OUKA
The University of Osaka
Institutional Knowledge Archive

Title	Numerical investigation of instability mechanism on thermo-solutal Marangoni convection in a liquid bridge under zero gravity
Author(s)	Agampodi Mendis, Radeesha Laknath
Citation	大阪大学, 2021, 博士論文
Version Type	VoR
URL	https://doi.org/10.18910/85416
rights	
Note	

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

https://ir.library.osaka-u.ac.jp/

The University of Osaka

Form 3

Abstract of Thesis

Name （RADEESHA LAKNATH AGAMPODI MENDIS）	
Title	Numerical investigation of instability mechanism on thermo-solutal Marangoni convection in a liquid bridge under zero gravity (無重力状態での液柱内温度差・濃度差マランゴニ対流の不安定性機構に関する数値解析)

Abstract of Thesis

The theoretical onset of the Marangoni convection instability occurring in a half-zone liquid bridge of the floating zone (FZ) growth of Si_xGe_{1-x} (SiGe) has been investigated by a newly developed method using global linear stability analysis (LSA) incorporated with direct numerical simulations (DNS). A half-zone model of a liquid bridge between cold and hot disks is considered. This study is focused on three main aspects, onset of thermo-solutal Marangoni convection in the case that the same direction of the thermal and solutal Marangoni forces, onset of thermo-solutal Marangoni convection in the case that the opposite direction of the thermal and solutal Marangoni forces, and flow instabilities in a liquid bridge of smaller aspect ratios. In the case that the same direction of the thermal and solutal Marangoni forces, oscillatory disturbance patterns appear with different azimuthal wavenumbers for unstable eigenmodes. For pure thermal Marangoni convection in literature, the primary bifurcation is two-dimensional (2D) axisymmetric to a three-dimensional (3D) steady flow. On the other hand, the primary bifurcation in this study was 2D axisymmetric to a 3D oscillatory flow at
the onset as increasing the thermal Marangoni number. The stability range of the present global LSA is consistent with the previous results on thermo-solutal Marangoni convection obtained by DNS. The results were confirmed that the flow is 2D axisymmetric when the solutal Marangoni force is dominant when the thermal and solutal Marangoni forces are acting in opposite direction. The results reveal the hysteresis phenomena across thermal Marangoni numbers due to the coexistence of two stable flow solutions at the same thermal Marangoni number when thermal and solutal Marangoni convection coexists with opposing forces. The exactly
predicted stability limits of FZ crystal growth by the newly developed method would be useful to avoid possible flow-induced disturbances and lead to the growth of single crystals without growth striations. The effect of aspect ratio (A_s) of the liquid bridge on thermo-solutal Marangoni convection has been investigated by 3D numerical simulations. The As drastically affects the critical Marangoni numbers: the critical solutal Marangoni number has the same dependence on A_s as the critical thermal Marangoni number, i.e., it decreases with increasing As. The azimuthal wavenumber of the traveling wave mode increases as decreasing A_s but insusceptible of solutal Marangoni convection. The oscillatory modes of the hydro waves have been extracted as the spatiotemporal structures by using dynamic mode decomposition (DMD). The results suggest that the selection of the characteristic length of the Marangoni convection depends on A_s of the liquid bridge.

様式７

論文審査の結果の要旨及び担当者

氏　名	（RADEESHA LAKNATH AGAMPODI MENDIS）		
論文審査担当者	（職）		氏　　名
	主 査	教　授	岡野　泰則
	副 査	教　授	松林　伸幸
	副 査	教　授	馬越　　大

論文審査の結果の要旨

本論文は半導体混晶製造時に生じる温度差と濃度差に起因するマランゴニ対流の不安定性発生を正確に予想しうる手法を開発し、その手法を用い不安定性発生要因に関し理論的に明らかにしたものである。

シリコン（Si）とゲルマニウム（Ge）の混晶は次世代高性能半導体材料として注目されている。本混晶をデバイスとして使用するには薄膜が必要であるが、薄膜製造のためには基板材料が必須であり、薄膜と基板との格子定数や熱的な性質が近いことが高品質のデバイス作製に求められている。その究極がSi/Geの混晶基板である。しかしながら引き上げ法などの従来法で作製するとSiとGeの比重差のため、均一な基板用のバルク結晶を作製することは困難である。そこでゾーンメルティング法が均一結晶の作製法として考えられるが、るつぼからの不純物混入を考慮すればるつぼを使わないフローティング・ゾーン（FZ）法が最適であると考えられる。しかしながらFZ法では自由界面上の温度差、濃度差に起因するマランゴニ対流が発生し、作製結晶内面内不均一性を生じさせしまうことが知られている。そこで、対流の不安定性発生条件を正確に予想することが均一で高品質な結晶を作製する上で必須となる。

マランゴニ対流は化学工学分野や材料作製分野において古くから知られており、多くの実験的、数値解析的な研究が報告されている。しかしながらそれらのほとんどは、温度差、あるいは濃度差どちらか一方に起因するものであり、それら両者を同時に考慮した例は極めて少ない。また半導体融液は不透明であり、対流現象を可視化することは極めて困難であり、数値解析が極めて重要な研究手法となる。しかしながら従来の数値流体力学では、その解は離散化、アルゴリズム、格子サイズ等、多々の要因に左右されてしまい、正確な不安定性発現条件を見出す手法の開発が強く望まれてきていた。

本論文ではまず従来の方法とは異なるグローバル線形安定性解析なる手法を開発し、濃度差と温度差が同じ向きに作用する場合について、解析を行った。本法で既往の結果を良好に説明しうることを示した。さらに温度差と濃度差が互いに逆向きの場合に関して解析を行い、これまでに従来の数値解析で報告されてきた不安定性予測値にヒステリシスが現れることは物理的に正当であることを示した。またこれらの結果は、対流現象が温度差により誘起される速度と濃度差により誘起される速度の単なる合計や差分では表すことができない非線形現象であることを明らかにしている。

一方、融液のアスペクト比もマランゴニ数同様不安定性発生に及ぼす重要な因子である。しかしながら既往研究では適切な代表長さ選定の指針が無く、研究者によって対流の不安定性発現に及ぼすアスペクト比の影響はまちまちの結果であった。本研究ではこの観点より統一的な解析を行い、アスペクト比が1より大きいときには自由界面長さを、1より小さいときには系半径を代表長さに取ることにより既往の研究結果も含め統一的に整理しうることを示した。

以上で得られた結果はFZ法を用いた高品質Si/Ge結晶成長における最適条件の提案はもちろんのこと、濃度差と温度差が共存する全てのマランゴニ対流現象の解明に新たな指針を呈するものであり、工学的にも極めて重要なものである。従って博士（工学）の学位論文として価値のあるものと認める。