

氏名・（本籍）	田 中 三 郎（ 福 岡 県 ）		
学位の種類	博 士（ 工 学 ）		
学位記番号	生工博甲第151号		
学位授与の日付	平成23年 3月25日		
学位授与の条件	学位規則第4条第1項該当		
学位論文題目	フォノンのスペクトル解析による低熱伝導率ナノ構造材料設計		
論文審査委員会	委員長	教授	石 黒 博
		〃	尾 川 博 昭
		〃	山 田 宏
		〃	花 本 剛 士
		〃	鳥 井 正 史

学 位 論 文 内 容 の 要 旨

本論文は「フォノンのスペクトル解析による低熱伝導率ナノ構造材料設計」と題し、序論、本論3章、および結論により構成されている。

第1章「序論」では、熱から直接発電する熱電半導体にナノテクノロジーが利用され、その高効率化が熱伝導率を抑えることで達成されている現状を述べ、具体的な対象であるビスマステルライドについて結晶構造や熱電特性について説明している。他解析手法によって得られている結果を踏まえた上で、本研究で導入したフォノンのスペクトル解析の重要性やそれによるナノ構造設計の意義と独創性、新規性について主張し、研究の位置づけを行っている。

第2章では、薄膜の熱伝導率測定で利用した3オメガ法の詳細について説明している。具体的には非定常熱伝導方程式の解を利用した熱伝導率測定、3倍高調波の発生メカニズムとそれを利用した温度測定原理、測定に必要な電子回路、ビスマステルライドを測定対象としたために必要となった独自のサンプル作製手法について、3オメガ法を行うための詳細な情報を提供している。3オメガ法の測定精度を示すために測定データが豊富な酸化シリコンや窒化シリコン薄膜の膜厚を変えた熱伝導率測定を行い、他研究グループの測定した結果と比較し、測定の妥当性を示している。さらに薄膜の厚さ方向だけでなく、面方向の熱伝導率をZメータ（ハーマン法）により測定し、その測定結果を評価している。

第3章では、熱伝導率を低減する構造としてナノ多孔体とナノ結晶薄膜を挙げ、ナノ多孔体の作製手法としてナノ粒子を利用した印刷技術で薄膜を生成する方法とフラッシュ蒸着法で化合物半導体薄膜を生成する方法を選択している。作製した試料の電気伝導度と熱伝導率を測定し、ローレンツ数を用いて電子によって運ばれる熱エネルギーを差し引くことで、格子振動（フォノン）に起因する熱伝導率を得ている。さらに試料をSEM観察、AFM

観察することで、ナノ構造の代表長さを得て、低減した熱伝導率を構造の代表長さで整理している。

第4章では、フォノンの自由行程をフォノンの周波数依存まで考慮して得る手法について述べている。提案するモデルには緩和時間に不純物散乱、ウムクラップ散乱を組み込んでおり、特にウムクラップ散乱で必要な係数について、熱伝導率の文献値と比較しながらその詳細を検討している。上記、散乱モデルの妥当性を示した後、この手法から得られる累積格子熱伝導率を計算し、100nm オーダの非常に長い自由行程を持つフォノンの存在について主張している。このような長いフォノンの自由行程はこれまでの簡易的なフォノン気体モデルでは得られず、分布のピークのみが簡易モデルからは計算されることも強調している。さらに計算された累積格子熱伝導率を用いると前章で測定された極めて低い熱伝導率を説明できることを示している。累積格子熱伝導率は対象とする材料の単結晶の熱伝導率から計算できるため、ナノ構造生成にさきがけて、熱伝導率を低減できる微細構造サイズを提案できることを結論として得ている。

第5章「結論」では、ナノ多孔構造ビスマステルライドがもつ極めて低い熱伝導率がフォノンのスペクトル解析で得られる累積格子熱伝導率で説明されることをまとめ、ナノ構造設計の熱電半導体への応用について述べ、本論文を総括している。

このようにナノ構造を用いた熱伝導率低減について必要な構造サイズまで明確にすることは、熱電半導体の効率改善に必須であり、熱電変換技術および熱物性制御技術の発展に寄与するところが大きい。

学位論文審査の結果の要旨

本論文に関し、調査委員から生成したナノ微細構造の異方性と代表サイズの整合性、X線回折結果の理解、ナノ多孔薄膜の生成手法、3オメガ法の詳細とその測定精度、フォノン散乱モデルの各係数の意味、解析モデルの適用限界、熱電半導体への具体的な適用などについて質問がなされたが、いずれも著者から満足（明確）な回答が得られた。

また、公聴会においても、多数の出席者があり、種々の質問がなされたが、いずれも著者の説明によって質問者の理解が得られた。

以上により、論文調査及び最終試験の結果に基づき、審査委員会において慎重に審査した結果、本論文が博士（工学）の学位に十分値するものであると判断した。