

(続紙 1)

京都大学	博士 (情報学)	氏名	加藤 祥太
論文題目	Gray-box modeling and model-based control of Czochralski process producing 300 mm diameter Silicon ingots (直径300mmのシリコンインゴットを製造するチョクラルスキープロセスのグレーボックスモデリング及びグレーボックスモデルに基づく予測制御)		
(論文内容の要旨)			
<p>半導体の原料であるシリコンインゴット (円柱状の単結晶シリコン) を製造する Czochralski (CZ) プロセスでは、インゴットの大口径化が進んできた。現在は直径300mmのインゴットが工業的に最も広く用いられているが、今後のさらなる大口径化も見据えて、高品質化と安定生産を実現するために、結晶品質と直径を精密に制御できる新しい制御方法の確立が求められている。本論文では、直径300mmのインゴットを製造するCZプロセスを対象にして、そのグレーボックスモデル (現象論に基づく第一原理モデルとデータに基づく統計モデルを組み合わせたモデル) の構築と、グレーボックスモデルに基づく非線形モデル予測制御による制御性能改善を目標にした研究の成果について論述されている。</p> <p>第1章では、CZプロセスと既存の制御システムについて説明した後、本研究の目的および位置付けを明確化している。これまで、結晶半径、結晶成長速度、融液面位置 (またはヒーター温度) の3つの制御変数すべてを予測するモデルは提案されておらず、本研究では、直径300mmのインゴットを製造するCZプロセスを対象として、第一原理モデルと統計モデルを組み合わせたグレーボックスモデルを構築すること、さらに、そのグレーボックスモデルを用いた非線形モデル予測制御を採用することが述べられている。</p> <p>第2章では、CZプロセスのグレーボックスモデルについて述べられている。まず、文献調査結果を踏まえて、これまで直径300mmのシリコンインゴットを製造するCZプロセスの挙動を高精度に表現できるモデルが存在しなかったことを指摘している。その上で、既存の第一原理モデルの問題点を特定し、補足的な統計モデルを第一原理モデルと組み合わせることで、新たにグレーボックスモデルを構築している。実プラントの操業データを用いて、単結晶引き上げ中の制御変数の予測精度を検証した結果、グレーボックスモデルを用いることによって予測精度が大幅に向上したことを示している。</p> <p>第3章では、新たに構築したグレーボックスモデルを用いて、CZプロセスを制御する方法について述べられている。グレーボックスモデルは高次元の微分代数方程式系であるため、そのまま非線形モデル予測制御システムのモデルとして用いると、最適化計算に時間がかかる。本研究では、計算コストを削減するために、グレーボックスモデルを逐次線形化して制御用予測モデルを構築する手法を開発し、実用上十分に短い時間で最適な操作変数を算出できることを確認している。また、現在実プラントで採用されているPID制御を中心とした制御システムと提案する非線形モデル予測制御システムを制御シミュレーションによって比較し、提案システムがより高い外乱抑制性能を達成できることを示している。</p>			

第4章では、実際のCZプロセスを制御する際に問題となるモデル化誤差に注目し、モデル化誤差を抑制して制御性能を高く維持するために、モデルを逐次更新する方法について述べられている。本研究では、moving horizon estimation (MHE)によってグレーボックスモデルのパラメータを逐次更新することで、モデル化誤差の影響を低減し、大きなモデル化誤差が存在する場合においても高い外乱抑制性能を実現できることを明らかにしている。

第2章から第4章までの検討により、1) 第一原理モデルを統計モデルで補うという発想の下、直径300mmのインゴットを製造するCzochralski (CZ)プロセスのグレーボックスモデルを構築し、2) そのグレーボックスモデルに基づく非線形モデル予測制御システムを設計し、3) モデル化誤差を軽減できるモデル更新方法を開発し、4) グレーボックスモデルに基づく非線形モデル予測制御によって、大きなモデル化誤差が存在する状況であっても、高い外乱抑制性能を実現できることを明らかにした。

今後は、本研究で構築した非線形モデル予測制御システムを実際のCZプロセスに適用し、その有用性を検証する計画である。なお、本研究ではCZプロセスの直胴成長部に焦点を当てているが、CZプロセスの開始・終了時にも高品質化と安定生産を実現しなければならない。第2章の手法は直胴成長部を対象とすることを仮定していたが、直胴成長部以外に適用可能なモデルを構築できれば、第3章および第4章の手法を適用することで、開始・終了時の制御も可能となると期待される。

(論文審査の結果の要旨)

半導体の原料であるシリコンインゴットを製造するCzochralski (CZ) プロセスでは、インゴットの大口径化が進み、現在は直径300 mmのインゴットが工業的に主流であるが、さらなる不良品の削減が求められている。本研究では、CZプロセスの制御性能改善を目的として、実機データを用いてグレーボックスモデルを構築し、そのモデルに基づく非線形モデル予測制御システムを設計し、その制御性能をシミュレーションによって検証している。具体的には、以下に示す研究成果を得ている。

1. グレーボックスモデルの構築

これまで直径300mmのシリコンインゴットを製造するCZプロセスの挙動を高精度に表現できるモデルが存在しなかった。本研究では、既存のCZプロセス第一原理モデルの問題点を特定し、補足的な統計モデルを第一原理モデルと組み合わせることで、新たにグレーボックスモデルを構築した。実プラント操業データを用いて、単結晶引き上げ中の制御変数の予測精度を検証した結果、グレーボックスモデルによって予測精度を大幅に向上させることができた。

2. 非線形モデル予測制御システムの構築と性能検証

構築したグレーボックスモデルは高次元の微分代数方程式系であるため、そのまま非線形モデル予測制御に用いると、最適化計算に時間がかかる。本研究では、計算コストを削減するために、グレーボックスモデルを逐次線形化して制御用予測モデルを構築する手法を開発し、実用上十分に短い時間で最適な操作変数を算出できることを確認した。また、現在実プラントで採用されているPID制御を中心とした制御システムと提案する非線形モデル予測制御システムを制御シミュレーションによって比較し、提案システムがより高い外乱抑制性能を達成できることを示した。さらに、実用化に際して問題となる大きなモデル化誤差が存在する条件下であっても、moving horizon estimationによってモデルを逐次更新することで、高い外乱抑制性能を実現できることを明らかにした。

以上を要するに、本論文は、直径300mmのシリコンインゴットを製造するCzochralski (CZ) プロセスの品質安定化を目指して、第一原理モデルと統計モデルを組み合わせたグレーボックスモデルに基づく非線形モデル予測制御システムを構築し、制御シミュレーションを通してその有用性を示しているものであり、その成果は学術上および実用上寄与するところが少なくない。

よって、本論文は博士(情報学)の学位論文として価値あるものとして認める。また、令和3年11月24日に論文内容とそれに関連した事項について口頭試問を行った結果、合格と認めた。

なお、本論文は、京都大学学位規程第14条第2項に該当するものと判断し、公表に際しては、当面の間、当該論文の全文に代えてその内容を要約したものとすることを認める。