

2026年2月2日

報道解禁日時：2026年2月2日14時

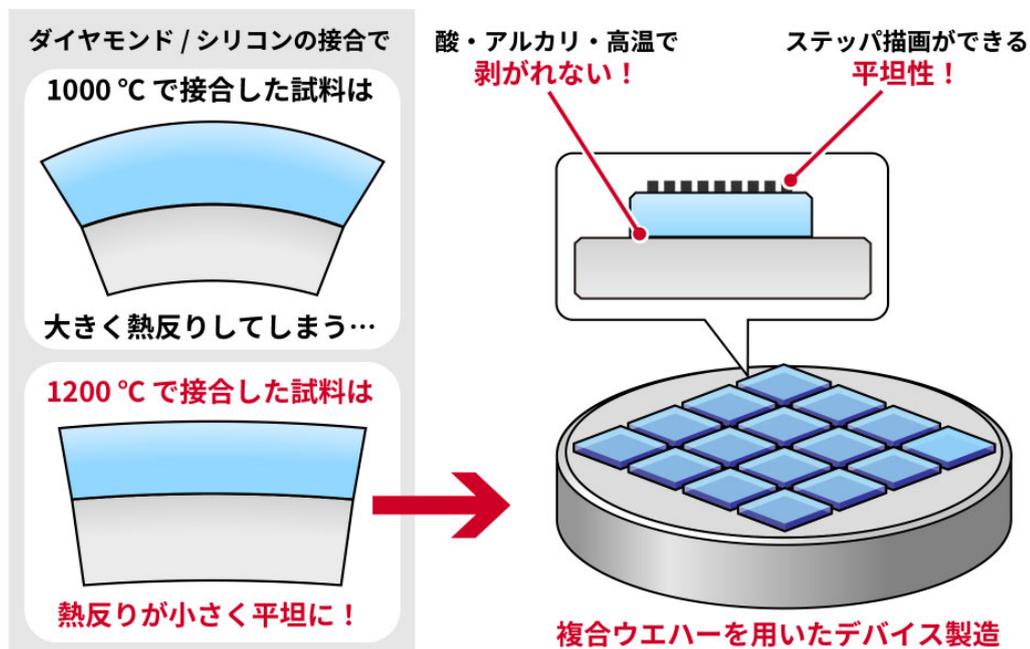
国立研究開発法人産業技術総合研究所／株式会社イーディーピー

ダイヤモンドデバイス用の大面積ウエハー実現に向けた新手法

ダイヤモンドウエハーとシリコンウエハーは高温で接合するほど熱反りが減少することを実証

ポイント

- ダイヤモンドとシリコンでは、高い温度で接合するほど常温に戻した際の熱反りが低下
- 化学・高温プロセスで剥離せず、かつ微細描画が可能なダイヤモンド/シリコン複合ウエハーを実現
- 汎用的な半導体製造装置を用いたダイヤモンドデバイスの社会実装が進むと期待



ダイヤモンド/シリコンの高温接合により強固な界面と小さな反りを両立できる。

これはデバイス製造工程とステッパ微細加工に適し、ダイヤモンドデバイスのウエハースケール製造に展開しうる。

概要

国立研究開発法人産業技術総合研究所（以下「産総研」という）ハイブリッド機能集積研究部門 松前 貴司 主任研究員、高木 秀樹 首席研究員、倉島 優一 研究グループ長、先進パワーエレクトロニクス研究センター 山田 英明 研究チーム長、梅沢 仁 上級主任研究員と、株式会社イーディーピー 古橋 匡幸 開発部長、桃谷 桂子 開発部長、藤森 直治 代表取締役社長は共同で、シリコンウエハー上への貼り付け構造を持ち、汎用的な半導体製造装置で加工が可能なダイヤモンドデバイス用ウエハーを作製しました。

ダイヤモンドは半導体デバイスとして優れた特性を持つため、特に大電力処理や耐熱、高速スイッチングが必要な分野での応用が期待されています。しかし、その産業化には大面積ウエハーの実現がボトルネックとなっています。そこで、多数の小さなダイヤモンドウエハーを大面積シリコンウエハーに貼り付けることで実効的にダイヤモンドデバイス用「大面積」ウエハーを実現する手法の開発に取り組みました。

今回ダイヤモンドとシリコンにおいて、熱膨張量の差によって生じる熱歪みが接合温度の上昇によって抑制できることを見だし、強固に接合されながら反りの少ないダイヤモンド/シリコン複合ウエハーの開発に成功しました。この複合ウエハーがデバイス製造工程の化学・高温プロセスへの耐性を有すること、また、汎用的な縮小投影露光装置（ステッパー）でダイヤモンド上に微細加工が可能なることを確認しました。ダイヤモンド自体の大型化をせず「大面積」ウエハーを実現する本手法がブレイクスルーとなり、ダイヤモンドデバイスの社会実装に向けた技術開発を加速させることが期待されます。

この研究成果の詳細は、2026年2月2日に「ACS Applied Engineering Materials」に掲載されます。

下線部は【用語解説】参照

開発の社会的背景

ダイヤモンドは半導体デバイスとして、既存のシリコン（Si）や窒化ガリウム（GaN）、炭化ケイ素（SiC）などの物質に比べ、高温動作特性・放熱性・高電圧耐性などの優れた特性を持ちます。その特性を生かして、パワーデバイスをはじめとする大電力処理や耐熱、耐放射線、高速スイッチングが必要な分野などさまざまな応用が期待されています。汎用的な半導体製造装置での加工には2インチ径（～50 mm）以上の大面積ウエハーの実現が必要となりますが、高品位なホモエピタキシャル成長による単結晶ダイヤモンドの大面積化は容易ではなく、技術開発が進められています。

ダイヤモンドの大面積ウエハーを実現するその他の手法として、小さなダイヤモンドウエハーを大面積シリコンウエハーに多数貼り付けることも考えられます（図1）。真空中でのスパッタ表面処理による常温接合が提案されており、この方法は剥離しにくい界面が実現できます。しかし、常温接合した複合ウエハーの高温プロセス後の熱反りについては検討されておらず、また接合には凹凸が数原子レベルの平滑な表面であることが必要です。

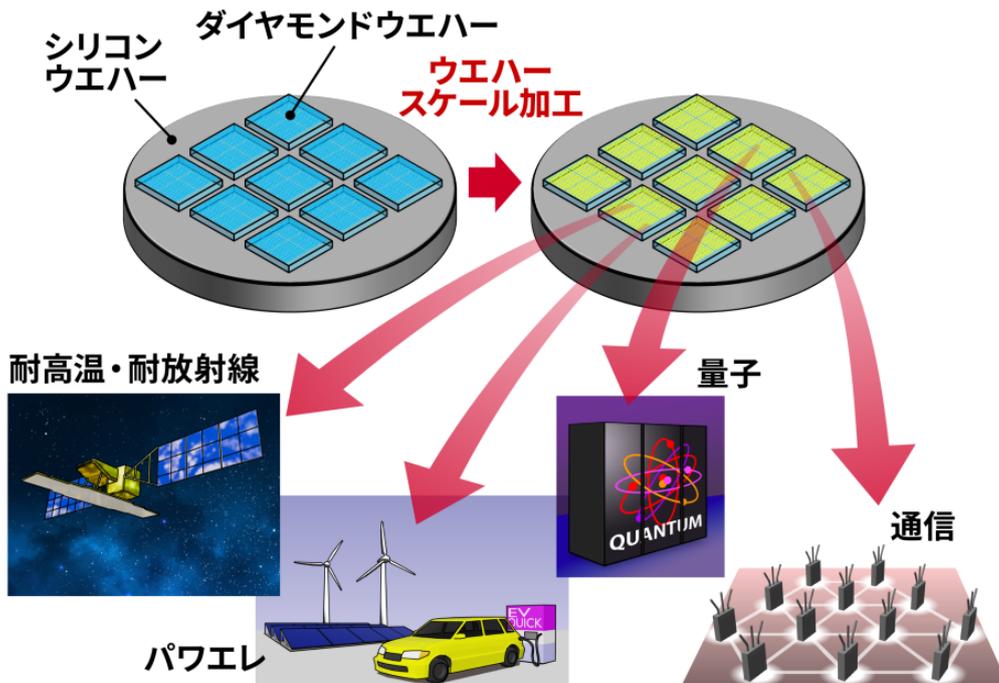


図1 ダイヤモンドウエハーをシリコンウエハー上に並べていくことで、ウエハースケールでのダイヤモンドデバイス製造が可能になる。

研究の経緯

産総研は化学処理したダイヤモンドとシリコンを 200 °C で表面反応させて接合する技術を有しており、熱に弱い電子デバイスに放熱性に優れるダイヤモンドを放熱基板として複合化させることに成功しています (2019 年 5 月 20 日 産総研プレス発表)。一方、ダイヤモンドウエハーとシリコンウエハーをこの手法で接合した複合ウエハーは、化学処理や高温処理を含む半導体プロセスに耐えることが求められます。化学処理や高温処理に耐性のあるウエハー接合技術が新たに求められていました。

研究の内容

1000 °C を超えるような高温での接合は界面の耐性を向上でき、また表面粗さへの要求も低く歩留まりも高いため同種基板の接合に広く用いられます。しかし、異種材料の場合は熱膨張量の差による熱歪みが増大して反り・割れが発生してしまいます。膨張量の 1 °C あたりの変化割合を示す熱膨張係数は温度により変化し、多くの物質では高温になるほど上昇します。今回、ダイヤモンドとシリコンの熱膨張係数が 600 °C 程度で逆転することに注目しました (図 2 左)。熱膨張量は熱膨張係数の温度積分で計算でき (図 2 中央)、温度上昇に伴い 600 °C 近辺まではシリコンの方が大きく膨張しますが、600 °C を超えると熱膨張量の差が小さくなっていきます (図 2 右)。計算ではシリコンの融点 (~1400 °C) 以下では差がゼロになることはありませんが、高温で接合するほどダイヤモンド/シリコン接合体を常温に戻した際の熱収縮量の差が少なくなり、残留応力による反り(熱反り)が減少する可能性に着目しました。これまでに多結晶のダイヤモンド薄膜をシリコン基板と 1150 °C で接合する研究はありましたが、ダイヤモンド内部での破断が起こっていました。本研究では強固かつデバイス応用が期待される単結晶ダイヤモンドを使用し、シリコンと高温接合することで熱反りの低減を試みました。

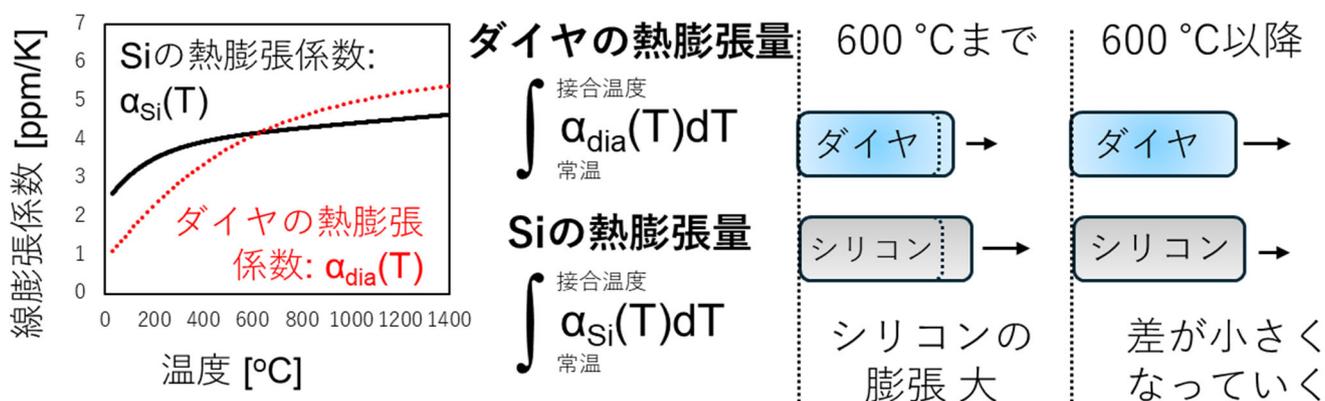


図 2 (左) ダイヤモンドとシリコンの熱膨張係数は温度変化し、600 °C 近辺で逆転する。(中) 熱膨張量の計算式。

(右) ダイヤモンドとシリコンの熱膨張のモデル。高温にてダイヤモンドの熱膨張量がシリコンに近づき、複合ウエハーの熱歪みが小さくなる。

微細加工のためには複合ウエハーを吸着した際の基板の高低差を一定以下に抑制する必要があります。12 mm 角のダイヤモンドウエハーと 2 インチ径のシリコンウエハーを 1000 °C で接合した場合は熱歪みが大きく凸状に反り、基板の高低差は 27 μm となりました。これほどの差がある場合はステッパーで微細描画を行っても、30 %程度の面積割合しか微細構造が残りません。しかし 1200 °C で接合すると熱歪みが低減され差が 9 μm となり、接合温度の上昇で反りが減るという現象を初めて実証しました (図 3)。この複合ウエハーをステッパーに導入すると 10 mm 角

の描画領域の 95 % で 1 μm 幅の微細なラインアンドスペースパターンが作製できることを確認しました (図 3 右)。これにより複合ウエハーを用いた微細デバイスの実現が期待できます。

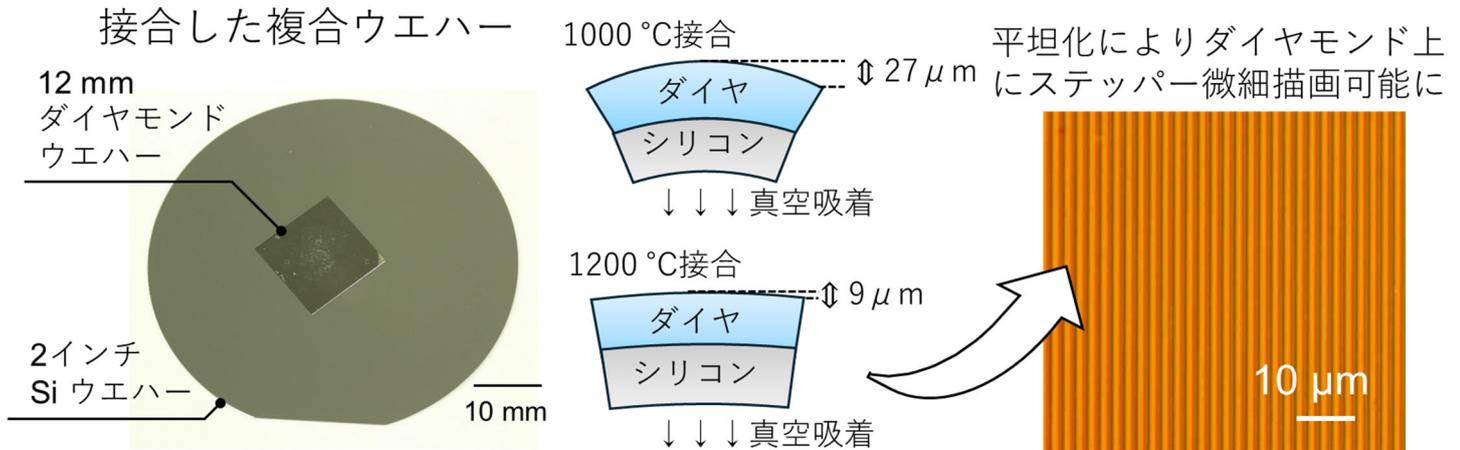


図 3 高温接合したダイヤモンドウエハーとシリコンウエハー。温度上昇により反りが低減したため、1 μm 幅のラインアンドスペース構造がダイヤモンド表面の大部分に描画可能となった。

また、高温接合により表面粗さ (二乗平均平方根高さ ; Sq) が 0.9 nm の比較的粗いダイヤモンド基板であっても強固な接合が得られました。電子顕微鏡によりダイヤモンド/シリコンの接合界面を観察したところ、5 nm 程度の非晶質層を介して緻密な接合が形成されていました (図 4 左)。また、試料を観察した際、接合されている箇所は透明なダイヤモンドを通して界面が黒く見えます。今回シリコンを破壊する衝撃を加えたところ、端部以外では剥離が見られませんでした (図 4 中央)。この端部は基板が薄くなりやすいため、接合時に密着が得られなかった可能性があります。さらに半導体デバイス作製プロセスで用いられる洗浄液である $\text{NH}_4\text{OH}/\text{H}_2\text{O}_2$ (SC1)、 $\text{HCl}/\text{H}_2\text{O}_2$ (SC2)、 $\text{H}_2\text{SO}_4/\text{H}_2\text{O}_2$ (ピラニア溶液) や HF (フッ化水素酸)、TMAH 現像液による化学処理や、導電ダイヤモンド層の形成温度である 1000 °C の高温処理でも剥離は観察されませんでした (図 4 右)。これらの処理はダイヤモンドデバイス製造に用いられる工程であり、剥離しなかったことでデバイス製造への複合ウエハーの応用可能性が示されました。

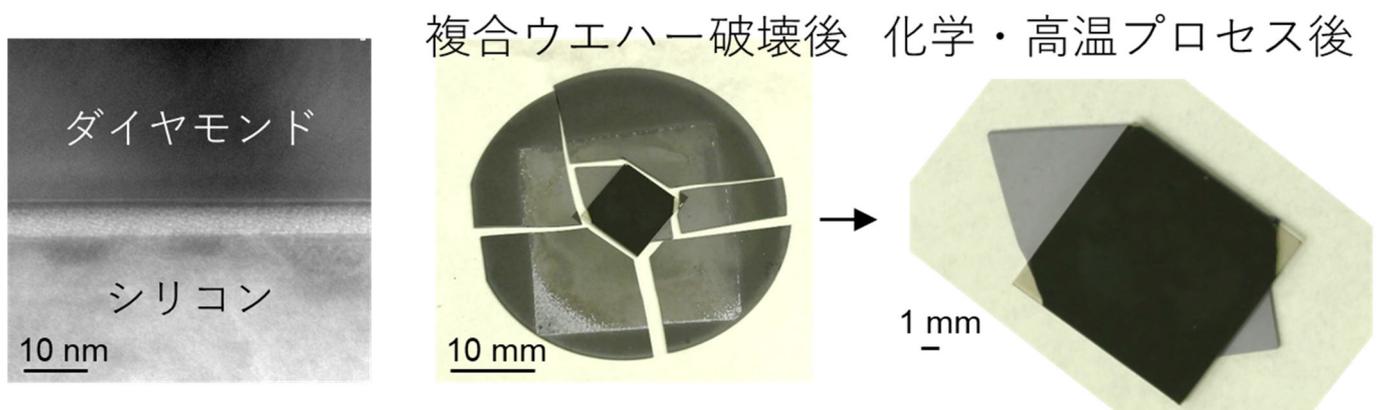


図 4 ダイヤモンド/シリコンの接合界面。シリコンを破壊しても剥離しない強固な界面が得られた。

これらの結果から、今回 1200 °C の高温接合により作製したダイヤモンド/シリコン複合ウエハーは微細描画およびデバイス加工が可能で、今後ダイヤモンドウエハーの枚数・面積を増加させていくことでダイヤモンドデバイス量産への展開が期待できます。

今後の予定

今後、より大きなダイヤモンドウエハーが複数接合された複合ウエハーの開発を進め、また複合ウエハーを用いた電子デバイス作製を実証することで、ダイヤモンドデバイスの社会実装を目指します。

論文情報

掲載誌： *ACS Applied Engineering Materials*

論文タイトル： Reduction of Thermal Warpage in Diamond/Si Wafer by High Temperature Bonding

著者： Takashi Matsumae, Yuichi Kurashima, Hideki Takagi, Hitoshi Umezawa, Hideaki Yamada, Masayuki Furuhashi, Keiko Momotani, Naoji Fujimori

DOI： <https://doi.org/10.1021/acsaenm.5c01087>

用語解説

ダイヤモンドデバイス

ダイヤモンドは広いバンドギャップ、高い熱伝導率、耐放射線性などの特性を持ち、次世代の高性能・高耐久電子デバイス材料として注目されている。特に高温・高電圧環境での動作が期待されている。

熱膨張量

材料が温度上昇に伴って膨張する量。異なる熱膨張係数を持つ材料同士を貼り合わせた場合、加熱・冷却の過程で寸法変化に差が生じ、常温に戻した際にその差に起因する残留応力が発生する。

熱歪み

温度変化によって物体が膨張・収縮する際に生じる歪みであり、特に異種材料の接合では熱膨張の違いにより大きな歪みが蓄積し、反りや剥離の原因となる。

縮小投影露光装置（ステッパー）

微細半導体の量産に使用される露光装置。これに適応することでダイヤモンド電子デバイスの量産が期待できるようになる。

熱膨張係数

物質が1 K (1 °C) の温度変化によって膨張・収縮する割合を示す係数であり、温度によって変化する。常温から接合温度まで温度積分することで熱膨張量が求められる。

残留応力

物体に外力が作用しなくなった後も、物体内部に残っている応力。異種材料を高温接合した材料は常温に戻した際の熱収縮量の差のため発生する。

高温接合

1000 °Cを超えるような融点・軟化点近傍の高い温度で行う接合技術であり、金属拡散接合などが含まれる。一方で熱膨張係数の差が大きい場合や熱に弱いデバイスを接合する場合のため、表面の反応性をあげて数百度以下で接合する低温接合技術も研究されている。

非晶質層

原子が規則的に配列していない固体の層。Siやダイヤモンドの結晶質とは異なり長距離秩序が存在せず、構造がランダムであるのが特徴で、今回材料同士の相互拡散によって形成されたと考えられる。

SC1

「Standard Clean 1」の略。成分はアンモニア水と過酸化水素と水であり、酸化力とアルカリ性で汚染物を除去する。

SC2

「Standard Clean 2」の略。成分は塩酸と過酸化水素と水であり、酸性条件で金属汚染を溶解・除去する。

ピラニア溶液

成分は濃硫酸と過酸化水素で、強力な酸化洗浄液であり有機物除去に非常に効果的である。

HF（フッ化水素酸）

高い反応性を持つ幅広い酸化物を除去するためのエッチング液。

TMAH 現像液

テトラメチルアンモニウムヒドロキシドからなるフォトレジストの現像に使用されるアルカリ性溶液。

機関情報

国立研究開発法人産業技術総合研究所

<https://www.aist.go.jp/>

ブランディング・広報部 報道室 hodo-ml@aist.go.jp

株式会社イーディーピー

<https://www.d-edp.jp/>

総務部 edp.info@d-edp.jp