

丸文研究奨励賞 受賞者

野村 政宏

東京大学 生産技術研究所 マイクロナノ学際研究センター
准教授



周期的ナノ構造を用いた熱フォノニクスの開拓

ナノスケールフォノン輸送の物理に立脚したより高度な熱制御

■ 研究の背景

エレクトロニクスとフォトニクスは、ナノテクノロジーを積極的に活用することにより、一量子操作すら可能なまでに高度な発展を遂げた。一方、熱は産業革命前後からマクロな熱の取り扱いには長けるが、ナノの領域に踏み込んだのは90年代になってからである。ナノ構造を積極的に利用することで格子振動の量子であるフォノンの輸送を制御する「フォノンエンジニアリング」により、高度な熱制御を目指す取り組みがなされている。熱伝導のほぼ全てがフォノンの粒子的描像で記述できるが、フォンは波動性を有するため、原理的には位相を考慮した波動的取り扱いが可能ならずであり、実現すれば熱制御に新しい選択肢をもたらすことが期待される。我々は、様々なエネルギーをもつフォノンの集団輸送である熱伝導を、フォンの波動性に基づいて制御する熱フォニクス分野に関する研究を行っている。

■ 研究の成果

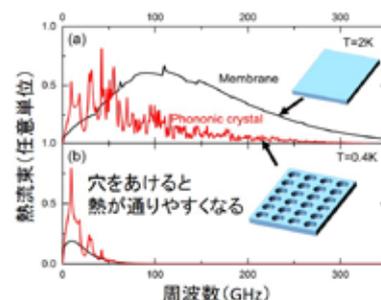
熱伝導はフォンがお互いに衝突を行いつつ温度の低い方へ拡散する現象で

ある。ナノスケールで見ると、フォンは次の衝突まで進む間は弾道的に移動しており、その距離を平均自由行程と呼ぶ。平均自由行程よりも小さい系では、図1(a)のように構造界面を感じて移動する。特に、コヒーレンスが保たれるスケールの周期的構造(フォニック結晶)では、その周期性に起因するブラッグ回折によって輸送特性が大きく変化する。本研究では、図1(b)に示すような厚さ150 nmのシリコン薄膜に半径100 nm程度の円孔を周期配列した構造をエブリッジ化した二次元フォニック結晶中の熱伝導についてシミュレーションおよび実験を行っている。

機械特性が周期的に変化するフォニック結晶中では、フォンに対するバンドが形成され、輸送特性が大きく変化する。このフォノンバンドエンジニアリングは、波動性に起因する多様な物理を提供する。その一例としてフォニックブースト効果を紹介する(図2)。シリコン薄膜とそれに孔を多数あけた多孔膜を比較すると、通常は当然孔のあいていない薄膜の方がよく熱を通す。しかし、100 nm程度の非常に細かい周期をもつフォニック結晶を用意して極低温に冷やすと、薄膜よりも熱を多く通す状態を実現

図2

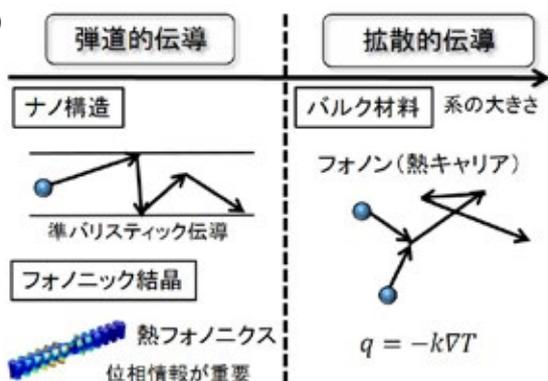
フォンの波動性を積極利用すると、「孔をあけて熱を通しやすくする」という直観に反する物理も実現できる。薄膜とPnCについて計算した(a) 2 Kおよび(b) 0.4 Kのときの熱流束スペクトル。



できる。

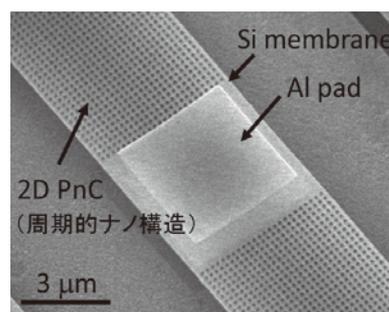
熱は散逸が激しいためナノ構造の熱伝導率測定は容易ではない。一般には電気的測定法が用いられ、測定対象を挟む配置でマイクロヒーターとセンサーを備えた構造を形成し、両持ち梁構造にして熱コンダクタンスを測定する。真空チャンバー中での電気測定は、1チップあたり数個に限られてしまう。様々な設計パラメータを振った系統的な測定を行うためには、スループットの高い新しい測定法の開発が必要であっ

図1 (a)



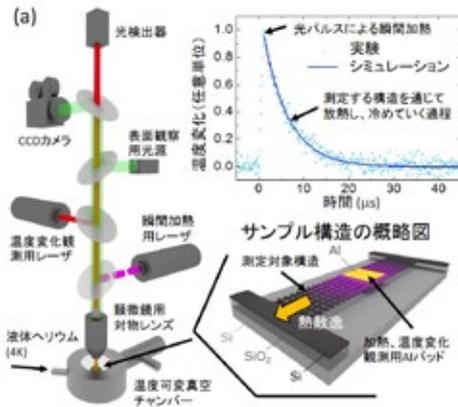
ナノ構造ではフォンの弾道性が顕著となり、理想的な系では格子振動の波動性に基づく特殊な熱伝導となる。

(b)

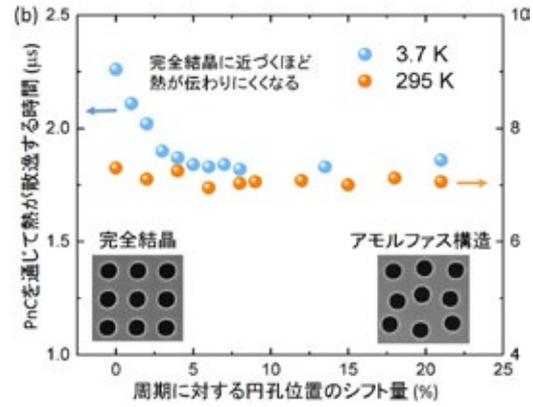


作製したシリコンフォニック結晶ナノ構造の走査型電子顕微鏡写真。

図3 (a) 開発した光を用いたナノ構造熱伝導率測定システムの概略図と測定原理。非接触測定のため、一度に多数の構造を測定できる。



(b) フォノンの波動性を利用した熱伝導制御。完全結晶では干渉効果によってフォノンの群速度が低下し、熱伝導が抑制される。



たため、図3(a)に示す非接触でスループットの高い光学測定法を開発した。サーモリフレクタンス法をナノ構造測定に応用した手法で、1チップに1万個程度の構造を形成でき、電気的測定法よりも2桁以上高いスループットを実現している。測定原理は、光パルスを集光してマイクロアルミパッドを加熱し、その温度変化を反射率変化として同軸の連続光レーザで読み取る。熱散逸チャンネルは測定対象のみであるため、その熱伝導率が熱散逸時間に反映される。この高速測定法が本研究の強力なツールとなっている。

フォノンの波動性を使った熱伝導制御のコンセプトは長年存在するが、実証は容易ではない。周期的ナノ構造ではフォノンの群速度が著しく低減するため、熱伝導率の低下が期待できる。しかし、ナノ加工によって形成された新たな界面も強い表面フォノン散乱によって熱伝導率の低下を引き起こすため、両者を切り分けられない。そこで、我々は完全な周期性を有する

フォノン結晶ナノ構造と、円孔の大きさを変えずに位置だけランダムにずらした構造を複数用意して熱散逸時間を比較した[図3(b)]。室温では熱散逸時間に位置ずれ量依存性はみられない。これは、高温になるほどフォノン-フォノン散乱が激しくなるため、波動性が保たれるコヒーレンス長が短くなり、波動的な性質を観測しにくい。しかし、4 K程度まで冷却すると完全結晶に近づくにつれて、周期的ナノ構造による群速度低減効果が顕著になり、熱伝導率が低下して熱散逸時間が長くなる事が明確に観測された。これは、フォノンの波動性を利用した熱制御が可能なることを明確に示すデータであり、熱制御を粒子的描像の領域から波動的描像の領域に拡張したマイルストーン的成果と位置付けられる。

■ 将来の展望

今世紀は「光や電気のように熱を扱う」

ことが科学の重要テーマのひとつであり、エレクトロニクス社会の更なる発展につながると考えている。光学において、波動光学が光の波動的性質を利用することで幾何光学よりもはるかに豊かな物理と高度な技術を提供したように、熱フォニクスは熱マネジメントに新しい方向性もたらず可能性を秘めているのではないかと期待している。ナノスケール熱伝導の理解を深め熱制御技術を高めることは、広い分野に波及効果がある。熱電変換によるスマート社会の構築や、光・電子デバイスが抱える放熱問題を緩和し、さらなる高性能化を可能にするなど様々な応用が考えられ、今世紀の重要なテクノロジーのひとつになると考える。

本研究は、東京大学ナノ量子情報エレクトロニクス研究機構のご支援をはじめ、多くの共同研究者や学生と行ったものであり、深く感謝申し上げます。この受賞を励みとし、本研究および分野の発展に尽力する所存である。

References(参考文献)

- [1] M. Nomura, J. Nakagawa, K. Sawano, J. Maire, and S. Volz, Appl. Phys. Lett. 109, 173104(2016).
- [2] M. Nomura, Materials Transactions 57, 555(2016).
- [3] R. Anufriev and M. Nomura, Phys. Rev. B. 93, 045410(2016).
- [4] R. Anufriev, J. Maire and M. Nomura, Phys. Rev. B, 93 045411 (2016).
- [5] R. Anufriev and M. Nomura, Phys. Rev. B. 91, 245417(2015).
- [6] J. Nakagawa, Y. Kage, T. Hori, J. Shiomi, and M. Nomura, Appl. Phys. Lett. 107, 023104(2015).
- [7] M. Nomura, Y. Kage, D. Muller, D. Moser, and O. Paul, Appl. Phys. Lett. 106, 223106(2015).
- [8] M. Nomura, Y. Kage, J. Nakagawa, T. Hori, J. Maire, J. Shiomi, R. Anufriev, D. Moser, and O. Paul, Phys. Rev. B 91, 205422(2015).
- [9] M. Nomura, J. Nakagawa, Y. Kage, J. Maire, D. Moser, and O. Paul, Appl. Phys. Lett. 106, 143102(2015).
- [10] M. Nomura, N. Kumagai, S. Iwamoto, Y. Ota, and Y. Arakawa, Nature Physics 6, 279(2010).