

高性能コンピュータ実現のカギを握る新技術確立のために 微小重力下におけるTLZ法による均一組成SiGe結晶育成の研究

Hicari

背景

水を火にかけたり部屋でストーブを焚いたとき、水や空気が上下に流れる熱対流という現象がみられます。これは熱せられた水や空気の密度が変化し、これに重力が作用して起こるものです。ところが微小重力環境では、重力の影響がほとんどないために熱対流が抑制されます。この現象を利用して、工業分野では高品質な結晶が得られることが期待されています。

これまでの宇宙実験では、温度勾配炉という装置を用いて高品質な半導体結晶の成長を目指した実験が行われ、対流抑制によって結晶の組成均一性向上の可能性が示されました。

しかし狙いとする結晶品質達成のためには従来の方法では限界がありました。

そこでJAXAでは、「きぼう」に搭載する温度勾配炉(GHF)の開発と並行して、高品質な半導体結晶を育成するための研究を行ってきました。高品質の条件として、組成の均一性(構成する原子がそれぞれ一様に分散してムラがないこと)があげられます。JAXAが開発したTLZ法(Traveling Liquidus Zone Method)は、この組成均一性を飛躍的に向上させることが期待されています。

目的

この実験では、微小重力環境を利用してTLZ法の有効性を実証することを目的としています。そして、得られる結果をもとに大型かつ高品質な半導体結晶を地上で育成することに役立てます。

TLZ法は半導体の結晶成長方法である「ゾーンメルト法」をベースにしています。融点の低い(低温で融けやすい)材料を、種結晶と原料の間にはさんで温度差を付けて加熱することで、結晶原料が飽和濃度まで溶け込んだ融液帯(Liquidus Zone)を形成します。この融液帯を移動させ、種結晶上に狙いの組成の結晶を成長させます(図1)。

高品質な結晶を作るには、「温度勾配」と「加熱室の移動速

度」をきちんと制御し、成長速度と加熱室移動速度を同期させて結晶を成長させる必要があります。温度や濃度を座標軸として、その条件での物質の状態(固体、液体、気体)を表示した図を状態図(相図)といいます。TLZ法では、液体中の溶質濃度を、状態図から求められる飽和状態にすることによって、温度を決めれば濃度が自動的に決まるようにします。この情報をもとに、ある温度勾配を与えた時の成長速度を予測し、その成長速度に合わせて加熱室を移動させることによって、結晶が成長していくときの固体と液体の境目(結晶成長界面)における温度と濃度を一定に維持します。これにより、成長界面では常に一定組成の結晶を成長させることができます(図2)。

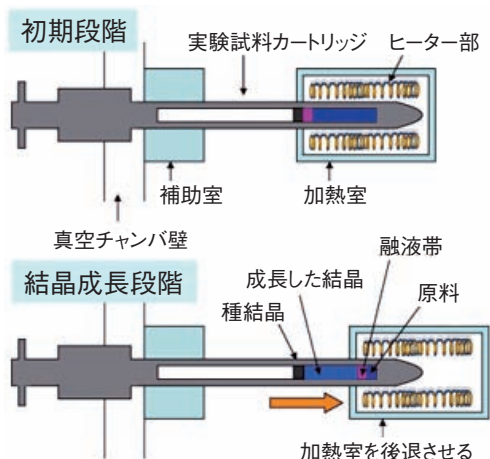


図1 実験中の加熱室の動き

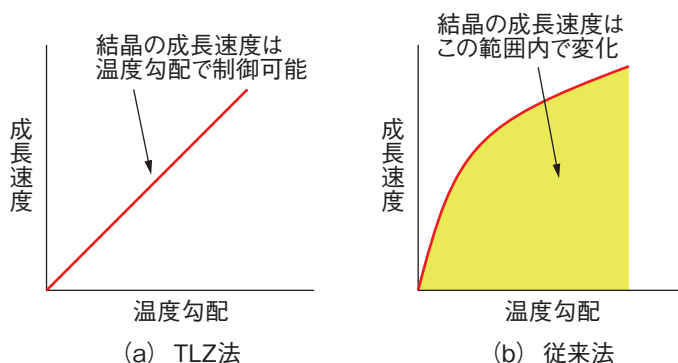


図2 TLZ法と従来法の比較

結晶の成長速度は溶質の濃度勾配によって決まります。TLZ法では、溶質の濃度勾配が温度勾配によって決められるため、温度勾配によって成長速度が決まり、一定に保つことができます。一方、従来法では、ある温度で様々な溶質濃度になることから、結晶の成長速度も様々な値をとってしまいます。

実験内容

JAXAが開発した新しい結晶成長方法(TLZ法)は、2成分以上の原子が均一に混ざった結晶を製造するのに最適な方法です。今回の実験ではシリコン(Si)とゲルマニウム(Ge)が半々に混ざった混晶半導体 $\text{Si}_{0.5}\text{Ge}_{0.5}$ を使用します(図3)。

実際には温度勾配炉(GHF)を使用して、温度1100～1200℃、温度勾配10℃/cm程度に加熱して原料の一部を溶かして帯状の融液帯を形成し、その融液帯を移動させて結晶成長を行います(図4)。

これまでの地上実験において、直径2mm程度の小さい結晶では熱対流の影響がさほど大きくないため、TLZ法の適用により均一組成の $\text{Si}_{0.5}\text{Ge}_{0.5}$ が製造できることを確認しています(図5)。ただ、現在の半導体素子は大きな円盤状の試料(ウエハー)を基にして製造されるため、TLZ法の試料を製造ラインに組み込み、量産体制を構築するためには、直径の大きな大口径円柱状試料が必要です。また、結晶の大口径化とともに直径方向の組成均一性も達成しなければなりません。これまでの研究により、結晶中の直径方向の組成不均一性は温度勾配の影響が大きいことが分かっています。しかし、融液中の温度勾配や濃度勾配は地上では対流を発生させてしまい、TLZ法の有効性を実証することができなくなります。

そこで、ISS「きぼう」内の微小重力環境を利用し、対流の発生を抑制したうえで、今回の実験を行います。本実験では、TLZ法の結晶成長の原理を確認するとともに、この直径方向の温度勾配の影響を評価し、大口径・均一組成の結晶を製造するための基礎的データを取得します。

ココがポイント!

シリコンは今や私達の生活になくてはならない半導体です。そのシリコン上の素子を小さくすることで、コンピュータは小型化・高速化を実現してきました。しかしその試みも限界まで来ていて、新しい素材や技術の出現が期待されているのが現状です。

こうした状況を打開するため、現在、シリコン(Si)とゲルマニウム(Ge)が半々に混ざった半導体 $\text{Si}_{0.5}\text{Ge}_{0.5}$ を基板とする「電界効果型MOS構造トランジスタ」が提案されています。今回の宇宙実験で、対流制御とTLZ法を組み合わせることにより、大口径の高品質単結晶が得られれば、高速低消費電力トランジスタの実現に道が開けることになります。

それは現在のコンピュータに比べると、処理能力は数倍、消費電力は1/7という高性能コンピュータが可能になることを意味しています。高性能化だけでなく地球環境にやさしい電子素子が実現できる点も注目されます。



10 mm

図3 SiGe結晶の外観

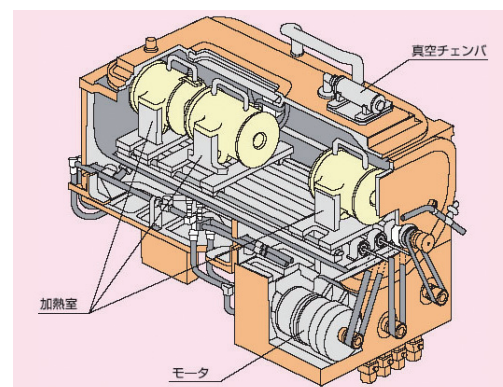


図4 温度勾配炉

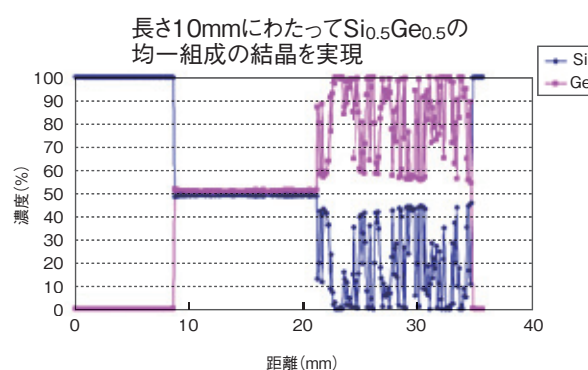


図5 直径2mmのSiGe結晶の長さ方向濃度分布
長さ10mm以上にわたってSiGeの均一組成の結晶を実現

プロフィール



木下 恭一

宇宙航空研究開発機構

宇宙科学研究所 主幹研究員

専門：半導体結晶成長