

Si フォノン結晶の開発と赤外線センサへの応用



企業レポート

高橋 宏平*

Development of ultrafine Si phononic crystal and its application to thermal-type infrared sensor

Key Words : Phononic crystal, Phonon engineering, Infrared sensor

はじめに

近年、素子の小型化および高密度化に伴い、電子デバイスにおける精密な熱制御の重要性が増してきている。構造の微細化が進む中、物質の代表長さがナノスケールに近づくと、多くの材料では従来の巨視的な系における状態とは異なる特異な伝熱特性が現れる。このような性質は、材料の伝熱特性を支配するフォノン（格子振動）の微視的な振る舞いが、ナノ材料ではバルクに対して大きく変化することによって由来する。このようにフォノンの振る舞いを精密に制御することで材料の熱物性をチューニングするアプローチはフォノンエンジニアリングと呼ばれ、自然界にはない新たな伝熱特性を有する材料を探索する思想として広く活用されている。その中でも、人工的に微細な周期構造が導入されたフォノン結晶と呼ばれる材料は、新規熱物性を多く示すことから近年注目を浴びている。本稿では、フォノンエンジニアリングの概念を利用して弊社で開発した超断熱 Si フォノン結晶、およびその技術を用いた高感度赤外線センサの開発に関して述べる。

Si フォノン結晶

フォノンは準粒子であり、粒子的な性質と波動的な性質の両面を有する。フォノン結晶では、材

料に周期的な微細構造を導入することで、フォノンの上記両方の性質を制御する。粒子的な制御は非常に直感的である。微細構造の導入により無数の界面が材料内に組み込まれると、フォノンの散乱確率が高まる。微細構造の間隔がフォノンの平均自由行程より短い場合、フォノン散乱が促進されることになり、バルク状態に比べて熱伝導率が低下する。一方、波動的な制御においては、より複雑な状況が期待される。人工的に周期構造が導入されると、原子の結晶周期によって構築されていた元々のフォノン分散が変化し、新たな分散関係が構築される。その結果、特定の波長のフォノンが伝搬できない状態が形成されたり、フォノンの群速度が低下されたりする状況を生み出す。つまり、特定のエネルギーを持ったフォノンが伝搬できなくなったり、フォノンの移動速度が変化したりすることで熱伝導率が変化する。ただし、周期構造に伴うフォノン分散の再構築を期待するには、熱伝導に寄与するフォノンがコヒーレントに振る舞う必要がある。そのため、その効果を示唆する実験的な報告例は、ほとんどが 10 K 以下の低温に限られている。いずれにせよ、フォノン結晶では周期構造が数 100 nm 以下の間隔になることで、バルク状態とは大きく異なる特異な物性が現れることが報告されており、電子デバイスにおける熱物性を局所的に制御する上で非常に有効な手段となる。

今回我々はフォノン結晶開発を進める上で Si に着目した。Si は電子デバイスにおいて最も広く用いられており、現代の我々の生活に欠かせない材料である。そのため安価で加工技術も成熟しており、最先端の Si 半導体デバイスでは、数ナノメートルにも及ぶ非常に微細な構造もウエハ上に形成されている。Si は電気的には半導体であるが、熱的には導体であり、多くの金属を凌駕する高い熱伝導



* Kouhei TAKAHASHI

1979年12月生まれ
大阪大学大学院 工学研究科 電気工学
専攻 (2007年)
現在、パナソニック ホールディングス株式
会社 GX本部 グリーンイノベーション
センター グリーンデバイス開発部
2課 主幹研究員 博士(工学)
専門/固体物理(熱物性、光物性)、伝熱
工学
TEL : 070-2917-6089
E-mail : takahashi.kohei@jp.panasonic.com

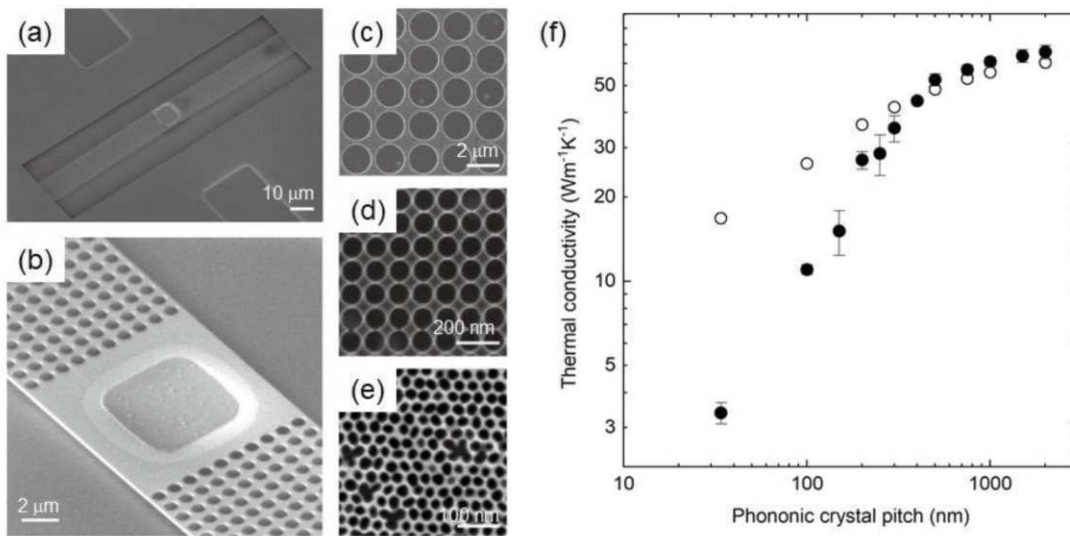


図1. 熱伝導率測定用 Si フォノニック結晶の SEM 像の (a) 全体図、および (b) 鳥瞰図。貫通孔周期が (c) 2 μm 、(d) 100 nm、および (e) 34 nm の Si フォノニック結晶の SEM 像。(f) Si フォノニック結晶の熱伝導率の周期依存性。周期が 500 nm 未満になると、実験値 (黒丸) がフォノンの粒子シミュレーション (白丸、Casimir 限界) による計測値を下回る。

率を有する。熱伝導率が高い性質は放熱には有利に働くが、一方で熱の流入を防ぎたい領域にまで熱が伝搬することもあり、電子デバイスにおいては不利に働く場合がある。局所的に材料の熱物性を制御できるフォノニック結晶技術は、Si 電子デバイスにおいて上記課題を解決する技術になりうる。

図1(a)から1(e)に我々が開発した Si フォノニック結晶の走査型電子顕微鏡像 (SEM) 像の一例を示す。Si フォノニック結晶は、デバイス層の膜厚が 150 nm の単結晶 SOI (silicon-on-insulator) ウエハ上に半導体プロセス技術を用いて製造されており、貫通孔が一定周期で並んでいる。ここでは貫通孔の周期が熱伝導に与える影響を調べるために、表面の開口率を 50% に固定した上で、周期を 34 nm から 2000 nm まで変化させたフォノニック結晶を設計した。図1(f)に室温における Si フォノニック結晶の熱伝導率の貫通孔周期依存性を示す (黒丸)。2000 nm ピッチの Si フォノニック結晶の熱伝導率は $65 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ であり、同じ膜厚からなる Si 薄膜の値 ($75 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$) よりもわずかに小さい値を示した。これは、2000 nm 程度の比較的大きな周期構造でもフォノン粒子の界面散乱によって伝播が妨げられていることを示唆している。一方、周期が小さくなり、500 nm 未満になると、熱伝導率は急激に減少し、34 nm ピッチのフォノニック結晶では、熱伝導率が $3.2 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ という非常に低い値を示した。ここで

留意すべき点は、図1(f)に示す Si の熱伝導率は、貫通孔の導入による体積減少に伴う古典的な熱コンダクタンス低減の効果を含まない値であり、純粋な材料の物性値を示していることである。体積の減少に伴う断熱効果を含む実効熱伝導率としては、最も微細な 34 nm 周期のフォノニック結晶で $1.1 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ と非常に低い値になり、アモルファス材料と同等かそれ以上の断熱性能を実現している。すなわち、フォノニック結晶構造を局所的に導入することで、単結晶 Si 薄膜に比べて熱伝導率を約 1/70 にまで低減させることに成功した。詳細は参考文献 [1] を参照されたいが、上述した Si フォノニック結晶における特異な熱伝導率の低減は、フォノン粒子の界面散乱のみを考慮したモデル [図1(f) 白丸] では再現できず、フォノンの群速度の変化を考慮したフォノン波動性を考慮したモデルを用いることで上手く再現できることを明らかにした。

このように半導体プロセスで作製した超微細 Si フォノニック結晶において、バルク Si よりはるかに低い熱伝導率を実現することに成功した。最も低い熱伝導率を実現した 34 nm 周期の超微細なフォノニック結晶では、ブロック共重合体 (BCP) リソグラフィーと呼ばれる低コストでハイスループットな塗布ベースの自己組織化プロセスを用いており、量産に適したプロセスである。次項では、この BCP リソグラフィーを用いて作製したフォノニッ

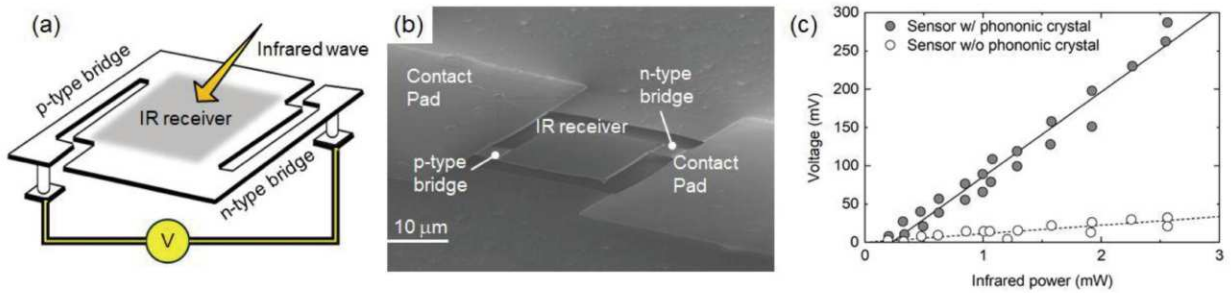


図 2. (a) 熱型赤外線センサの概略図。(b) フォノニック結晶を支持脚 (図中の bridge 部分) に搭載したプロトタイプ赤外線センサの SEM 像。(c) プロトタイプ赤外線センサに赤外線レーザーを照射したときに発生した起電圧のレーザーパワー依存性。フォノニック搭載品 (黒丸) およびフォノニック非搭載品 (白丸) の応答を示す。

ク結晶が搭載された熱型赤外線センサのプロトタイプに関して紹介する。

フォノニック赤外線センサ

プランクの法則によると、物質はその温度に応じた波長および強度の電磁波を放出する。熱型赤外線センサでは、測定対象物から放射される遠赤外線の放射を検出し、様々な物の温度情報を可視化する。このデバイスは、セキュリティ、車載ナイトビジョン、パンデミック対策、設備点検など様々な用途における応用が検討されており、2025 年には 5,000 億円規模の市場に到達すると予測されている。図 2(a) にサーモパイル型と呼ばれる熱型赤外線センサの画素部の概略図を示す。画素の中心には薄膜状の赤外線受光部が設けられており、受光部は細い支持脚によって基板から中空状態で懸架されている。一方の支持脚には p 型にドーパされた領域、もう一方の支持脚には n 型にドーパされた領域があり、受光部を介して熱電対が形成されている。この構造において、外部から入射した赤外線が受光部で吸収されると、中空状態で周囲から断熱された受光部の温度が上昇し、基板と受光部との温度差に比例した熱起電圧が発生する。この時、発生した熱起電圧を測定することで外部から入射してきた放射の総量を見積もる。したがって、熱型赤外線センサでは、赤外線入射に伴った受光部の温度上昇が大きいほど、感度が高くなる。すなわち、受光部を周囲から断熱する役割を担う支持脚の断熱性能が高いほど、感度が高い。しかしながら、一般的にサーモパイル型の赤外線センサに用いられる Si は、上述したように金属並みの熱伝導率を有するため、サーモパイル型センサの

感度向上は容易ではない。我々は、この課題を解決するために、フォノニック結晶構造を支持脚に導入したサーモパイル型のフォノニック赤外線センサを開発した。

図 2(b) に我々が開発した Si サーモパイルセンサの SEM 像を示す。基板から伸びる二本の支持脚によって受光部が中空状に懸架されている。それぞれの支持脚には、イオン注入によって p 型領域と n 型領域が形成されており、受光部に設けられた金属膜によって両者は電氣的に接続され、熱電対を形成している。双方の支持脚には、BCP リソグラフィーによって 38 nm 周期の貫通孔からなる超微細フォノニック結晶構造が形成されている。

試作したサーモパイルセンサに赤外線レーザーを照射した時に発生した起電圧のレーザーパワー依存性を図 2(c) に示す。フォノニックサーモパイルセンサの起電圧はレーザーパワーに比例して増大しており (黒丸)、感度は 111 V/W と見積もられた。比較のため、フォノニック結晶を導入していない同様の構造のサーモパイルセンサの結果も図 2(c) に示す (白丸)。フォノニック結晶を搭載しない比較用のセンサの感度は 11.3 V/W であり、フォノニック結晶構造を断熱支持脚に導入することで、サーモパイルセンサ感度を 10 倍程度高めることに成功した²⁾。

おわりに

38 nm 周期の超微細フォノニック結晶を導入したサーモパイルセンサを試作し、フォノニック結晶構造によりセンサ感度が 10 倍向上することを実証した。熱型赤外線センサはインフラ点検やセキュリテ

ィなど様々な用途で活躍が見込まれており、今後の需要拡大が期待される。前述したように、我々が開発した自己組織化プロセスによるフォノンニック結晶製造工程は、ハイスループットかつ低コストで sub-100 nm の超微細構造を形成できるプロセスであり、また、既存の半導体ウエハ加工プロセスとの親和性も高く、量産にも対応し得る。本稿で紹介したフォノンニック結晶技術は熱型赤外線センサの微細高感度化を促す技術であり、今後の熱型赤外線センサの普及に繋がる大きな可能性を秘めている。

参考文献

- 1) K. Takahashi *et al.*: Elastic inhomogeneity and anomalous thermal transport in ultrafine Si phononic crystals, *Nano Energy* **71**, 104581 (2020).
- 2) N. Tambo *et al.*: Sensitivity improved thermal infrared sensor cell applying the heat insulating phononic crystals, *Proc. SPIE 11723, Image Sensing Technologies: Materials, Devices, Systems, and Applications VIII*, 117230 (2021).

