLZ 法を SiGe の結晶成長を通して確立することを目的とする。大口径均一組成達成のためには軸方向だけではなく、径方向の均一性も求められる。対流の抑制できる微小重力下では結晶化に伴う溶質濃度分布を見積ることが容易となるので、径方向の組成分布を評価するために考案した二次元 TLZ モデル⁷⁾の妥当性を宇宙実験を通して検証する。

3. SiGe の有用性

SiGe は Si テクノロジーの限界を打破する次世代基板材料として期待されている⁸⁾。SiGe 基板上に格子定数の異なる Si 薄膜と Ge 薄膜をエピタキシャル成長させることができれば、どちらの膜もひずみを受けることになるが、このひずみは電子や正孔の移動度を向上させる⁹⁾。図 1 に SiGe 基板上に形成された CMOS の例を示す。この場合に期待される移動度の値を表 1 に示す。Si CMOS に比べ、ひずみ Si n-MOS で約 2 倍、ひずみ Ge p-MOS で約 7 倍の移動

度となる。特に注目したいのが、p 型の移動度である。この値は GaAs の正孔移動度の 3 倍程度と大きい。この CMOS を利用して CPU を作製することができれば、処理速度の向上とともに、消費電力の大幅な低減が期待される。なぜならば、低い駆動電圧でも高速処理ができるようになるからである。

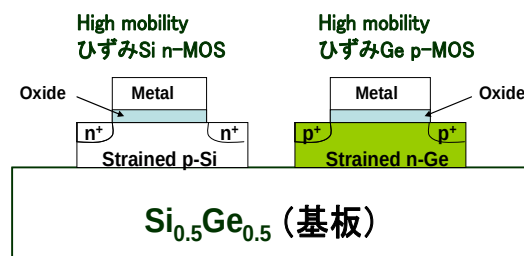


Fig. 1 CMOS on a Si_{0.5}Ge_{0.5} substrate

Table 1 Comparison of mobility between Si and Si_{0.5}Ge_{0.5} substrate.

Si 基板	Si _{0.5} Ge _{0.5} 基板
Si n-MOS 680 cm ² /Vs	歪 Si n-MOS 1000 cm ² /Vs
Si p-MOS 170	歪 Ge p-MOS 1200

4. TLZ 法の原理

図 2 に TLZ 法による SiGe 結晶成長の場合の試料構成、Ge 濃度分布および Si-Ge 系状態図との関係を示す¹⁻⁵⁾。TLZ 法はゾーンメルト法の一つであるが、通常のゾーンメルト法と異なり、10°C/cm 程度の低い温度勾配の下でゾーンを形成するのが特徴である。

ゾーンは融点の低い Ge を Si (種結晶) と Si (原料) で挟み、加熱することにより形成される。ゾーンの両端 (成長界面および溶融界面) は融液と固体が共存するためにリキダス組成になっている。この時、ゾーンの両端間で溶質の濃度勾配が形成される。ゾーン幅を狭くすると、ゾーン全体がほぼリキダス組成になり、この濃度勾配が、温度勾配によって制御できるようになる。この点に、TLZ 法最大の特長がある。そのために、温度勾配さえ測定できれば、結晶成長速度 V を (1) 式により正確に予測できるようになる。なお、(1) 式は定常状態結晶成長の成長界面でのマスバランスの式から導かれる。なお、 $(\partial T / \partial Z)$ は融液中の温度勾配である。

上述したように TLZ 法では正確な成長速度が予測できるので、成長速度 (成長界面移動速度) に合わせて、ヒータもしくは試料を移動させることにより成長界面を常に一定位置に保つことが可能になり、すなわち界面温度を常に一定に保つことが可能になり均一組成が実現できる。逆に成長速度から結晶が成長する時の温度勾配を求めることもできる。

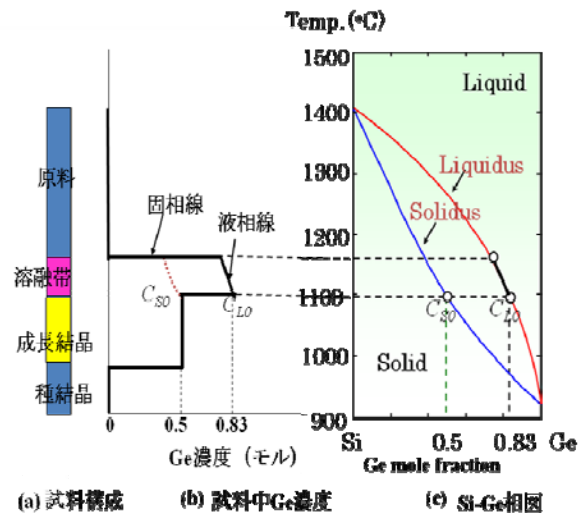


図 2. TLZ 法の原理

5. Ground Model 炉を用いた宇宙実験準備

TLZ 法における二次元性の考察のためには宇宙実験で TLZ 法の原理による結晶成長を行わせることが前提となる。そのためには、一定な温度勾配の設定が望ましい。宇宙実験用の温度勾配炉は図 3 に示すように、地上実験で通常使用する電気炉よりもヒータの距離が短く、長い領域にわたり一定な温度勾配を維持するのが難しい。そのため、地上での実験条件出しを十分行う必要がある。その詳細な実験結果は昨年報告したのでここでは省略するが、宇宙実験を予定している温度勾配 $7^{\circ}\text{C}/\text{cm}$ と $14^{\circ}\text{C}/\text{cm}$ に対する加熱条件を決定した。最終的に決定した加熱条件の下での、Ground Model 炉実験結果を図 4 および図 5 に示す。15mm の成長距離でほぼ一定な組成が得られている。

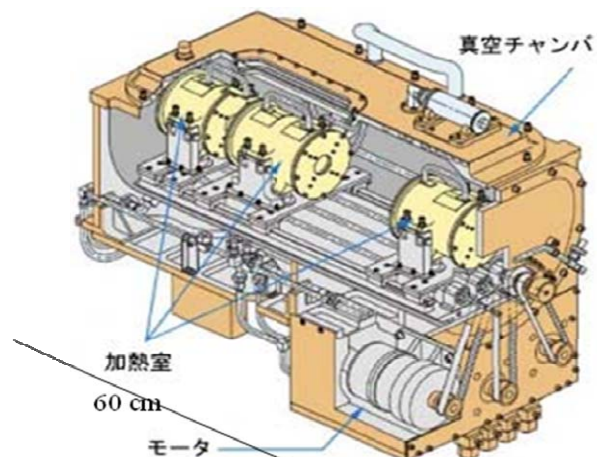
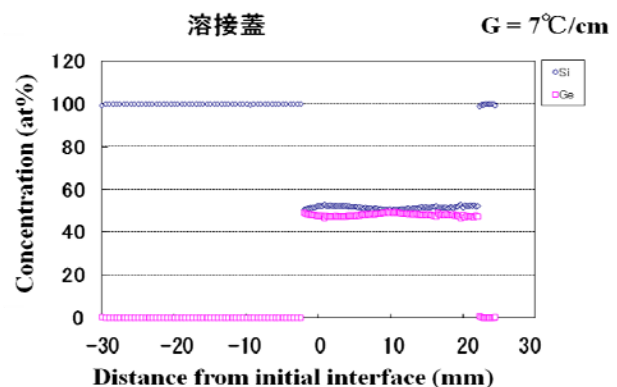


図 3. 宇宙実験用温度勾配炉外観

6. 宇宙実験条件の最適化

宇宙実験では、地上実験で図 4 の結果が得られた実験条件で 1 本目の実験を行い、持ち帰ってきた試料での組成分布測定から融液内の対流が抑制されたことによる試料内温度分布の変化を測定し、2 本目以降の実験条件を再調整し、実験条件の最適化を図る予定である。これまでの地上実験で、組成分布の均一化を図る調整では初期界面温度と終端界面温度の調整を行い、温度勾配の調整は行わなかった。この理由は、温度分布が線形的ではなく、初期界面温度を調整すると温度勾配も変化することに依る。TLZ 法では成長速度は試料移動速度に依存せず温度勾配に比例することが確認されているので、温度勾配の微調整は必要ないと判断している。

図 4. 温度勾配 $7^{\circ}\text{C}/\text{cm}$ における組成分布

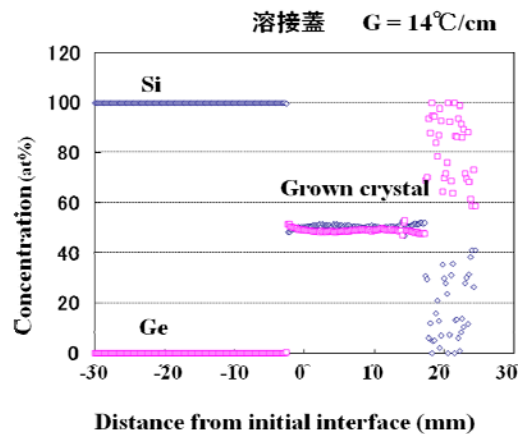


図 5. 温度勾配 $14^{\circ}\text{C}/\text{cm}$ における組成分布

7. まとめ

国際宇宙ステーションを利用した TLZ 法による SiGe 結晶成長実験計画について述べた。宇宙実験では融液中の対流による熱伝達がなくなるので温度勾配や結晶成長界面温度が地上とは違ってくる。その調整は 1 回目の実験試料を持帰り組成分布を解析して行うこととした。温度勾配炉と実験用カートリッジは 2011 年に打上済みである。今後は実験の成功に向けて運用に注力していきたい。

参考文献

- 1) Kinoshita, K., Kato, H., Iwai, M., Tsuru, T., Muramatsu, Y. and Yoda, S., *J. Crystal Growth*, **225**, 59 (2001).
- 2) Kinoshita, K., Hanaue, Y., Nakamura, H., Yoda, S., Iwai, M., Tsuru, T., Muramatsu, Y., *J. Crystal Growth*, **237-239**, 1859 (2002).
- 3) 木下恭一, 緒方康行, 越川尚清, 足立 聡, 他, *日本結晶成長学会誌* **29**, 349 (2002).
- 4) Nakamura H., Hanaue, Y., Kato, H., Kinoshita, K. and Yoda, S., *J. Crystal Growth*, **258**, 49 (2003).
- 5) Kinoshita, K. and Yoda, S., *J. Crystal Growth*, **318**, 1026 (2011).
- 6) 木下恭一, 他 ; SiGe 結晶成長の地上準備実験, *宇宙利用シンポジウム (第 27 回)*, pp. 39-40 (2011).
- 7) Adachi, S., Kinoshita, K., Takayanagi, M., and Miyata, H., *J. Crystal Growth*, **334**, 67 (2011).
- 8) Lee, M. L., and Fitzgerald, E. A., *Appl. Phys. Lett.* **83**, 4202 (2003).