

氏名	萩野 春俊
学位の種類	博士(工学)
学位記番号	工博甲第376号
学位授与の日付	平成27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	微細構造を有する薄膜の熱伝導特性とその制御
論文審査委員	主査 教授 宮崎 康次 " 鶴田 隆治 " 中尾 基 " 松本 要 准教授 長山 暁子

## 学位論文内容の要旨

電子機器冷却やエネルギー変換技術において、熱マネジメントの重要性が高まっている一方で従来不変とされてきた熱伝導率では説明できない熱輸送現象が多数報告されている。特に電子機器などで多用される薄膜において、薄膜自身の持つ微細構造の熱伝導率に与える影響は顕著であり、薄膜表面、薄膜-基板界面、結晶粒界面での格子振動の散乱による熱伝導率の低下は無視できなくなっている。同一薄膜でも微細構造によって見かけの熱伝導率も大きく異なることが多数報告されており、本論文では、格子振動（フォノン）輸送の観点から微細構造と熱伝導率の関係について考察した。

第1章ではフォノン輸送の観点から薄膜中の熱輸送についてまとめ、微細構造と熱伝導率の関係を測定を通して考察する本研究の方向性を述べた。

第2章では微細構造による熱制御技術が進んでいる熱電半導体薄膜を扱い、薄膜の面方向熱伝導率測定手法の確立に取り組んだ。測定対象としてビスマステルライド系薄膜をアークプラズマ蒸着法により作製し、膜面方向の熱伝導率を赤外線レーザーによる周期加熱法で測定、膜厚方向の熱伝導率を3 $\omega$ 法で測定した。薄膜化することで熱伝導率はバルク状ビスマステルライドの熱伝導率より減少し薄くなるほど大幅に減少していることを改めて確認した。有機系熱電材料として注目を集めているPEDOT-PSS薄膜の熱伝導率についても取り組み、加熱周波数を変えることで膜面方向と膜厚方向の熱伝導率を測定した。膜面方向の熱伝導率が膜厚方向に比べて最も高いもので2.5倍となっていることを測定し、XRDとSEM観察で薄膜を評価したところ、分子鎖が膜面方向に配向しておりたとえ同一材料でも熱伝導率を考える際には、微細構造を知ることが重要であることを示した。

第3章では、微細構造による熱・電子輸送特性へ与える影響をさらに考察するため、MEMS技術を用いて微細孔構造を有するSi自立薄膜を作製した。面方向熱伝導率を自己発熱させて測定し、微細構造が熱・電気輸送に与える影響を考察した。膜厚が2 $\mu\text{m}$ の薄膜の熱伝導率はバルクSiの62%に減少しており、古典的フォノン輸送計算によれば、フォノンの平均自由行程が3 $\mu\text{m}$ にまで及ぶことが示された。この薄膜に一辺10 $\mu\text{m}$ の孔を格子状、千鳥状に配列した際の熱伝導率と導電率を測定したところ、導電率は空隙率のみに依存する拡散輸送で説明できる一方、熱伝導率は千鳥状に穴を配置したサンプルで最も低くなり、低温で測定するほど大きな低下となっていることを示した。フォノンの平均自由行程が電子のものより長いと仮定すると構造中でフォノンは準弾道輸送、電子は拡散輸送となるため現象を説明でき、構造を用いた熱物性制御には、キャリアの平均自由行程と構

造寸法、形状の関係が重要であることを述べた。

第4章では多孔構造中のフォノン輸送をボルツマン輸送方程式で求め、実験で測定された孔構造の配置や形状に従って変化する薄膜の見かけの熱伝導率を概算できることを確認するとともに、仮定したフォノンの長い平均自由行程についても妥当であることを示した。フォノンの長い平均自由行程を持つ材料が微細構造を有する際の見かけの低い熱伝導率を簡便な手法で予測できるノウハウを確立した。

第5章では構造を用いた熱物性制御技術の積極利用として、熱整流効果を検討した。非対称構造を有するSiマイクロブリッジを作製し、熱伝導率測定と赤外線カメラを用いた薄膜の温度分布観察を通して、効果は小さいながらも三角形の孔を薄膜中に設けると、孔の向きに従って熱流量が異なる結果を得た。

第6章では、各章を総括し、得られた成果による熱伝導率制御の可能性についてまとめた。

## 学位論文審査の結果の要旨

本論文は微細構造によって見かけの熱伝導率が低減できることを実験で示し、それらを簡便な数値計算で予測できることも示しており、工学および工業上貢献するところが大きい。本論文に関して審査委員及び公聴会出席者から、研究の位置付け、測定結果の妥当性、解析モデルと実験結果の差異、現象の工学への応用について質問があったが、著者によって適切な回答がなされた。公聴会では、多数の出席者があり、測定法のノウハウなど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。