

## 論文審査の結果の要旨および担当者

報告番号	※ 甲 第 13314 号
------	---------------

氏 名 小久保 信彦

### 論文題目

顕微ラマンマッピングによるGaN基板中の貫通転位のひずみ場解析  
(Strain Field Analysis of Threading Dislocations in GaN Substrate  
by Micro Raman Mapping)

### 論文審査担当者

主査	名古屋大学	教授	宇治原 徹
委員	名古屋大学	教授	宇佐美 徳隆
委員	名古屋大学	准教授	原田 俊太
委員	名古屋大学	教授	天野 浩
委員	産業技術総合研究所	主任研究員	山田 永

## 論文審査の結果の要旨

小久保信彦君提出の論文「顕微ラマンマッピングによるGaN基板中の貫通転位のひずみ場解析」は、ラマン分光法を用いて窒化ガリウム (GaN) 単結晶基板における貫通転位のひずみ場を解析のための手法の確立を行っている。各章の概要は以下の通りである。

第1章では、GaN単結晶における転位の解析手法やデバイスへの影響に関する研究背景、ならびに本研究の目的を述べている。GaNバルク単結晶は、その優れた物性値から次世代パワーデバイス用基板として期待されている。しかし、基板に含まれる貫通転位がデバイス特性に影響を与えることが知られている。そこで本研究では、ラマン分光法を用いてGaN単結晶中の貫通転位のひずみ場を解析することを目的とし、既存の手法による転位の解析結果との比較や、ラマン分光法における測定および解析時の工夫、さらにはシミュレーションを行うことで、転位のバーガスベクトルの解析を行ったことを述べている。

第2章では、本研究に用いる様々な手法の詳細に関して述べている。はじめにラマン散乱光におけるピークシフトの要因について記述し、次に六方晶における連続弾性体近似による転位のひずみ場のシミュレーションについて述べている。また解析に用いた機械学習技術の一つである畳み込みニューラルネットワークの計算やネットワークモデルの最適化の方法について記述している。

第3章では、転位の解析に使用した結晶および測定装置、さらにはシミュレーションの手法を説明した。転位の局所的かつ小さなひずみを測定するために、測定時の分解能を向上させる工夫について記述した。

第4章では、ラマンピークシフトのマッピング測定の結果を、エッチングやX線トポグラフィ、さらにはTEM観察と比較することにより、ラマン分光法を用いることで貫通転位のひずみ場を測定でき、バーガスベクトルの刃状成分を解析できることを示した。この結果を、同一箇所におけるエッチピットの光学顕微鏡像と比較すると、コントラストとエッチピットの位置が一致したため、マッピング像において観察された局所ひずみは貫通転位に起因するものであることを明らかにした。さらに、シミュレーションケッカX線トポグラフィや電子顕微鏡の結果との比較から、ラマンピークマッピングにより貫通転位のバーガスベクトルを推定できることが示した。

第5章では、ピークシフトのマッピングシミュレーションをおこない、マッピング測定の結果と比較することで、バーガスベクトルの大きさや方向、転位線の傾きを解析した。その結果、TEDとTMDをモデルとした場合、バーガスベクトルの刃状成分の方向に応じて、高波数領域と低波数領域が対となったコントラストが再現され、実験とシミュレーション結果におけるピークシフトのプロファイルの形状が一致したことから、ピークシフトの大きさからバーガスベクトルの大きさを推定できることを示した。さらに、マッピング像におけるコントラストの伸長およびピークシフトの大きさから、転位の傾きも推定できることを示した。

第6章では、機械学習を用いてラマン分光法から得られたデータを解析した結果について述べた。畳み込みニューラルネットワークを用いて転位のTEDとTMDを分類し、同時に、貫通転位の刃状成分の自動分類を試みた。その結果、ピークシフトのマッピング像における転位のコントラストを、80%の確率でTEDとTMDに分類し、100%の確率で6方向のバーガスベクトルに分類した。以上より、ラマン分光法と機械学習を組み合わせることにより、転位のらせん成分の有無ならびに刃状成分の6方向である、計12種類の転位を自動的に判定できることを示した。

第7章では、本研究の結論を与えている。

以上のように本論文では顕微ラマン分光法によるピークシフトマッピングにより、非破壊で半導体基板中の貫通転位を観察し、さらにその特徴まで明らかにできることを示している。さらに機械学習技術を組み合わせることで貫通転位の自動分類の可能性まで示している。ここで開発された手法は、GaN基板中の貫通転位がデバイスへ与える影響をより明確にするだけでなく、今後、基板結晶の品質管理などにおいても大きな意味を持つ。また、次世代の様々な機能性結晶の評価としても応用されるものである。これらの観点から、本研究は工学の発展に寄与するところが大きいと判断できる。よって、本論文の提出者である小久保信彦君は博士(工学)の学位を受けるに十分な資格があると判断した。