

高周波半導体デバイス用ダイヤモンドウェハ

Diamond Wafer for High-Frequency Semiconductor Devices

西林 良樹*

Yoshiki Nishibayashi

小林 豊

Yutaka Kobayashi

重川 直輝

Naoteru Shigekawa

梁 剣波

Jianbo Liang

基地局無線通信用の高周波デバイスなどで、取り扱う情報量が増大し、発熱が課題となり、より高放熱性デバイス構造が望まれている。高熱伝導率のダイヤモンドをヒートシンクとすることはその有効な解決策として取り組まれてきているが、従来の接着方法では数μmのデバイスからヒートシンクまでの熱抵抗が無視できなくなっている。より効率的な放熱方法として、GaN半導体デバイスとダイヤモンドヒートシンクを接着剤・はんだ材料なしで直接接合した、GaN-on-多結晶ダイヤモンド構造を、2インチサイズの大口径で作製することに成功し、GaN-HEMTのデバイスの試作とその高放熱特性を確認した。

With the increasing amount of information handled in high-frequency devices used in wireless communications for base stations, heat generation has become an issue, and there is a demand for device structures with improved heat dissipation. Using diamond, which has high thermal conductivity, as an effective heat sink material has been considered a promising approach, but with conventional bonding methods, the thermal resistance between the device and the heat sink, which is on the order of several micrometers, can no longer be neglected. As a more efficient heat dissipation method, we have succeeded in fabricating a large-diameter GaN-on-polycrystalline diamond structure with a 2-inch diameter, in which a GaN semiconductor device and a diamond heat sink are directly bonded without adhesives or soldering materials. Additionally, we have fabricated a prototype GaN-HEMT device and confirmed its superior heat dissipation characteristics.

キーワード：高放熱、2インチ径、多結晶ダイヤモンドウェハ、GaN-HEMT、直接接合

1. 緒 言

第5世代から第6世代に向けての基地局無線通信用の高周波デバイスや近年のデータセンタ用の半導体デバイスなどでは、取り扱う情報量がますます大きくなり、周波数や電流容量などを増大させることができることが必要となっている。このような状況では、半導体デバイスの動作中の温度が上昇し、デバイス性能が十分発揮できなくなる問題が発生する。最高性能を引き出すためには、半導体デバイスのチップを高放熱のヒートスプレッダであるダイヤモンドに接合して、チップの温度上昇を低減することが有効である。しかし、半導体チップの厚さや接合の際に介したはんだ材料の部分に熱抵抗が生じて放熱にも限界がある。そこで、半導体デバイスはμmサイズの薄膜の動作層のみとし、ダイヤモンドに接合材料を介さずに直接接合^{※1}すること（デバイスファーストプロセス）によって放熱効率をさらに上げる技術が開発されている⁽¹⁾。一方で、半導体薄膜層の段階でダイヤモンドに直接接合し、その後半導体層にデバイスを作製する方法（ボンディングファーストプロセス）も有望で、前者よりも量産向きである。この研究開発の初期段階として10mm角サイズで直接接合やデバイス作製は実証され⁽²⁾、デバイスの高放熱特性も確認されている⁽³⁾。これを受け、本技術を量産レベルに適用するためには、半導体プロセスに必要な大口径ウェハでの評価が不可欠となる。すなわち、大口径ダイヤモンドウェハと半導体層を直接接合した構造と半導体デバイス試作の実証、およびそのデバイ

ス動作と高放熱特性の確認などが必要である。

本研究開発では、研究機関でも十分半導体プロセスを試行できる大口径2インチサイズのダイヤモンドウェハの開発を中心として報告する。さらにそのウェハと無線通信で実用化されているGaN半導体層^{※2}とを直接接合し、その接合構造のGaN-HEMT^{※3}のデバイスの試作および高放熱特性も確認できたので報告する。

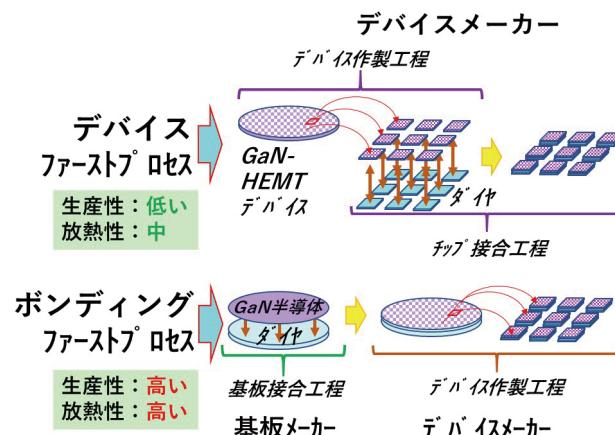


図1 半導体-ダイヤ接合構造の作製工程

2. 多結晶ダイヤモンドウェハの種類

当社では1983年に気相合成によるダイヤモンド合成開発を始めて以来、10mm～20mm角級のダイヤヒートシンクやセラミックス上にダイヤモンドを積層したTABツール^{※4}を製品化してきた⁽⁴⁾。さらには、大口径の2インチサイズ級のダイヤモンドウェハの開発も1993年より開始して1999年にダイヤモンドのSAWフィルタの製品化^{(5)、(6)}に至った歴史がある。多結晶ダイヤモンドの基本的な合成技術はすでに完成されているが、高放熱特性を有する積層型多結晶ダイヤモンドの大口径2インチウェハ開発は初めての試みとなる。

当社が開発してきた多結晶ダイヤモンドは表1に示す通り、自立基板、各種積層基板などいろいろな種類があり、その時々の目的によって仕様も異なるものである。本稿では直径が2インチ未満のものを基板と呼び、2インチ以上のものをウェハと呼び区別している。表1の種々の基板やウェハの中でも、放熱特性に優れた2インチ多結晶ダイヤモンドウェハとGaN半導体と直接接合することは世界でも初めてのことである。本応用に關し、高放熱ウェハは、表1の種類の①、②、⑤、⑦の構造のものであり、10mm角以下の小さいサイズではヒートシンクに用いられてきた構造である。

表1 ダイヤモンド基板・ウェハの種類

	ダイヤモンドの合成方法	ダイヤモンドの特徴	ダイヤモンドの厚さ(μm)	下地基板	ダイヤの熱伝導率(W/mK)	全体の放熱特性	コスト	当社従来開発のサイズ	種類
ダイヤモンド自立基板・自立ウェハ	HFCVD法	粗粒(粒径>10μm)	>300	—	>1000	優良	中	25mm角 ①	
	MPCVD法	粗粒(粒径>10μm)	>500	—	>1800	優良	高	2インチ ②	
ダイヤモンド積層基板・積層ウェハ	HFCVD法	微粒(粒径<1μm)	<30	Si	<1000	低	低	3インチ ③	
	HFCVD法	粗粒(粒径>10μm)	<50	Si	>1000	良	低	25mm角 ④	
	HFCVD法	粗粒(粒径>10μm)	<50	セラミックス(AlN, SiN, SiO ₂)	>1000	優良	低	10mm角 ⑤	
	MPCVD法	粗粒(粒径>10μm)	<50	Si	>1800	良	低	2インチ ⑥	
	MPCVD法	粗粒(粒径>10μm)	<50	セラミックス(AlN, SiN, SiO ₂)	>1800	優良	低	10mm角 ⑦	

注) HFCVD法：熱フィラメント気相合成法

MPCVD法：マイクロ波プラズマ気相合成法

本技術開発の一つの視点として、半導体ウェハとしての供給を考慮して、加工時間の短いプロセス開発、低コストを意識したウェハ構造およびさらなる大口径化への対応を指針として開発を進めている。これらを満たす構造としては、表1の①、⑤が挙げられる。

3. 多結晶ダイヤモンドウェハの作製方法

本開発のダイヤモンドウェハは気相合成法(CVD法)でシリコンやセラミックスなどの異種材料上に多結晶ダイヤモンドを形成して作製される。自立ウェハはその異種基板を除去することによって作製され、積層ウェハは異種材料

上に形成したままのものである。

3-1 多結晶ダイヤモンドの合成方法

ダイヤモンドは図2に概略を示すように、熱フィラメントCVD法あるいはマイクロ波CVD法で作製された。多結晶ダイヤモンドはその粒径が10μm以上となるように一般的に知られているメタン濃度と合成温度条件で行った。自立ウェハは、厚さ300μm以上の多結晶ダイヤモンドをシリコン基板上に合成し、下地の異種材料を除去する前にダイヤモンド表面を平坦化した後に、シリコンを酸で除去したものである。積層ウェハは厚さ100μm以下のダイヤモンドを厚さ3mm以下のシリコンやセラミックスなどに合成したものである。積層ウェハもダイヤモンド表面を平坦化・研磨して鏡面に仕上げられた。

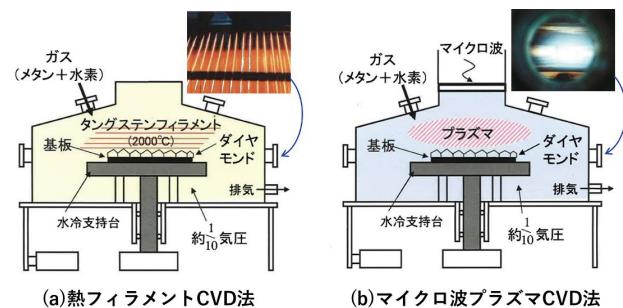


図2 ダイヤモンド合成装置の概略図

3-2 多結晶ダイヤモンドウェハの平坦化方法

これまでのダイヤモンドの平坦化方法は、ダイヤモンド砥粒の研磨盤とダイヤモンド基板との共摺りによる研磨あるいは鋸鉄盤(スカイフ)による研磨が主流である。半導体ウェハ製造工程にあるような研削工程、ラッピング工程、ポリッシング工程の段階的な平坦化工程ではなかった。ダイヤモンドより硬い研削盤がなかったり、化学的にも安定でCMP^{※5}のようなウェットの化学的研磨方法はなかったからである。ただ宝石を研磨する技術は昔から鋸鉄盤が使われておらず、サイズが10mm角以下の小さい場合はそれほど問題もなく平坦にラッピング研磨される。しかしながら、サイズが2インチ以上のウェハサイズになると研磨速度が極端に遅くなり、研磨時間が長くなってしまう。従って、ダイヤモンドウェハも他の半導体ウェハの研削のように段階的に加工することは有効である。2022年10月からJSTからの支援プロジェクトを活用し、レーザーによる表面のトリミングの手法を粗加工として開発している。これを部分修正粗加工と称している。これを機械式の研磨工程の前工程で用いる。その後の工程では機械式の研磨を実施するが、従来のダイヤモンド砥粒を用いた研磨盤を利用する方法およびダイヤモンドとの反応を利用した研磨の方法などを組み合わせる。図3に平坦化全体の工程の概略を示す。

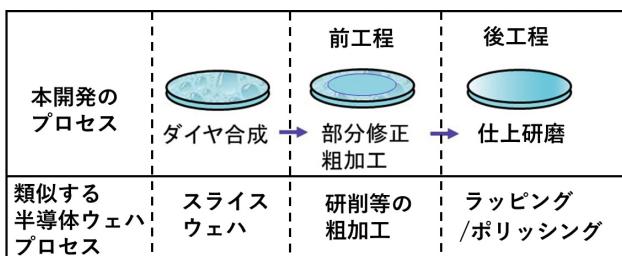


図3 ダイヤモンドウェハ平坦化の工程（概略図）

(1) 前工程（部分修正粗加工）

機械式の研磨による平坦化の前にレーザーによるトリミング加工を実施することで、研磨によるダイヤモンドの加工量（加工深さ）を低減することができる。これにより研磨全体の加工時間の短縮がなされる。加工深さは理想的には表面凹凸の高低差となる。研磨盤の面とウェハの面を正確に合致させることで、高低差分が研磨での加工深さ量ということとなる（図4の下段側面図を参照）。

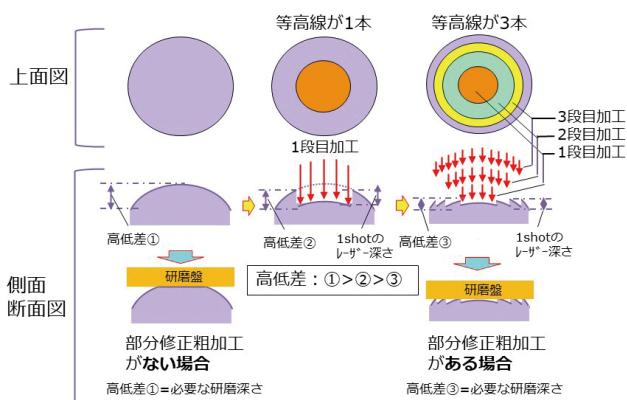
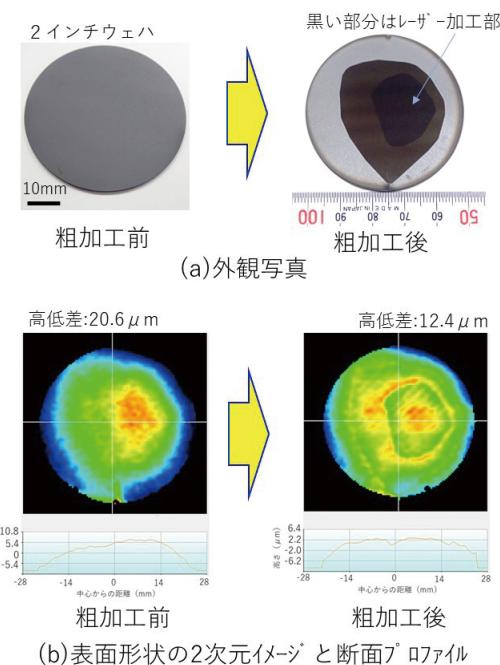


図4 凹凸の部分修正粗加工のイメージ図

レーザーによる加工は、短時間の高エネルギーのパルスレーザーが照射されてダイヤモンド表面を一瞬でアブレーションさせることでダイヤモンドを表面から一定量を削り加工する手段である。パルスのエネルギーや1秒当たりの照射回数やレーザーの走査速度を変更することで、ダイヤモンドの表面から削り取る量が変更でき、加工速度が制御できる。レーザーはガルバノミラーで照射位置を制御できるので、2次元の凹凸情報があれば、凸部分のみに照射することでレーザー加工前の高低差よりも小さな高低差を実現できる。レーザーの前述の条件を調整すれば、1回の走査で数μm～30μmの加工ができる、複数回実施すれば加工深さもそれに比例して複数倍可能であることも確認できた。

より滑らかに高低差をなくしてゆくためには、表面の凹凸情報からより少ない段差毎の等高線を作製して、その段差のピラミッド形状に見立てて、等高線の内部をその段数のエリアを段数の回数分だけレーザー加工することにより平坦化してゆくことができる（図4参照）。高低差が小さいと後工程の研磨はより短時間で完了する。

実際に2インチセラミックウェハ基板上にダイヤモンドを合成し、その表面形状を神津精機製のDyvoce (DY-3001YM) で測定すると、図5 (b) の左図のようになり、20.6μmの表面高低差（2乗平均面を基準）が測定できた。その表面凹凸の高さの情報をもとに上部から5μmの段差となるように等高線を作成し、等高線の内部のエリアを2段に分けてレーザーでトリミング加工を行った結果を図5 (b) 右図に示す。レーザー加工後は12.4μmの表面高低差になったことがわかった。その実際のトリミング加工前後の写真を図5 (a) に示す。レーザーの1段の加工が5μmであれば設計通りであるが、若干小さかったようである。しかし、ほぼ想定通りの高低差の低減と分布ができていることがわかった。このトリミング加工はほぼ10分程度で完了する。

図5 ダイヤモンドの部分修正粗加工の実例
粗加工前後の(a)外観写真と(b)表面形状

(2) 後工程（仕上研磨）

仕上研磨は、平坦な研磨盤とウェハを擦り合わせて研磨する方法であり、物理的な研磨と化学反応的な研磨が利用できる。物理的な研磨はダイヤモンド砥石が埋め込まれた研磨盤を利用し、化学反応的な研磨は錆鉄やガラスを用い

る。いずれも研磨速度が遅いので、できるだけ前工程で高低差を小さくしておくことが重要である。前工程の粗加工が研磨時間の短縮に有効であることは、高低差と研磨時間の関係の図6に示すグラフを見れば明らかである。横軸が研磨時間に対して、縦軸が研磨された面積を全体の面積に対する百分率で示している、高低差が15μm以下の場合、研磨時間は高低差100μmの場合の1/6程度で完了することがわかる。

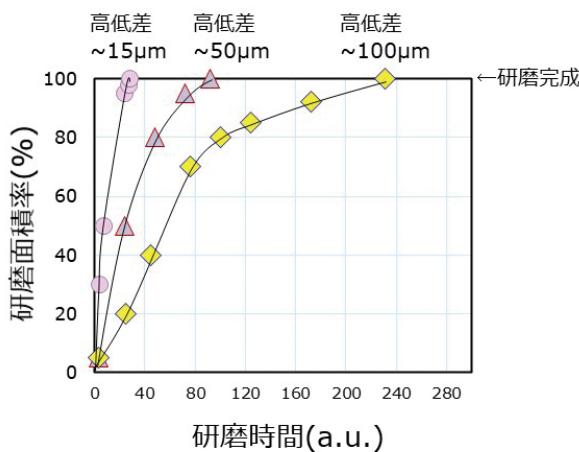


図6 研磨時間と研磨面積率の関係

実際に研磨されて完成した2種類のダイヤモンドウェハの外観写真を写真1に示す。今回のウェハは、写真1(a)の自立ウェハは図1の②に対応する構造のもので、写真1(b)の積層ウェハは図1の⑤に対応するものである。写真には蛍光灯が写り込んでおり、鏡面に研磨されている様子がわかるように示した。

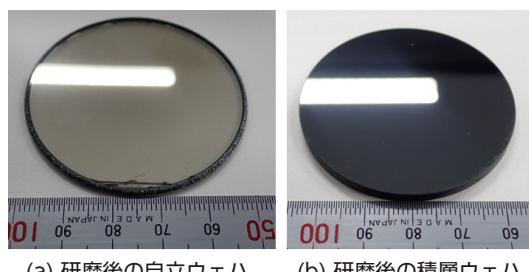


写真1 2種類の2インチダイヤモンドウェハ

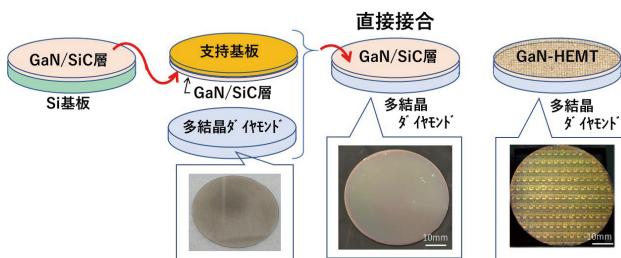
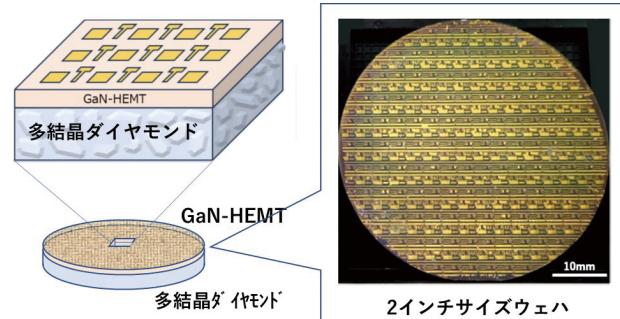
4. 多結晶ダイヤモンドウェハの評価

作製した大口径2インチ多結晶ダイヤモンドウェハを高周波デバイス用として利用できるかどうかの評価を行った。

まずは、ボンディングファーストプロセスに沿った次の点を確認した。(1) GaN半導体層がダイヤモンドウェハと直接接合ができるかどうか、(2) GaN-HEMT構造をウェハ全体に作製することができるかどうか、(3) GaN-HEMTデバイスの放熱特性がダイヤモンドによって向上しているかどうか、という点である。以下に説明する。

4-1 GaN-HEMTの試作

2インチ多結晶ダイヤモンドウェハ上にGaN-HEMTを作製する工程は、図7に示す通り、まずGaN半導体層を直接接合技術により接着剤やはんだ材料なしで貼り合わせ、その後トランジスタのソース・ドレイン・ゲートの各電極を蒸着およびフォトリソ工程を経てデバイスとした。図7には実際のウェハ全体の写真も示している。デバイスと断面の構造を拡大すると図8の概略図の通りとなっている。GaN半導体層の接合状態は目視で観察してウェハ全体に渡って特に問題はなく、デバイスの作製状態も顕微鏡観察によりウェハ全体で作製できていることが確認できた。

図7 GaN-HEMT構造の作製プロセスと各プロセスでのウェハの写真⁽⁷⁾図8 ダイヤウェハ上のデバイス構造の概略図⁽⁸⁾

4-2 GaN-HEMTの放熱評価

ダイヤモンドウェハ上のGaN半導体デバイスの接合状態は、表面からの観察では問題がないように見えるが、実際の接合状態は放熱が十分に機能するかどうかによって確認する必要がある。ウェハ内の個々のデバイスに通電し、その温度を評価することによって、デバイス下部の接合状

態が良好かウェハ上でムラはないかなどが定量的に評価できる。

図9 (a) には、GaN HEMT の構造とデバイス動作時の発熱部分の概略図を示している。図9 (b) に、種々の基板上に作製されたGaN HEMTにおいてデバイス動作時に温度がどれくらい上昇するか、印加電力を横軸にとって示している。熱伝導率がSi、SiC、Diamondの順に大きくなるが、これに対応するように温度上昇が抑制されており、放熱特性がDiamondで一番良好であることが確認される。

また、2インチ多結晶ダイヤモンドウェハ及びシリコンウェハ上に作製された2端子デバイスにおける温度上昇がウェハ全体でどのようになるかを調べた結果を図10に示す。横軸はデバイスのウェハ上での番号であり、ウェハ全体に渡って分布している。縦軸はそれぞれのデバイスの温度上昇の値である。図9 (b) と同様にDiamond上デバイスはSi上デバイスと比較して良好な放熱特性を示した。同一電力に対するウェハ面内の温度上昇はほぼ均一（ばらつき～数%）となった。デバイスの形状の精度やダイヤモンドの品質の精度なども加味すると、接合状態としてはかなり均質で良好と判断される^{(8), (10)}。

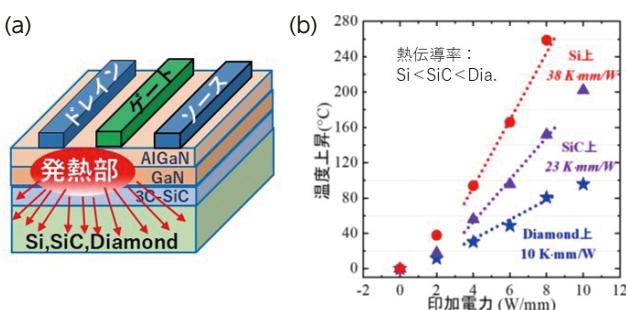


図9 (a) トランジスタ構造と発熱部、および
(b) 種々の基板上のデバイス動作時の温度上昇⁽⁹⁾
(放熱特性: Si 上 < SiC 上 < Diamond 上)

5. 結 言

1000W/mK以上という高熱伝導率を有する2インチサイズの大口径ダイヤモンドウェハを作製することができた。またそのための作製技術の主要な研磨工程を前工程と後工程に分けて、前工程をレーザーによるトリミング加工を平坦化の粗加工として採用した。この新しい工程は、2インチサイズでは微力な効果のように感じるかもしれないが、次のステップの4インチサイズ以上の大口径サイズになると、さらに大きな効果を発揮すると確信しており、4インチウェハに向けた作製工程を確立できた。

さらに、今回の大口径2インチ多結晶ウェハが本目的である、高周波デバイス用のGaN半導体と直接接合させることにも成功した。その接合が目視や顕微鏡による接合の確認にとどまらず、放熱に有効な物理的に密着したものであ

ることをデバイスの試作と動作中の上昇温度で確認することができた。今回の結果は、これまで10mm角程度の研究での実証であったところを、大口径に適用できたことを意味し、量産化の製造プロセスにつながる成果である。

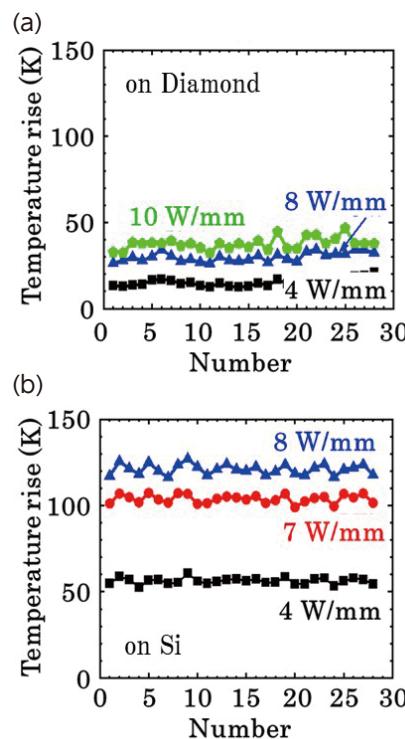


図10 ウェハ上の各点のデバイスの温度上昇⁽¹⁰⁾
(a) Diamond 上 および (b) Si 上

今後は、4インチサイズのダイヤモンドウェハならびにGaN-on-ダイヤモンドウェハへの進展と、本構造のウェハが現在使用されている半導体プロセスの製造設備を通すことができるような仕様とすることと、およびチップ化するまでの工程を低コストで実現することが必要であり、課題もまだ少なからず有している。一つ一つ対策を講じてゆくとともに、本技術が高周波デバイス応用だけでなく、半導体デバイスの放熱問題を解決する一つの手段として広く応用されることを期待している。

6. 謝 辞

本研究開発の実施にあたり、JST 研究成果展開事業研究成果最適展開支援プログラム (A-STEP) 産学共同 JPMJTR222B の支援を受けました。

用語集**※1 直接接合**

はんだ等接着材料を使わずに基板材料どうしを直接接合する方法であり、接合する双方の基板表面に清浄で活性化が高い状態を形成し、双方の面を密着するだけで原子間で結合し接合する技術である。

※2 GaN半導体層

窒化ガリウムというワイドバンドギャップの化合物半導体の薄膜の層である。青色LEDや高周波トランジスタに応用されている半導体である。

※3 HEMT

High Electron Mobility Transistorのことと、半導体層にそれよりも大きなエネルギーギャップを持つ半導体をエピタキシャル成長し、接合界面に電子の高い易動度の量子準位を実現したトランジスタである。化合物半導体でよく使われるトランジスタ構造を指す。

※4 TABツール

液晶ディスプレイへのICの実装技術として広く用いられているパッケージ技術の一つで、電極と配線を結ぶためのはんだ付けをする工具を指す。

※5 CMP

Chemical Mechanical Polishのことと、半導体ウェハの最終仕上げとして鏡面に研磨すること。

参考文献

- (1) 吉嗣晃治、松田薫、柳生栄治、「高熱伝導率ダイヤモンド基板を用いたGaNデバイスの熱解析」、三菱電機技法、Vol.93、No.3 (2019)
- (2) R. Kagawa, K. Kawamura, Y. Sakaida, S. Ouchi, H. Uratani, Y. Shimizu, Y. Ohno, Y. Nagai, N. Shigekawa, and J. Liang, "Fabrication of GaN/SiC/diamond structure for efficient thermal management of power device," in Abstracts of 2021 7th International Workshop on Low Temperature Bonding for 3D Integration (LTB-3D), Online, Oct. 5-11, 2021. DOI: 10.1109/LTB-3D53950.2021.9598453
- (3) R. Kagawa, K. Kawamura, Y. Sakaida, S. Ouchi, H. Uratani, Y. Shimizu, Y. Ohno, Y. Nagai, J. Liang, and N. Shigekawa, "AlGaN/GaN/3C-SiC on diamond HEMTs with thick nitride layers prepared by bonding-first process," Appl. Phys. Express 15, 041003 (2022). DOI: 10.35848/1882-0786/ac5ba7
- (4) 藤森直治、「気相合成ダイヤモンドの製品展開」、NEW DIAMOND誌、第38号、Vol.11、No.3、p39 (1995)
- (5) 鹿田真一、中幡英章、藤井知、桧垣賢次郎、八郷昭広、北林弘之、関裕一郎、田辺敬一郎、藤森直治、「ダイヤモンドSAWデバイス(1)」、NEW DIAMOND誌、第53号、Vol.15、No.2、p28 (1999)
- (6) 鹿田真一、中幡英章、藤井知、桧垣賢次郎、八郷昭広、北林弘之、関裕一郎、田辺敬一郎、藤森直治、「ダイヤモンドSAWデバイス(2)」、NEW DIAMOND誌、第54号、Vol.15、No.3、p19 (1999)
- (7) 森山千春、酒井田佳紀、浦谷泰基、西林良樹、竹内茉莉花、重川直輝、梁劍波、「2インチ多結晶ダイヤモンド上GaN HEMT」、第72回応用物理学会春季学術講演会予稿集17p-K301-14 (2025)
- (8) Y. Sunamoto, C. Moriyama, Y. Nishibayashi, M. Takeuchi, N. Shigekawa, and J. Liang, "Characteristics of GaN HEMTs on 2-inch polycrystalline diamond substrates fabricated using the surface-activated bonding technologies," 15th International Conference on Nitride Semiconductors (ICNS-15) (LN-A-1), Malmö, Sweden (July 6-11, 2025)
- (9) R. Kagawa, Z. Cheng, K. Kawamura, Y. Ohno, C. Moriyama, Y. Sakaida, S. Ouchi, H. Uratani, K. Inoue, Y. Nagai, N. Shigekawa, and J. Liang, "High Thermal Stability and Low Thermal Resistance of Large Area GaN/3C-SiC/Diamond Junctions for Practical Device Processes," Small 2305574 (2023).DOI:10.1002/small.202305574
- (10) C. Moriyama, Z. Cheng, Z. Huang, Y. Ohno, K. Inoue, Y. Nagai, N. Shigekawa, and J. Liang, "Direct Integration of Polycrystalline Diamond With 3C-SiC for Enhanced Thermal Management in GaN HEMTs: Impact of Grain Structure and Interface Engineering," Adv. Mater. Technol., e00437 (2025). DOI:10.1002/admt.202500437

執筆者

西林 良樹*：アドバンストマテリアル研究所
工学博士



小林 豊：アドバンストマテリアル研究所 部長



重川 直輝：大阪公立大学 教授



梁 剣波：大阪公立大学 准教授



* 主執筆者