

審 査 の 結 果 の 要 旨

氏 名 冯 雅

本論文は「Structure dependent thermal transport properties of single walled carbon nanotubes (単層カーボンナノチューブの構造依存熱輸送特性)」と題し、ナノテクノロジーを代表する一次元材料である単層カーボンナノチューブ (Single-Walled Carbon Nanotube, SWNT) のデバイス応用に向けて、SWNT 薄膜やバンドル構造などに依存した熱伝導特性について実験的に検討したものである。電界効果トランジスター、透明導電膜、太陽電池電極などの実用的なデバイス設計のためには SWNT の熱輸送特性の正確な把握は必要不可欠であるが、電子物性や光学物性の研究と比較して熱輸送の研究は立ち遅れている。SWNT の熱伝導率は他の材料を凌駕すると初期の理論予測がなされ、実験的にも高い熱伝導率が報告されたが、その後の実験では 2 桁の範囲で大きなばらつきが報告されている。さらに、SWNT の集合体による薄膜や複合材料の熱輸送特性についても大きくばらつくとともに単一の SWNT からの予想よりも大幅に低い熱伝導率が報告されている。本研究においては、実用的な透明導電膜および太陽電池電極としての応用が進んでいる SWNT 薄膜の定常法による熱伝導率測定技術を確立するとともに、MEMS 型計測法によって単一および SWNT バンドルの熱伝導率測定を実現し、SWNT の熱伝導率がバンドル形成によって大幅に低減することを明らかにしている。

第 1 章は「Introduction (序論)」であり、研究背景として、SWNT の構造に由来する電子構造とフォノンモードについて議論するとともに、熱輸送に関する理論及び実験的な研究動向について議論している。

第 2 章は「Motivation, challenges and organization of the thesis (研究背景, 問題提起, 論文の概要)」であり、本研究が SWNT に関する科学と技術の分野において占める位置づけを明らかにし、研究目的と論文の構成について述べている。

第 3 章は「Measurement of sheet thermal conductance of single-walled carbon nanotube thin films by steady-state infrared thermography (放射温度計を用いた定常

法による SWNT 薄膜シート熱コンダクタンス計測)」である。SWNT 薄膜の定常法による熱伝導率測定は、真空チャンバー内に設置した小型のヒータと定温度部からそれぞれシリコン薄膜ビームを張り出し、それらのビーム間に SWNT 薄膜をサスペンドした構造の実験装置を作成して実現している。シリコンビーム及び SWNT 薄膜の温度分布を放射温度計で測定し、熱伝導率が既知のシリコンビームをレファレンスとして SWNT 薄膜の熱伝導率を高精度に計測している。透明導電膜として用いられる 4 種類の透明度の SWNT 薄膜についての熱伝導率を実測するとともに、別途ラマン分光法を用いた測定と比較するために、薄膜材料の導電特性に用いられるシート抵抗と類似の概念でシート熱抵抗（シート熱コンダクタンス）を定義している。

第 4 章は”Investigation of thermal transport properties of individual single-walled carbon nanotubes by micro-thermometer compatible with TEM (TEM 観察対応 MEMS 法による単一 SWNT の熱伝導特性の解明)」である。単一 SWNT の熱伝導率測定については、MEMS 技術を用いたサスペンド型の SiN のビーム構造上に Pt ヒータと Pt 測温体を設計し、配向した SWNT のアレーを転写することで、1 本から数本の SWNT の熱伝導率特性の計測を実現している。ここで、SWNT のアレーは、水晶基板の r カット面を用いることで水平に配向するように CVD 合成したものであり、SWNT の直径分布がおよそ 1.5 nm を中心にして揃っていることが特徴である。MEMS 技術によって作成した測定部は直径 3 mm のディスク状に設計されており、熱伝導特性の計測後に TEM 観察が可能である。単一 SWNT および数の規定された SWNT バンドルについての 80K~450K での熱伝導率の計測結果より、SWNT のバンドル形成によって熱伝導率が大幅に低減することを明らかにしている。また、熱伝導率の低減について、バンドルを形成するナノチューブ数の関数として整理している。さらに、この関係を SWNT のバンドル形成による音響フォノンの散乱効果から説明している。

第 5 章は結論であり、上記の研究結果をまとめたものである。

以上要するに本論文は、単層カーボンナノチューブの集合体の熱伝導特性について実験的に明らかとし、バンドル形成による熱伝導率低減のメカニズムを検討したものであり、ナノ材料工学及び分子熱工学の発展に寄与するものだと考えられる。

よって本論文は博士（工学）の学位請求論文として合格と認められる。