The University of Osaka
Institutional Knowledge Archive

Title	超音波共鳴法を用いたGaN結晶と誘電体ナノ薄膜の弾性特性の研究および深層学習を用いた弾性定数決定法の開発
Author(s)	福田, 大樹
Citation	大阪大学, 2024, 博士論文
Version Type	VoR
URL	https://doi.org/10.18910/96044
rights	
Note	

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

https://ir.library.osaka-u.ac.jp/

The University of Osaka

様式３

論　文　内　容　の　要　旨

氏　名　（　　福田 大樹　　）	
論文題名	超音波共鳴法を用いたGaN結晶と誘電体ナノ薄膜の弾性特性の研究および深層学習を用いた弾性定数決定法の開発

論文内容の要旨

弾性定数を解明することは，工学的にも学術的にも極めて重要である．本研究は，従来弾性定数の計測が困難であった材料に対し，その弾性定数を決定することを目的とした．具体的にGaN結晶と誘電体ナノ薄膜を対象とし，それらの弾性定数を超音波共鳴法を用いて明らかにした．また，深層学習を応用することで材料の共鳴周波数から弾性定数を推定する手法を確立することにも成功した．以下に本論文の構成と要点を示す．

(第1章)本研究の背景を述べ，本論文の研究目的と構成を示した．

(第2章)共鳴超音波スペクトロスコピー法の概要と，共鳴周波数の計算方法の基礎理論について解説した．相似形試料同士で成り立つ固有値方程式を証明し，第5章で述べる深層学習を用いた独自解析法で重要な役割を果たす弾性パラメータを導入した．

(第3章)Feをドープして高抵抗化したGaNの弾性特性を研究した．非接触計測法であるアンテナ発信超音波共鳴法を用いて，高温での準横波共鳴モードの内部摩擦を計測し，Debye型緩和モデル式を適用することで各温度での緩和時間を決定した．Arrheniusプロットから熱活性伝導の活性化エネルギ計算すると，0.54 eVと求まった．先行研究をもとに決定した活性化エネルギを考察した．アンテナ発信超音波共鳴法と，共鳴超音波スペクトロスコピー法を組み合わせることで，GaNの高温でのすべての独立な弾性定数を計測することに成功した．

(第4章)酸素不純物がGaNの弾性定数に及ぼす影響を研究した．高い酸素不純物濃度を有する，OVPE法により作製されたGaNの弾性定数を共鳴超音波スペクトロスコピー法を用いて計測した．酸素不純物による弾性定数の変化を，弾性定数の決定精度が高い面内弾性定数(E_1，C_{66}，C_{11})に着目して調べた．第一原理計算によって，酸素不純物を導入した場合の弾性定数を計算したところ，酸素不純物に対する感度の低いC_{11}を除き，E_1とC_{66}の変化量が実験と整合した．得られた弾性定数からDebye温度を計算し，酸素不純物がDebye温度を低下させることを示した．

(第5章)深層学習による画像認識を応用し，共鳴周波数から弾性定数決定を予測する独自の解析法を提案した．試料は立方晶系の直方体形状であることを仮定した．共鳴周波数のスペクトルを弾性パラメータのスペクトルに変換し，それを用いて3層のRGB画像(弾性画像)を作成した．Blackman diagramを用いてデータセットで考慮する弾性定数の範囲を制限し，その範囲を204クラスに分割した．学習済みネットワークによるクラスの分類を実行した後に，分類されたクラスの中でさらに回帰学習を実行することで弾性定数を予測した．111個の実材料に対して本手法を適用し，有効性を確かめた．さらには，作成した立方晶系のデータセットで，六方晶系の平均Young率を予測できることも示した．

(第6章)ピコ秒超音波法を用いた誘電体ナノ薄膜の弾性定数計測法を開発した．金属/誘電体/金属の3層膜構造にすることで，共鳴の励起とその検出を可能にした．共鳴の検出に適した金属層の膜厚を決定するための計算式を提案し，その有効性を実験により確かめた．スパッタリング法により様々な成膜条件でPt/NiO/Ptの3層膜を作製し，NiOナノ薄膜層の弾性定数を計測することに成功した．

様式 7

論文審査の結果の要旨及び担当者

氏　名　（　福田　大樹　）			
論文審査担当者		（職）	氏　名
	主 査	教授	荻　博次
	副 査	教授	山内　和人
	副 査	教授	森川　良忠
	副 査	教授	桑原　裕司
	副 査	教授	渡部　平司
	副 査	教授	有馬　健太
	副 査	教授	山村　和也

論文審査の結果の要旨

弾性定数は、外力に対する材料の変形応答を示す基本的な物性値であり、機械的信頼性を満たすための構造物やデバイスの設計に不可欠な量である。また、弾性定数は、フォノン物性に深く関わるため、固体物理学においても極めて重要な役割を担っている。本研究では、共鳴超音波スペクトロスコピー法（RUS 法）を用いて、窒化ガリウム単結晶の弾性定数を調べ、また、ピコ秒超音波法を用いて、誘電体ナノ薄膜の弾性定数の新しい計測法を開発している。さらに、深層学習を用いて、固体の自由振動の共鳴周波数から弾性定数を予測する手法を独自に開発し、RUS 法における長年の問題点を克服した。

本論文においては、まず、Fe をドープした高抵抗の窒化ガリウム単結晶の高温における超音波特性を詳細に調べ、新たな音響的手法を開発し、それにより、Fe にトラップされたキャリアの熱活性に起因するホッピング伝導のエネルギ準位を決定することに成功した。また、窒化ガリウムの高温での弾性定数を初めて計測することに成功した。さらに、窒化ガリウムの弾性定数に及ぼす酸素不純物の影響を正確に計測し、新たな知見を得ている。例えば、酸素不純物が面内弾性定数を著しく減少させることを実験的に見出した。また、この弾性定数の減少がデバイ温度の大きさを減少させることも判明した。

続いて、独自のニューラルネットワークを構築し、深層学習によって、自由振動の共鳴周波数から立方晶系固体材料の弾性定数を全て決定する手法を開発した。これにより、これまで問題となっていた RUS 法におけるモード特定の困難さを完全に克服することに成功した。さらに、この方法を六方晶系材料にも拡張し、等方体近似したヤング率を正確に求めることができることを見出した。

最後に、ピコ秒超音波法を用いて、3 層薄膜の共鳴周波数を計測し、中間層の誘電体ナノ薄膜の弾性定数を計測する手法を提案している。

以上の成果は、窒化ガリウムを用いたパワーデバイスの機械的、電気的、熱的特性の評価を通じてデバイスの性能向上に貢献し、また、次世代通信用の音響フィルターの設計にも応用され得る。さらに、固体のフォノン物性の理解の深化にも貢献する。よって、本論文は博士論文として価値あるものと認める。