

## ナノスケール熱制御によるデバイス革新 ー フォノンエンジニアリング ー

科学技術振興機構(JST) 研究開発戦略センター  
馬場 寿夫, 斎藤 広明, 永野 智己,  
松下 伸広, 的場 正憲, 佐藤 勝昭, 曾根純一

JST 研究開発戦略センター(CRDS)では、昨年来、ナノスケールにおける熱の問題につき有識者の協力を得て調査分析を進めてきた。このほど、これらを踏まえて戦略プロポーザル「ナノスケール熱制御によるデバイス革新ー フォノンエンジニアリングー」という提言書をまとめ、関係省庁や関係業界などに呼びかけている。この小文では、このプロポーザルを出すに至った背景、具体的な研究開発の課題と推進方法について紹介する。

### 1. デバイス革新のカギは熱制御にある

近年の情報化・ネットワーク社会においては、情報通信デバイスの高性能化によってわれわれの生活の利便性が大きく改善されてきた。一方、新たに生成される情報量は飛躍的に増加しており、2020年には現在の約10倍の40ゼタ( $10^{21}$ )バイトになると予測されている。この情報爆発に対応するためには、今後も情報処理やデータストレージの大幅な高性能化・省電力化に向けた技術革新が不可欠である。

しかし、半導体集積回路ではナノスケールに微細化されたデバイスの発熱・放熱の問題が高性能化を阻害するようになっており、また、ハードディスクではナノスケールの微小な磁石の熱揺らぎの問題から大容量化の大きな壁に直面している。このため、ナノスケールの熱制御手法の開発によるこれらの問題の解決、あるいはナノスケールでの熱発生を積極的に活用した新たな動作原理のデバイスの開発が強く望まれる。このような状況では、ナノスケールでの熱の振る舞いを理解し、その特性を制御し利用することが非常に重要になる。

### 2. ナノスケールでは熱を拡散では扱えない

ナノスケールでは、物質中の熱の輸送を格子振動の量子であるフォノンの輸送という概念に基づき扱わなければならない。従来のトランジスタなどデバイスのサイズはフォノンの平均自由行程よりはるかに大きいので、マクロな熱拡散の取り扱いが成り立ち、熱伝導を考えるにあたりフォノンを考慮する必要がなかった。しかし、デバイスサイズが微細化した現在では、熱伝導をフォノンのレベルで取り扱わなければ、正確にデバイスの動作を予測することや、所定の性能や信頼性でデバイスを設計することができなくなってきた。実際、シリコンナノワイヤの熱伝導率は、バルクの1/20以下に低下すると言われている。これは、熱電変換には有利であるが、電子デバイス

の設計においては、熱拡散を困難し微細化を制限する要因となっている。

このため、今後の高性能なデバイスの開発には、熱伝導をフォノン輸送としてとらえ、ナノスケールでの温度や熱伝導を正確に把握し、フォノン輸送を積極的に制御して、デバイス内部を望みの温度分布に設定できるようにすることが必要になっている。

一方で、電子デバイス、光デバイス、磁気デバイスの微細化がナノスケールまで進むにつれ、電子、フォトン、スピンとフォノンとを別々に取り扱ってはデバイス動作を正しく理解し、設計することができなくなっており、統一的な扱いが望まれるようになってきた。

このプロポーザルの目的は、微小領域の「熱」に対してナノサイエンスの立場で理解を深め、熱制御・利用技術を確立することで、新たな学術領域の構築と材料・デバイスの革新を図ることである。ここでは、熱輸送をフォノンの概念で扱い、人工的な構造によりフォノン輸送を操作し熱輸送を制御する新たな学問領域を、「フォノンエンジニアリング」と呼ぶ。

### 3. 計測からシミュレーションまで—ナノスケールにおける熱のサイエンス

ナノレベルの熱物性を正確に把握するためには、ナノスケールで温度や熱伝導を高精度に計測できる新たな手法や装置の開発が必要である。以前から熱伝導測定で用いられているサーモリフレクタンス法の測定精度向上や、時間、空間、構造などについての測定範囲の拡大を図ること、さらには、ナノスケールの局所的な構造を高精度に計測できる熱プローブ顕微鏡などの新たな評価手法・装置の開発が重要になる。また、定常状態だけでなく、熱の過渡的な情報も得られるような評価手法の開発も必要である。

材料の表面／界面／不純物／構造欠陥などを考慮したナノスケールでの熱伝導の理論の構築およびシミュレーション手法の開発も求められる。ここでは、単にサイズがナノスケールというだけではなく、極薄膜や極細線のような低次元系の構造・材料、材料表面、異種材料界面におけるフォノンの散乱を考慮した熱輸送についても扱う必要がある。シミュレーションにおいては、原子・分子レベルでの振る舞いを物理の基本原則から計算するプログラムの大規模化、高精度化、操作性の向上などにより、材料の基本的な熱物性パラメータを理論的に容易に求められる計算技法の構築が必要である。また、この熱物性パラメータを用いてさまざまな理論計算手法を駆使して、実際の材料やデバイス構造におけるフォノン輸送のシミュレーション手法の開発が必要である。特に、異なるスケールでのシミュレーション手法を連携させるマルチスケールシミュレーションが重要となる。

### 4. ナノスケール熱制御にむけての技術的課題

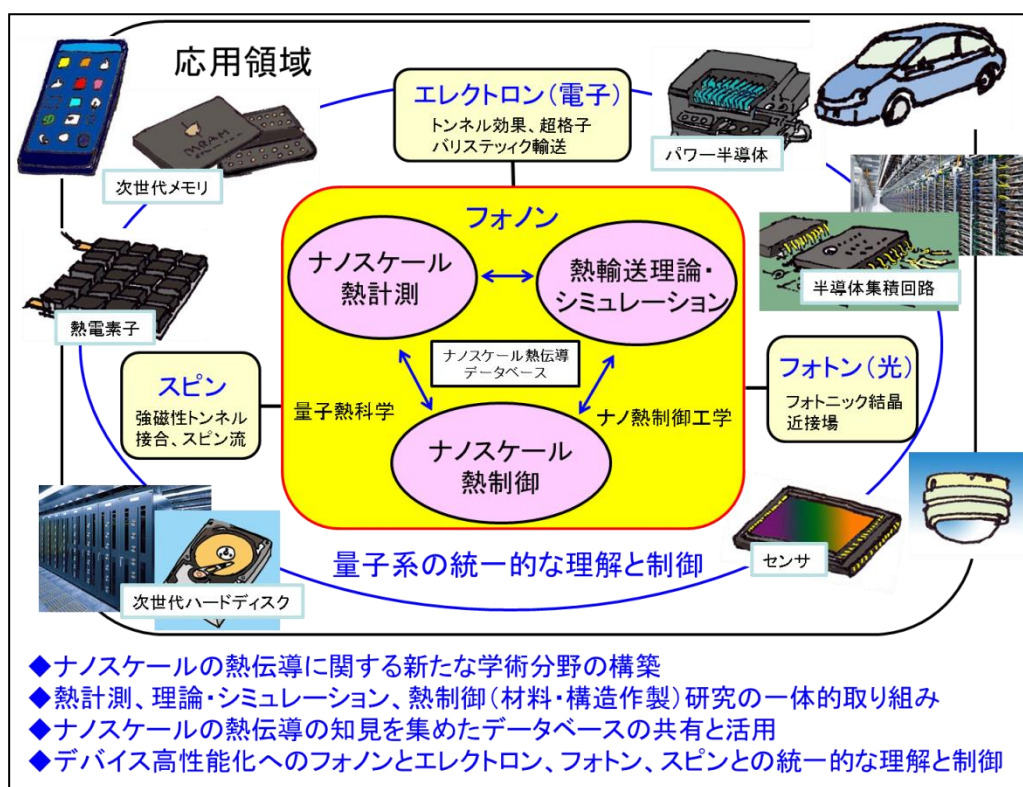
フォノン輸送の概念に立脚したナノスケールの熱輸送の理解を基に、その制御手法を探索し、技術として体系化することが重要である。具体的には、積極的な結晶界面、不純物、構造欠陥、異種材料、微細構造、周期構造などの導入や、薄膜化、低次元化などで材料・デバイス構造を作製し、熱輸送に対するそれらの効果を実験的に把握する。また、理論・シミュレーションでも確認し、これらで得られた知見を材料設計・

デバイス設計に組み込む総合的な研究開発が必要である。

また、フォノンの波動性に着目してフォノンの伝播を制御するフォノンニック結晶のような人工構造を構築するなど、新たな制御手法について取り組むことが重要である。ナノスケールの人工構造による熱輸送の制御には、電子デバイスや光デバイスの分野で培われてきた電子やフォトン制御する人工構造作製技術の知見が活用できよう。

ナノスケールのフォノン輸送とその操作による熱の制御技術を実際の応用分野に適用する場面を想定した研究も重要である。この場合、フォノンと電子、フォトン、スピンといった他の量子の制御についても同時に考えることが必要となる。これらの量子系を統合的に取り扱えるシミュレーション手法の開発、系のモデル化、さらには、これを活用した材料・デバイス設計手法についても研究開発を進めるべきである。

これにより、ナノスケールの熱輸送が性能・機能の面でボトルネックとなっている半導体集積回路、パワー半導体、次世代ハードディスク、熱電素子などのデバイス革新をもたらすことが期待される。また、ナノスケールの熱制御を活用したメモリやセンサなどの新規のデバイスへの展開が可能となる。



## 5. 海外の技術動向

「フォノンエンジニアリング」の考えは決して新しいものではない。この言葉は、1998年に米国 UCLA の A. Balandin と K.L. Wang が「音響フォノンの空間閉じ込めによって格子熱伝導率が低下する」こと予想した論文の中で使ったのが最初とされる。そ

の後、米国を中心にナノエレクトロニクスにおける熱制御に関する研究が着目されるようになり、2012年には、MITの研究チームが、固体中のコヒーレント波としてのフォノン操作による熱伝導制御が可能であることを実証している。EUでは、ヨーロッパにおけるナノフォノン研究の強化を目指し、2013年にFP7-ICTによるEUROPHONONがスタート、ワークショップを開いて最近の研究成果の共有が行われている。

これら欧米のプログラムは、ナノ熱制御自体を対象としたものではない。今こそ、フォノンエンジニアリングを基本としたナノスケール熱制御の研究開発をプロジェクトとして進める好機といえよう。

## 6. 研究開発の推進方策

研究開発の推進に当たっては、コミュニティの形成・発展が極めて重要となる。ナノスケール熱制御は単一の専門知識・技術領域では扱いきれない分野であり、学術分野や応用分野の垣根を越えて、研究者・技術者が集い議論をする場と、常に密な情報交換が可能なネットワーク環境が必要となる。同時に、異なる分野・部門の参画者が、それぞれの枠を超えて連携して、共同研究・人材育成に当たる必要がある。このため、たとえば、熱に関わる計測やシミュレーションを行う研究者と、材料・デバイスの技術者が under one roof で研究開発することも有意義であろう。

もう一つ重要なのが、熱物性に関するデータベースの整備・運用である。ナノスケールの熱物性は、いまだ体系的に整理された知識基盤がなく、学術領域としても確立していないことから、研究者が新たに参入する際の障壁となっている。詳細なデータベースを構築し、関係者がだれでも自由にアクセスして利用できる利用環境・ツールの整備が求められる。

## 7. おわりに

デバイス革新の限界を突破するための研究戦略として「フォノンエンジニアリング」の重要性を述べた。エレクトロン、フォトンに次いでフォノンと3つの量子を総合した量子系の統一理解が今後のデバイス革新に大きな道を開くものと確信している。

詳細は、平成26年度戦略プロポーザル「ナノスケール熱制御によるデバイス革新ーフォノンエンジニアリングー」(PDF形式、5.2MB)を参照されたい。研究開発戦略センターのホームページからダウンロードできる。

<http://www.jst.go.jp/crds/pdf/2014/SP/CRDS-FY2014-SP-04.pdf>

なお、このプロポーザルの趣旨を応用物理学会の講演会企画委員会にご理解いただき、学会企画として第62回応用物理学会春季学術講演会の特別シンポジウムが2015年3月14日に開催され、150名の来場者があった。河田会長はじめ関係者に感謝する。

連絡責任者：佐藤勝昭

国立研究開発法人 科学技術振興機構 研究開発戦略センター

〒102-0076 千代田区五番町7、K's 五番町

E-mail: [katsuaki.sato@nifty.com](mailto:katsuaki.sato@nifty.com)

(2015年 x月 x日受理)