

横磁場印加チヨクラルスキー法を用いた結晶径300 mm シリコン単結晶成長プロセスにおける熱・物質輸送現象の解明

横山, 竜介

<https://doi.org/10.15017/2534423>

出版情報：九州大学, 2019, 博士（工学）, 課程博士
バージョン：
権利関係：

氏 名 : 横 山 竜 介

論 文 名 : 横磁場印加チョクラスキー法を用いた
結晶径 300 mm シリコン単結晶成長プロセスにおける
熱・物質輸送現象の解明

区 分 : 甲

論 文 内 容 の 要 旨

シリコンウェーハは半導体デバイス作成における出発材料であり、基板として使用される。今後も継続した発展が予想される半導体業界において、半導体デバイスの需要の増大に対応するためには、高品質なシリコンウェーハを安定供給することが必要である。現在の主流である結晶直径 300mm ウェーハ用のシリコン単結晶は横磁場印加チョクラスキー法で製造される。シリコンウェーハに求められる品質は、欠陥密度、不純物密度などがあるが、これらは結晶成長中の結晶の熱履歴や、不純物の輸送過程で決定され、特にシリコン融液の対流挙動が大きな影響を与える。

チョクラスキープロセス中のシリコン融液の挙動は、炉内環境の実測と、熱・物質輸送シミュレーションにより研究されてきた。しかしながら、従来の研究は主に結晶直径 100mm 以下の小規模炉を対象としたものであり、現在の主流である直径 300mm に対しては知られていない。また、静磁場下にて石英ルツボに保持されたシリコン融液において、ルツボとの境界にはハルトマン層と呼ばれる非常に薄い電磁境界層が存在する。従来のシミュレーションを用いた研究ではこの効果が無視されており、ハルトマン層がシリコン融液の流動に与える影響は知られていない。

本研究では、現在の主流である結晶直径 300mm 横磁場印加チョクラスキー法によるシリコン単結晶育成プロセスを対象とし、炉内の 3 次元的な熱・物質輸送を考慮し、かつハルトマン層の影響を考慮できるシミュレーションモデルを構築、それを用いた計算を行うことで、シリコン融液の流動挙動の解明することを目的に検討を行った。以下に、本稿の各章毎にその概要をまとめる。

1. 序論

第 1 章では、半導体産業の現状を概観し、半導体デバイスの出発材料であるシリコンウェーハの安定供給が重要であることを示した。シリコンウェーハに求められる結晶品質について述べ、チョクラスキー法を用いた結晶成長におけるシリコン融液の流動挙動が品質に大きな影響を与えることを示した。シリコン融液の流動に対する先駆的研究を紹介し、それらを現在の製造現場と照らし合わせ、未解決の課題を示した。それら課題の解決を本研究の目的とし、解決へのアプローチを示すとともに、本論文の構成を提示した。

2. 炉内 3 次元モデルによる 300 mm 横磁場 MCZ プロセスの解析

第 2 章では、横磁場印加チョクラスキー法による直径 300 mm シリコン単結晶育成プロセスを対象とした熱・物質輸送シミュレーションモデルを構築し、それを用いた計算結果と、実炉でのシリコン融液温度の直接測定の結果から、シリコン融液の温度、流動分布の挙動を調査した。本モデ

ルの特徴は 2 点で、炉内全域の 3 次元の熱・物質輸送を考慮したことと、シリコン結晶を流れる電流の効果を考慮したことである。計算は実測を時間平均、時間変動挙動の両者ともよく再現した。シリコン融液の流動・温度分布は、従来考えられてきたような引き上げ軸を中心とした 2 回対称な分布ではなく、完全に 3 次元的な分布を示した。流動分布は、磁場に垂直な面に大きな 1 つ渦となり、それが複数渦への分離と統合を周期的に繰り返す挙動であった。シミュレーションの結果から、このような 3 次元性を示す要因は結晶内を通る電流に起因して固液界面下のシリコン融液に発生するローレンツ力であると考察した。また、周期性の要因はレイリー・ベナル不安定性によるコールドプリュームの形成と消滅と推定した。しかしながら、本章の計算で用いたメッシュサイズではルツボ壁に存在する極薄いハルトマン層の影響反映には不十分であり、次章以降で確認を行った。

3. 部分モデルを用いた横磁場 MCZ プロセスにおけるハルトマン層の基礎的性質解明

第 3 章では、シリコン融液のみを抜き出し、かつ理想的な系を仮定した部分モデルを用いてハルトマン層を解像した計算を行い、ハルトマン層の基礎的な性質を調べた。ルツボ側壁のハルトマン層内では熱対流による上昇流に対するローレンツ力による制動力が発生しないため、ルツボ側壁近傍では強い上昇流が形成される。一方、気液界面ではハルトマン層は形成されない。よって、ルツボ壁の上昇流は気液界面を伝って固液界面下へ流れ込む挙動が確認され、これは印加した磁場強度が大きいほど強くなることを示した。

4. ハルトマン層を考慮した 300mmMCZ プロセスの解析

第 4 章では、結晶径 300 mm 横磁場 MCZ プロセスを対象とし、シリコン融液部のみを抜き出した部分モデルを用いることで、ルツボ壁近傍のハルトマン層の効果を確認した。ハルトマン層により磁場と垂直な面での伝熱および不純物導入が抑制され、磁場と平行な境界およびシリコン融液内部に関しては変化しないことを確認した。ルツボ壁以外のシリコン融液内部の全体の流動は 2 章で示した挙動と同一であり、大きな違いは生じないことを示した。

5. 側壁層を考慮した 300mm MCZ プロセスにおける固液界面下現象の解明

第 5 章では、固液界面下のメッシュサイズを十分に細かく設定した部分モデルを用いることで、偏析を伴うドーパント不純物輸送を含めた固液界面下の輸送現象の解明を行った。固液界面下の流動は、シリコン結晶の回転による粘性力と、固液界面下に発生するローレンツ力の大小関係で決まり、後者は気液界面からシリコン融液を引きこみ、この力が前者より相対的に強い場合、ドーパント濃度の薄いシリコン融液が結晶外周部に入り込み、結晶のドーパント濃度面内分布を不均一にさせる可能性があることを指摘した。

6. 総括

本章では、本研究の結論を述べた。