

京都大学	博士（工学）	氏名	徳田 雄一郎
論文題目	低抵抗 n 型 SiC 結晶中に発生するダブルショックレー型積層欠陥に関する研究		
<p>（論文内容の要旨）</p> <p>本論文は、広禁制帯幅半導体であるSiC（炭化珪素）単結晶の低抵抗化と高品質化を目指して、独自手法によるSiCインゴット結晶成長と、低抵抗n型SiCで特異的に発生する積層欠陥に関する研究をまとめたもので、6章からなる。</p> <p>第1章では、電力変換機器で用いられる半導体パワーデバイスの重要性とパワーデバイスに要求される性能を紹介した後、SiC半導体の性質とSiCパワーデバイスの有用性を述べている。特に、最も重要な性能であるSiCパワーデバイスのオン抵抗低減に向けた課題や各種の結晶欠陥がSiCデバイスに与える影響について概説し、低抵抗かつ高品質SiCウェハの重要性と現在の課題を整理して、当該分野における本研究の位置付けと目的を明らかにしている。</p> <p>第2章では、SiCウェハ作製に必要な大口径・長尺のインゴット結晶成長に取り組んだ実験結果と考察について述べている。特に、従来の昇華成長法に代わる新しい結晶成長法であるガス成長法に取り組み、成長炉内の温度分布や成長初期過程の最適化を通じて、従来の手法に比べて5倍以上の成長速度で同等の品質を有するSiCの長尺結晶を成長することに成功している。また、高純度原料ガスの活用によるSiC結晶の高純度化、窒素ドーピングによるSiC結晶の低抵抗化を達成した結果を述べている。得られたSiC結晶の転位密度は約1000 cm⁻²と高品質であるものの、この低抵抗n型SiC結晶を約1000℃の高温で熱処理すると、ダブルショックレー型積層欠陥が発生することを見出している。すなわち、ダブルショックレー型積層欠陥の発生は低抵抗n型SiC結晶固有の問題であり、結晶成長方法や残留不純物、転位密度とはほとんど関係がないことを明らかにしている。</p> <p>第3章では、低抵抗n型SiC結晶を高温熱処理することで発生するダブルショックレー型積層欠陥をフォトルミネセンス(PL)イメージング法によって非破壊かつ高速に検出する手法を確立している。SiC結晶中でダブルショックレー型積層欠陥が擬似量子井戸を形成し、禁制帯幅より低い特定のエネルギーで強い発光を示すことを活用し、この発光波長に合わせたバンドパスフィルタを用いたPLイメージング装置を構築することで、ウェハ内のダブルショックレー型積層欠陥の位置や形状を非破壊かつ極めて短時間に同定することに成功している。次に、この方法を活用してダブルショックレー型積層欠陥の発生条件（熱処理温度や結晶の窒素密度）を初めて体系的に明らかにした結果を述べている。また、この積層欠陥の発生初期を丹念に分析することにより、ダブルショックレー型積層欠陥の発生には高い窒素密度だけでなく積層欠陥の発生核となる基底面欠陥が必要であること、および少なくとも数種類の異なる形状を有するダブルショックレー型積層欠陥が存在することを見出している。</p>			

京都大学	博士（工学）	氏名	徳田 雄一郎
<p>第4章では、第3章で見出した様々な形状に拡大するダブルショックレー型積層欠陥について、放射光トポグラフィや透過電子顕微鏡観察を行うことにより、Si-C層の積層構造、積層欠陥端部に存在する部分転位の構造やバーガースベクトルを決定した結果について述べている。まず、結晶学的考察から、SiC特有の積層構造を反映する4種類のすべり面が存在し、各々に3種類のすべり方向が存在すること、およびこれらの組み合わせを整理すると、結晶学的に等価な欠陥を考慮すれば全てのダブルショックレー型積層欠陥は6種類に分類できることを明らかにしている。次に、実験的にこの全ての種類の積層欠陥が観察されていることを述べ、その積層欠陥端部に存在する部分転位のバーガースベクトルの違いによって、拡大形状の違いが現れることを説明している。また、低抵抗n型SiC結晶において、ダブルショックレー型積層欠陥のみが特異的に発生する原因について議論している。さらに、放射光トポグラフィ像を丹念に観察することにより、部分転位の明暗コントラストが転位構造を忠実に反映しており、これを利用することによってトポグラフィ像から部分転位の構造を一意に決定できることを見出している。</p> <p>第5章では、低抵抗n型SiC結晶におけるダブルショックレー型積層欠陥の動的挙動に着目し、熱処理時の拡大速度を精密に評価した結果を述べている。まず、積層欠陥の拡大速度は、端部に存在するSiコア部分転位の移動速度でほぼ決まるが、窒素密度が非常に高いSiC結晶ではCコア部分転位もすべり運動をすることを見出している。次に、この拡大速度は温度活性型の依存性を示すこと、窒素密度と共に拡大速度が増大することを見出している。特に、拡大速度の温度依存性および窒素密度依存性について、古典的なアレニウス型の式で解釈する問題点を指摘し、逆過程（積層欠陥の縮小）を考慮した拡大速度の解析式を導出して、この式を用いれば観測された現象を統一的に説明できることを述べている。さらに、この積層欠陥の拡大速度の解析式を実験データに適用することにより、ダブルショックレー型積層欠陥の形成エネルギーを初めて実験的に決定することに成功している。高密度窒素ドーパシCでは積層欠陥の形成エネルギーが負になること、および窒素密度の増大と共に積層欠陥の形成エネルギーが小さくなることを見出し、その物理的解釈を議論している。本研究成果は、欠陥物理、デバイス応用の両面で、今後のSiC結晶成長および欠陥制御の研究指針を与えるものである。</p> <p>第6章は結論であり、ガス成長法による大口径SiC結晶の高速成長と低抵抗化、低抵抗SiC結晶で特異的に発生するダブルショックレー型積層欠陥の非破壊検出法の確立、ダブルショックレー型積層欠陥の微細構造の体系化、および当該積層欠陥の拡大挙動の解析とその物理的解釈など、本研究を通じて得られた新しい知見を整理して述べている。また、当該分野における今後の研究課題を提示し、これらの課題解決に向けた研究指針を提案している。</p>			

(論文審査の結果の要旨)

本論文は、広禁制帯幅半導体であるSiC（炭化珪素）単結晶の低抵抗化と高品質化を目指して、独自手法によるSiCインゴット結晶成長と、低抵抗n型SiCで特異的に発生する積層欠陥に関する研究をまとめたものであり、得られた主な成果は以下の通りである。

1. SiCウェハ作製に必要な大口径・長尺のインゴット結晶成長、特に、従来の昇華成長法に代わる新しい結晶成長法であるガス成長法に取り組み、高い結晶品質を維持しながら従来の5倍以上となるSiC結晶成長の高速化を達成した。また、従来の手法を上回る結晶の高純度化および高密度窒素ドーピングによる低抵抗化が可能であることを明らかにした。
2. 低抵抗n型SiC結晶を高温熱処理することで発生するダブルショックレー型積層欠陥をフォトルミネセンスイメージング法によって非破壊かつ高速に検出できることを示し、この方法を活用してダブルショックレー型積層欠陥の発生条件（熱処理温度や結晶中の窒素密度）を実験的に明らかにした。また、この欠陥の発生初期を丹念に分析することにより、少なくとも数種類の異なる形状を有するダブルショックレー型積層欠陥が存在することを見出した。
3. SiC結晶中で様々な形状に拡大するダブルショックレー型積層欠陥について、放射光トポグラフィや透過電子顕微鏡観察を駆使することにより、Si-C層の積層構造、積層欠陥端部に存在する部分転位の構造とバーガスベクトルを初めて体系化することに成功した。結晶学的考察から、全てのダブルショックレー型積層欠陥は6種類に分類できることを説明し、実験的にこの全ての種類の積層欠陥が観察されていることを明らかにした。
4. 低抵抗n型SiC結晶におけるダブルショックレー型積層欠陥の拡大速度を精密に評価し、積層欠陥の拡大速度は、端部に存在するSiコア部分転位の移動速度でほぼ決まること、温度活性型の依存性を示すこと、窒素密度と共に拡大速度が増大することを見出した。特に、拡大速度の温度依存性および窒素密度依存性について、古典的なアレニウス型の式ではなく、逆過程（積層欠陥の縮小）を考慮した拡大速度の解析式を導出し、この式で現象を統一的に説明した。また、ダブルショックレー型積層欠陥の形成エネルギーを初めて実験的に求めた。

以上、要するに、本論文は低抵抗n型SiC結晶において発生するダブルショックレー型積層欠陥の非破壊検出法を確立すると共に、その欠陥構造、発生要因、および動的挙動を学術的に明らかにしたもので、学術上、實際上寄与するところが少なくない。よって、本論文は博士（工学）の学位論文として価値あるものと認める。また、平成30年8月29日、論文内容とそれに関連した事項について試問を行って、申請者が博士後期課程学位取得基準を満たしていることを確認し、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。