

フォノニック結晶ナノ構造による熱伝導制御 Thermal Conduction Control by Phononic Crystal Nanostructures

H24助自52

代表研究者 野村 政宏 東京大学 生産技術研究所 准教授
Masahiro Nomura Associate Professor, Institute of Industrial Science, the University of Tokyo

Artificial control of phonon transport, that is heat transport, by phononic crystal nanostructures attract much attention due to its high academic impact and usefulness in application to thermoelectrics. We investigated thermal conduction in various Si nanostructures including nanowires and phononic crystal nanostructures. Thermal conductivity of air-bridge silicon nanowires with various widths between 60 and 150 nm and a one-dimensional phononic crystal nanostructure are investigated at room temperature. Large reduction in thermal conductivity is observed for thinner nanowires due to more frequent surface scattering of phonons. This result indicates that the phonon transport is ballistic in the investigated systems. The 1D phononic crystal showed smaller thermal conductivity compared with a nanowire with the same width. Phononic band diagrams of 1D phononic crystals with a period of 100 nm was calculated. The simulated phononic band diagram shows that it opens a complete band gap around 20 GHz, and the band width is 25 % of the center frequency. The frequency is very low compared with the thermal phonon frequency. Therefore, the reduction in thermal conductivity at room temperature should be caused by the group velocity reduction, which occurs around the Brillouin zone boundary. We consider that the observed reduced thermal conductivity in our structure is still described by particle nature of phonons, not by wave nature. We keep challenging to observe and establish the coherent control of thermal conduction using phononic crystal nanostructures by fabricating shorter period phononic crystal nanostructures and/or performing experiments at lower temperatures.

研究目的

本研究は、半導体に周期的な精密加工を施したフォノニック結晶ナノ構造を用いて、熱の主な運び手である格子振動(フォノン)の伝搬を制御し、半導体中の熱伝導を制御することを目的とする。

電子および光電子デバイスは高効率化の取り組みが常に行われているが、エネルギー損失は不可避な問題であり、その損失のほとんどは熱として放出される。したがって、エレクトロニ

クス分野においてデバイスで発生する熱のマネジメントは重要な課題である。本研究では、エレクトロニクスとの整合性がよく、精密ナノ加工が可能なシリコンを材料に選択し、シリコンフォノニック結晶ナノ構造を研究対象とする。

伝熱工学において、フォノニック結晶ナノ結晶を用いた熱伝導制御の実験的研究例は数少ない。その理由は、高度な精密加工が要求されるという技術的な問題もあるが、フォノンが有するマルチスケール特性が熱伝導制御の実現を困難にするであろうという物理的予測が

あったからである。例えばシリコン中に存在する格子振動は、その周波数がテラヘルツ領域まで存在し、平均自由行程がナノメートルからメートルという、9桁にもおよぶスケールの違いがある。そのため、一定の周期をもつ人工周期構造を形成しても、他の周波数をもつフォノンに対しては何ら影響を与えないだろうという予測である。近年、周期ナノ構造において熱伝導の低下が報告されたが、別のグループは低下がみられないと報告するなど、周期的ナノ構造による熱伝導制御の可能性に関しては統一的な見解が得られていない。

このような研究背景の下で、様々なフォノンニック結晶ナノ構造を作製し、フォノンの波動性に基いた熱伝導制御効果の有効性が明確に示せれば、熱伝導制御性が上がるため、学術上のインパクトはもちろんのこと、エレクトロニクス分野への応用につながる研究となることが期待できる。

概要

熱伝導は、温度差と熱伝導率で熱流束が決定され、熱移動が起こる現象である。このフーリエの法則は、均質で十分に大きな系を想定したもので、熱工学において、ほとんどの場合適用に問題はない。しかし、この適用範囲がない系、すなわち、熱の担い手であるフォノン（格子振動の量子）の平均自由行程と、構造の代表長さが同程度になる電子デバイスやアクティブ光電子デバイスでは、非フーリエ熱伝導となり、微視的視点に立った熱伝導（フォノン輸送）の取り扱いが必要になる。ナノスケール伝熱は、興味深い基礎物理研究の対象であるとともに、熱電変換材料の性能向上にも貢献するため、ナノ構造導入による熱伝導率の低減が利用されるなど、90年代以降、ナノ・メソスケール伝熱は、エネルギー・環境分野

でも存在感を一層増してきている。

熱電変換は、ナノ構造の導入による熱伝導制御のコンセプトが最も活用できる応用のひとつである。熱電変換は温度差発電とも呼ばれるため、熱伝導率を低減するために様々な手法が開発されてきた。これらの研究がフォノンの粒子的な側面で議論する現象である一方で、フォノンの波動的な側面で議論するフォノンクスに基づくコヒーレントなフォノン輸送制御による手法への関心が高まっている。本手法は、上記の応用可能性だけでなく、何桁もの周波数に渡って存在するフォノンの伝搬による熱伝導現象を、比較的単純な人工周期構造によって制御可能なのかという、基礎学術的に極めて興味深い問いに対する答えを与えるものであり、その実証と応用可能性を探索するため、本研究を行った。

Siナノ構造の形状が、どのように熱伝導率に反映されるのかを調べるための試料構造として、エアブリッジ状のナノ構造形成技術を開発した。使用したSOI基板は、活性層の厚みが145 nmで、埋め込み酸化膜層の厚さは1 μm であり、ナノワイヤーと一次元(1D) PhCナノ構造を作製した。作製したナノ構造は、ワイヤー幅が、60, 67, 80, 92, 122, 152 nmであり、1D PhC構造は、周期が300 nmで、細い部分が89 nm、太い部分が290 nmであった。厚みは全て活性層厚の145 nmとなっている。細い部分と太い部分の対を1周期とする、周期構造が運動量空間に折り返しを生じさせ、群速度の低下とフォノンニックバンドギャップを形成することで、コヒーレントフォノン輸送制御が可能になる。

面内方向の熱伝導を、光学的手法により評価できるマイクロサーモリフレクタンス法を独自に開発した。本測定法の特徴は、電子線描画装置により半導体チップに千個単位で描画された様々な構造パラメータを有する構造につ

いて、電気的手法に比べて1000倍も高いスループットで評価できる点である。本測定法の確立により、他のグループよりも圧倒的に有利な実験環境が整った。

まず、様々な幅 $w=60, 67, 80, 92, 122, 152$ nmを持つナノワイヤー構造について、マイクロ領域サーモフレクタンス法により熱伝導率測定を行った。 κ は上記の幅の順に47, 53, 57, 60, 63, 65 W/m \cdot Kであった。熱伝導率は細いナノワイヤーほど低くなっており、緩和時間に大きな差が出る方向になっている。

この実験結果を微視的に考察すると、室温における熱フォノン波長は、群速度が 10^3 m/s程度、周波数がTHz程度であることから1 nm程度と計算されることと、SEM観察により、本構造にナノ加工によって数nm程度の粗さが表面に形成されていることがわかっており、それを考慮すれば妥当であると考えられる。

バルクシリコン中では、室温における主なフォノン散乱過程は、ウムクラップ散乱であるが、この結果は、表面散乱が主なフォノン散乱過程であることを示しており、本系でバリスティックなフォノン伝導が支配的であることを示している。

PnCナノ構造についても同様の測定を行い、ナノワイヤーと熱伝導率を比較した。得られた熱伝導率は、44 W/m \cdot Kであり、この値は、同じ幅を持つナノワイヤーの値63 W/m \cdot Kと比較して明らかに低い。この結果の定性的な説明としては、フォノンが本周期構造の太い部分に進入することにより行程が長くなり、フォノンの軸方向の輸送を妨げる空間として機能しており、熱伝導率が低減されたと考えられる。

また、ナノワイヤーの熱伝導率を幅の広いほうに外挿すると約70 W/m \cdot Kとなり、過去の研究で報告されている値と一致したため、独自開発の測定法の信頼性も確認できた。

本実験データからは、表面散乱とコヒーレ

ントフォノン輸送制御の効果を分離できないため、後者を明確に示すためには、表面-体積比が等しく、フォノンバンドエンジニアリングに基づいて設計した、フォノン輸送制御効果の異なる構造を複数用意するなど、系統的な実験を進める必要がある。

現段階では、作製した一次元PnCナノ構造において室温でのコヒーレントな熱伝導制御の効果は不明であり、それほど大きくはないと考えている。今後、より短い周期を有するPnCナノ構造を作製し、低い温度で測定を行うなど、PnCナノ構造に固有のフォノンの波動的性質に基づいたコヒーレント熱伝導制御の実証に取り組んでゆく。

— 以下割愛 —