OUKA
The University of Osaka
Institutional Knowledge Archive

Title	Numerical investigation and process optimization of radio frequency heating Top-Seeded Solution Growth of SiC crystal
Author(s)	王, 磊
Citation	大阪大学, 2020, 博士論文
Version Type	VoR
URL	https://doi.org/10.18910/77515
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 （Lei WANG）	
Title	Numerical investigation and process optimization of radio frequency heating Top-Seeded Solution Growth of SiC crystal (誘導加熱トップシード溶液成長法によるSiC結晶成長の数値解析とプロセス最適化)

Abstract of Thesis

Radio frequency (RF) heating Top-Seeded Solution Growth (TSSG) method has attracted much attention to grow high quality silicon carbide (SiC) single crystals because the growth proceeds under the condition close to thermal equilibrium. In this process, melt flow plays an important role in affecting the quality of crystals. However, only few studies on the transport phenomena in the melt during the TSSG process have been conducted, and there are still some unclear phenomena existing and various design parameters in this system. Therefore, this work numerically investigates the transport phenomena in the melt and the application of external magnetic fields for the control of the melt flow. Further, the machine learning technique is utilized to search for the optimal control strategy for improving the growth rate.

The numerical model is developed and adapted for the calculation of electromagnetic field and heat transfer in the furnace, and fluid flow in the melt. The effect of Marangoni convection in the three-dimensional (3D) melt is firstly investigated. Marangoni induces a downward flow below the seed and causes a large supersaturation variation on the crystal surface, it adversely affects the crystal quality. Besides, the Marangoni induced downward flow is stronger in 2D simulation than that in 3D simulation. Then, the effect of input parameters and vertical positions of the RF-coil on the melt flow are surveyed. Numerical results showed that changing the frequency and current of the coil will change the strength of the electromagnetic field and heat generation, and different coil positions cause their distribution to be different. Although different 3D flow structures in the melt were observed under different operational parameters of the RF-coil, the role of Marangoni convection is often dominant, which leads to a non-uniform growth rate and unstable growth.

The applications of the external magnetic fields are investigated to control the melt flow. VMF (vertical magnetic field) and weak CMF (cusp magnetic field) are effective in suppressing the Marangoni convection. The application of VMF slows the growth rate (or reduces supersaturation) but reduces the variation of growth rate towards a more constant rate. Seed rotation appears to be not beneficial in the presence of CMF alone. However, the combined effect of seed rotation with VMF enhances the growth and makes the growth rate variation smaller. The use of external RMF (rotating magnetic field) may improve the supersaturation uniformity along the seed if it is properly adjusted with respect to the RF-coil induced electromagnetic field strength. Moreover, it is predicted that the application of RMF and seed rotation in the same direction may enhance the supersaturation below the seed.

Last but not least, a new optimization framework is developed for the optimal control of the crystal growth in the TSSG system. It combines the reinforcement learning technique and numerical simulations. Based on the previous discovery that electromagnetic field affects the melt flow and suppresses Marangoni convection. The present work is to apply the optimal Lorentz force strength for improving the growth rate uniformity and magnitude. After obtaining the optimal strategy, the optimized input parameters of the RF-coil can be found.

様式7

論文審査の結果の要旨及び担当者

氏　名　（　Lei WANG　）		
	（職）	氏　名
論文審査担当者	主 査　教 授 副 査　教 授 副 査　教 授	岡野　泰則 平井　隆之 西山　憲和

論文審査の結果の要旨

本研究は、パワーデバイスとして有望である、SiCバルク結晶を高性能で作製するためのプロセスに関する基礎的研究である。現在広く製造に用いられている気相成長法に代わり、高性能、高速で結晶を作製しうる液相成長法に注目した。その中でもTop-Seeded Solution Growth (TSSG)法という方法に着目している。

昨今の研究をサーベイしたのち、まず所属研究室で以前開発されていた2次元数値解析コードを3次元に拡張した。2次元解析および無次元数の比較よりマランゴニ対流が極めて重要な影響を及ぼすことは予想されていたが、3次元解析によりその対流は強い非対称性と非定常性を呈し、成長結晶品質、特に結晶内濃度分布の不均一性を誘起する可能性があることを示した。

高品質結晶作製のためにはこの非定常な流れを制御する必要があるが、制御法として、(1)静的な手段と(2)動的な手段の2通りを検討した。(1)静的な手段としては、静磁場の印加とコイルに対するるつぼ位置の調整の2通りについて検討した。縦磁場を印加すると融液内の対流は著しく抑制されるが、過剰に抑制されてしまうため、つるぼから溶融した炭素が種結晶に到達することを阻害してしまうことが分かった。一方カスプ磁場を適切な結晶回転条件下で印加することにより、融液内の非定常対流を抑制しながら炭素供給を行えることが分かった。るつぼ位置の変化は融液内の濃度分布に影響を及ぼし、適切な位置設定をすることにより均一な濃度分布を得られることが分かった。しかしながら濃度の値自体は低下してしまうことも併せて分かった。(2)動的な手法としては回転磁場の印加について検討している。回転磁場印加によりやはり融液内対流、濃度分布の制御が可能であることが示された。

以上のように対流を制御することにより所望の結晶品質を有する結晶作製が可能であることが示されたが、実際の操作因子は極めて多く、それらの組み合わせは無限大に近い。そこで最適な条件を得るための操作因子の組み合わせを探索する手段として機械学習を適用することとした。しかし通常の手法では多くの教師データーが必要となるため、ここでは教師データーを必要としない強化学習を適用した。これにより極めて短時間で所望の品質を有する結晶育成のための操作条件の組み合わせを見つけることが可能となった。

以上の知見はこれまでに知られていなかったものであり、本研究で新たに明らかになったものである。従って本研究は博士（工学）の学位論文として価値のあるものと認める。