

大阪科学・大学記者クラブ 御中

(同時提供先：文部科学記者会、科学記者会、宮城県政記者会)



2022年12月15日

大阪公立大学

エア・ウォーター株式会社

東北大学

日本の解析技術と結晶成長技術の結晶！

半導体材料 3C-SiC が高い熱伝導率を示すことを初めて実証

<ポイント>

- ◇半導体材料 3C-SiC^{*1} が理論値に相当する高い熱伝導率を示すこと初めて実証。
- ◇これらの高い熱伝導率は、結晶の純度・品質が高いことに起因することを解明。
- ◇マイクロサイズデバイスへの応用や、簡便な大量生産・大面積化が期待。

<概要>

大阪公立大学大学院 工学研究科の梁 剣波准教授、重川 直輝教授とイリノイ大学の Zhe Cheng 博士、David G. Cahill 教授、エア・ウォーター株式会社の川村 啓介博士、東北大学金属材料研究所の大野 裕特任研究員、永井 康介教授、ジョージア工科大学 Samuel Graham 教授らの研究グループは、半導体材料 3C-SiC が理論値に相当する高い熱伝導率を示すことを、熱伝導率の評価と原子レベルの解析から初めて実証しました。

炭化ケイ素 (SiC) は、次世代パワーデバイスの半導体材料として大きな注目を集めており、温度上昇によるデバイスの故障や性能低下を防ぐために、熱伝導率が高い材料の開発が求められています。結晶では、構造が単純なほど熱伝導率が高くなりますが、図1の青色網掛け部分において、ダイヤモンドに次いで結晶構造が単純な 3C-SiC ではこれまで理論値レベルの高い熱伝導率の実証はできていませんでした。

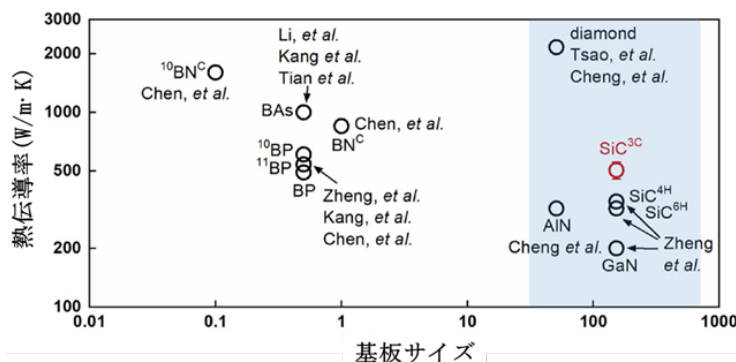


図1 3C-SiC の熱伝導率と他の半導体材料との比較

本研究では、エア・ウォーター株式会社が開発した 3C-SiC 結晶について、熱伝導率の評価および原子レベルの解析を行いました。まず、熱伝導率の評価を行ったところ、3C-SiC 結晶は大口径材料の中では熱伝導率が最も高いダイヤモンドに次いで2番目の熱伝導率を示すこと (図1)、髪の毛の50分の1の厚さの薄膜状にした場合、ダイヤモンドよりも高い熱伝導率を示すことを実証しました。また、図1の評価で示された熱伝導率は、理論値に相当しました。

次に、高い熱伝導率を示す理由を調べるために原子レベルの解析を行ったところ、この 3C-SiC 結晶は不純物をほとんど含まず純度が高いこと、また、結晶内の原子が規則的に配列しており、単結晶としての品質が非常に高いことが分かりました。

さらに、3C-SiC 結晶をシリコン基板上に形成し、界面の熱伝導率について原子レベルの解析を行ったところ、界面の原子配列に大きな乱れはなく、シリコン基板との界面も高い熱コンダクタンス^{*2}を示すことが明らかになりました。

本研究成果により、3C-SiC が薄膜状でも高い熱伝導率を示すことが実証されたため、集積回路への応用が期待されます。また、3C-SiC は現在普及している 4H-SiC^{*3} とは違いシリコン基板上での形成が可能のため、簡便に大量生産や大面積化できると考えられます。

本研究成果は、Nature Publishing Group が刊行する国際学術雑誌「Nature Communications」に、2022年11月24日(木)にオンライン速報版として掲載されました。

デバイス動作時の発熱・温度上昇による性能の劣化と寿命の短縮を抑制するため、高熱伝導率を有し、かつ実用化が可能な材料が求められています。3C-SiC 自立基板と薄膜は高い熱伝導率を有し、低コストかつ大口径ウェハーの作製ができるため、実用レベルのデバイスの放熱性の向上につながると期待されます。



梁 剣波准教授

<研究の背景>

シリコン (Si) 原子と炭素 (C) 原子が相互に規則的に配列した炭化ケイ素 (SiC) は、Si を上回る絶縁性、耐熱性、熱伝導性を有し、電車に搭載されるなど次世代のパワーデバイス用材料として実用化が進んでいます。

SiC には六方晶 (4H、6H 等)、立方晶 (3C) 等、原子配列の異なる複数種類の結晶形 (ポリタイプ) が存在し、4H-SiC、6H-SiC^{*4} を中心にパワーデバイスの研究開発・実用化が行われてきました。3C-SiC はこれらに比べて結晶構造が単純なため熱伝導率は高いと期待されますが、海外で作製された 3C-SiC の熱伝導率の報告値 (90 W/m·K) は、六方晶 (6H-SiC の熱伝導率測定値 320 W/m·K) よりも低い値にとどまっていた。

<研究の内容>

Si 基板上に厚さ 100 μm の 3C-SiC を形成した後、Si を除去することによって 3C-SiC 自立基板を得て (図 2 (a))、高分解能 TEM^{*5} 観察と X 線ロッキングカーブ (XRC) 法^{*6} により原子配列と結晶性の評価を行いました。TEM 像では、ナノレベルの結晶欠陥は観察されず、原子が規則的に配列していることを確認しました (図 2 (b))。XRC ピークは狭く (半値幅 158 arcsec)、結晶が高品質であることを示しました (図 2 (c))。次に、時間領域サーモリフレクタ^{*7}法を用いて 3C-SiC 自立基板と厚さ 1 μm の 3C-SiC 薄膜の熱伝導率を評価しました。自立基板においては、500 W/m·K を超える等方性の高い熱伝導率が得られました (図 1)。この値は、大口径材料の中ではダイヤモンドに次ぐ 2 番目に高い熱伝導率であり、放熱材料として使われる銅や銀の熱伝導率 (室温で 400 W/m·K 程度) を上回っています。また、厚さ 1 μm の 3C-SiC 薄膜の熱伝導率は同じ厚さのダイヤモンドよりも高いことを見出しました (図 2 (d))。更に、3C-SiC/Si 界面の熱コンダクタンスは、異種材料界面中で最も高い値を示しています。以上の結果により、“3C-SiC は六方晶と比べて結晶構造が単純であるにもかかわらず熱伝導率が低い”、という長年の謎を解決し、結晶性や純度を十分に高めた 3C-SiC では、その熱伝導率が理論通り六方晶より高いことを実証しました。

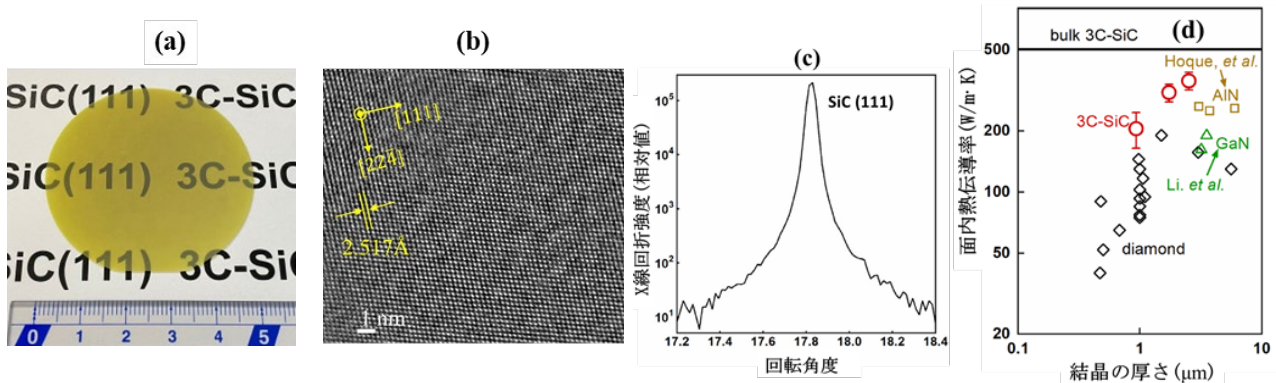


図 2 (a) 3C-SiC 自立基板の写真、(b) 高分解能 TEM 像、(c) XRC ピーク、(d) 3C-SiC 薄膜の面内熱伝導率

<期待される効果・今後の展開>

3C-SiC はダイヤモンドより低コストであり、かつ大口径ウェハーの作製が可能のため、他の半導体材料と組み合わせることにより高放熱性デバイスが実現できます。また、3C-SiC は Si 上に結晶形成が可能であること、3C-SiC/Si 界面の熱伝導率が高いことから、集積回路の性能向上やフォトニクスへの応用が期待できます。

<資金情報>

本研究の一部は、JSPS 科研費（20K04581）による助成を受けて行われました。

TEM 試料作製と観察は、東北大学金属材料研究所附属量子エネルギー材料科学国際研究センター共同利用研究（202012-IRKMA-0046）と文部科学省ナノテクノロジープラットフォーム（A-20-KT-0031）の支援を受けて実施されました。

<用語解説>

- ※1 3C-SiC…SiC の多数のポリタイプの一つ（立方晶）立方体の形の結晶系。
- ※2 熱コンダクタンス…熱伝導率で熱の移動のしやすさを規定する物理量。
- ※3 4H-SiC…SiC の多数のポリタイプの一つ（六方晶）六角柱の形の結晶系で 6H-SiC の Si と C 原子の配置が異なる。
- ※4 6H-SiC…SiC の多数のポリタイプの一つ（六方晶）六角柱の形の結晶系。
- ※5 TEM…透過型電子顕微鏡。試料の構造をナノメータ（1 nm=10⁻⁹ m）オーダーで評価する手法。
- ※6 X線ロックンクカーブ（XRC）…結晶体の結晶性、歪み、組成、膜厚などを評価する手法。
- ※7 時間領域サーモリフレクタンス法…材料表面をインパルス加熱し、時間分解サーモリフレクタンス信号を測定し分析することで、材料の熱伝導率と異種材料界面の熱コンダクタンスを評価する手法。

<掲載誌情報>

【発表雑誌】 Nature Communications（IF=17.694）

【論文名】 High Thermal Conductivity in Wafer-Scale Cubic Silicon Carbide Crystals

【著者】 Zhe Cheng, Jianbo Liang, Keisuke Kawamura, Hidetoshi Asamura, Hiroki Uratani, Samuel Graham, Yutaka Ohno, Yasuyoshi Nagai, Naoteru Shigekawa, David G. Cahill

【掲載 URL】 <https://www.nature.com/articles/s41467-022-34943-w>

【研究内容に関する問い合わせ先】

大阪公立大学大学院 工学研究科
准教授 梁 剣波（りょう けんぼ）
TEL：06-6605-2973
E-mail：liang@omu.ac.jp

エア・ウォーター株式会社
デジタル&インダストリーグループ
川村 啓介（かわむら けいすけ）
TEL：0263-71-2510
E-mail：kawamura-kei@awi.co.jp

東北大学金属材料研究所
教授 永井 康介（ながい やすよし）
TEL：029-267-4156
E-mail：yasuyoshi.nagai.e2@tohoku.ac.jp

【報道に関する問い合わせ先】

大阪公立大学 広報課
担当：竹内
TEL：06-6605-3411
E-mail：koho-list@ml.omu.ac.jp

エア・ウォーター株式会社
広報・IR部
担当：石井
TEL：06-6252-3966
E-mail：info-h@awi.co.jp

東北大学金属材料研究所
情報企画室広報班
TEL：022-215-2144
E-mail：press.imr@grp.tohoku.ac.jp