

ダイヤモンドパワーデバイスの優位性実証研究開発

— 究極のパワーデバイスを目指して —

鹿田 真一*、梅沢 仁

省エネルギーのカギとなるパワー半導体分野で、群を抜いた材料特性から、SiCを上回る低損失電力変換デバイス用材料として期待されているダイヤモンドの、デバイス応用に向けた先導研究を行った。高い絶縁破壊電界の実証、ドリフト層エピ成長改善によるキラークラック撲滅、高温動作を可能にする超耐熱ショットキー電極開発、電界緩和構造¹⁾や高電流素子の実現等の一連の開発である。その結果、250℃で30万時間以上動作可能な耐熱ショットキーバリアダイオードを開発し、高速スイッチング特性を確認し、ダイヤモンドのパワーデバイス用材料としての可能性を実証することができた。冷却フリーという新しいコンセプトの低損失デバイス実現に向けた、大型ウェハと大電力デバイスの研究が急がれる。

キーワード: ダイヤモンド、パワーデバイス、耐熱、低損失、ショットキーダイオード

Development of diamond-based power devices

– Verification of its superiority as the ultimate power device –

Shinichi SHIKATA* and Hitoshi UMEZAWA

Diamond is expected to be an excellent material exceeding SiC for producing low power loss electronic devices because of its superior material characteristics. We have developed series of elemental technologies including killer-defect free epitaxial growth, refractory Schottky contact, Schottky barrier height control associated with low leakage current and termination structure. As a result, we have developed a refractory Schottky barrier diode with fast switching capability, which can operate for over 300,000 hours at 250℃. R&D of large scale wafers and large power devices are required to realize low-loss devices with a new concept of “cooling free.”

Keywords: Diamond, power switching device, refractory, low loss, Schottky diode

1 研究の目的とアウトカム

ダイヤモンドは、熱伝導率、絶縁破壊電界等物質中で最高の性能を多数有し、“超物質”とも言える材料である。多くの応用が検討されているが、ワイドギャップ半導体材料としてもよく知られている。パワー半導体デバイスにおいても、SiCを上回る低損失電力変換デバイスとして期待されている^{1)~4)}。これに関連する材料パラメータを図1に示す。熱伝導率はSiより一桁高く、通常用いるヒートスプレッド材料のAlN、Cu、Al等をはるかに凌駕し、デバイスの熱設計を抜本的に変えることが容易に類推できる。絶縁破壊電界も他の材料に比べ一桁高く、薄膜での高耐圧確保が可能である。ホールの移動度も高く、高速動作、高出力動作に優位である。さらに200~250℃の自己発熱温度でキャリア増により高温で出力低下がないことにより、冷却ユニットのない新しいコンセプトの革新的デバイスモジュールの実現が考えられる。図2にショットキーダイオードのオ

ン抵抗と耐電圧の関連を、室温と250℃の二つで示した。SiCの特性は室温での最適構造に温度上昇によるドリフト層⁵⁾抵抗の上昇効果をあてはめた⁵⁾。ダイヤモンドでは温度上昇によるキャリア増が、散乱による移動度低下を補

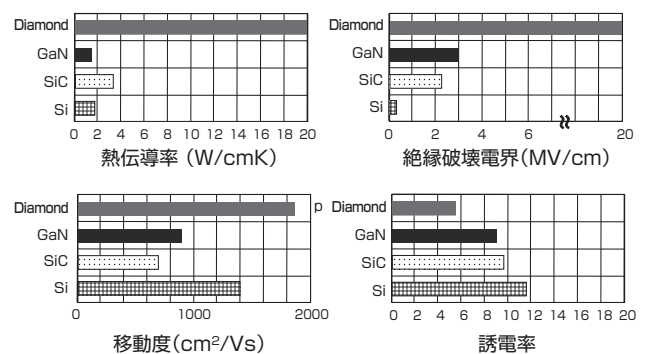


図1 パワーデバイスに影響する諸材料パラメータの比較 (移動度は、ダイヤモンドのみp型の記載)

産業技術総合研究所 ダイヤモンド研究ラボ 〒305-8568 つくば市梅園 1-1-1 中央第2
 Diamond Research Laboratory, AIST Tsukuba Central 2, 1-1-1 Umezono, Tsukuba 305-8568, Japan * E-mail: s-shikata@aist.go.jp
 (現所属: ユビキタスエネルギー研究部門 〒563-8577 池田市緑丘 1-8-31; current affiliation: Research Institute for Ubiquitous Energy Devices, AIST 1-8-31 Midorigaoka, Ikeda 563-8577, Japan)

Original manuscript received August 28, 2012, Revisions received January 16, 2013, Accepted February 7, 2013

償し、200℃くらいまでは電流が上昇して低オン抵抗となり、その後250℃くらいまで一定となる。したがって、ダイヤモンドの場合、自己発熱で高温になったデバイスを“わざわざ冷却”しなければ低損失、かつ高電流、高耐圧、超小型が実現可能である^[6]。応用としては、電気自動車、電車、船舶等の輸送機器、産業用機器、送受配電等が考えられる。SiCと比較しても234万トン/年（2040年）、493万トン/年（2050年）のCO₂削減効果が期待でき、経済産業省Cool Earth革新技術計画^[23]の中でもパワーエレクトロニクスを支える究極のデバイスの一つとして挙げられている。

ダイヤモンドは炭素のみで構成され、埋蔵量、原料調達といった資源問題がないという大きなメリットがある。メタン、CO₂等安全なガスによる合成が可能であること、また高温まで極めて安定であり、燃えても有害物質を出さず、ナノサイズでも安全である等、安心感の高い材料でもある。

我々は、ダイヤモンドの基盤技術と、種々応用研究を進める中、2005年2月に世界に先駆けてパワーデバイス応用を目的としたウェハとデバイスの研究に着手した。ウェハについては、本誌の3巻4号に開発の過程の一部（あたかもコピーするように単結晶を製造するダイレクトウェハ化技術と12mm角結晶の実現）について報告がなされており^[7]、その後モザイク結晶の実現^[8]により、最近では20×40mm²のサイズ実現に至っている^[9]。この論文ではそれに対応したデバイス側の研究として、ショットキーバリアダイオード(SBD)を例題デバイスとして、ダイヤモンドの優位性を実証するためのフェーズ1の研究開発を実施したことについて報告する。

2 研究シナリオ

ダイヤモンドを次世代パワー半導体デバイスとして実現

させるには、もちろん段階に応じた各々の課題があるが、フェーズ1（優位性実証）の課題としては、他の材料を超える、下記の実証が挙げられる。

- 1) 高耐圧（他材料を超える物性の実証）
- 2) 高電流（密度）動作（高出力を高温で同時実現することの実証）
- 3) 高温動作（新概念を可能にする特性の実証）
- 4) 高速動作実証

このうち1)と3)は、比較的容易にプロセスが可能な擬似(図の説明との整合上)縦型デバイスで実証でき、2)4)は実用を可能にする縦型構造^{用語3}デバイスが必要である。

以上をシンセシオロジーにおける構成学的見地から、図3に構成としてまとめてみた。これらは構成方法の基本型とされたアウフヘーベン型にブレイクスルーを併せたような型であり^[10]、要素技術の積み重ねと、それを可能にするブレイクスルーが必要、というようにまとめることができる。なお図3に記載の擬似縦型と縦型デバイス構造に関して、図4に図示補足した。さて、この構成図中でも、デバイス動作層の低欠陥エピタキシャル成長（フェーズ1ではキラ欠陥撲滅）、高温動作のための耐熱性ショットキー形成については、ハードルの高い課題と考えられた。図5に示すように、ダイヤモンドのエピタキシャル膜には異常成長した欠陥が存在する。この例では成長丘（ヒロック）上に欠陥が穴状に見え、デバイス動作に致命的ないわゆる「キラ欠陥」となる。これは実際ダイオードを作成して特性評価すると、通常のダイオード特性に、オーミックの貫通電流が重畳したような特性が得られることから判断できた。デバイスの歩留と面積の関係を調べることにより、図6に示したようにこの欠陥はデバイス歩留に直接影響することが定量的に明らかになった。このエピ膜の例では欠陥密度は10⁵個/cm²にもなることが分かる。

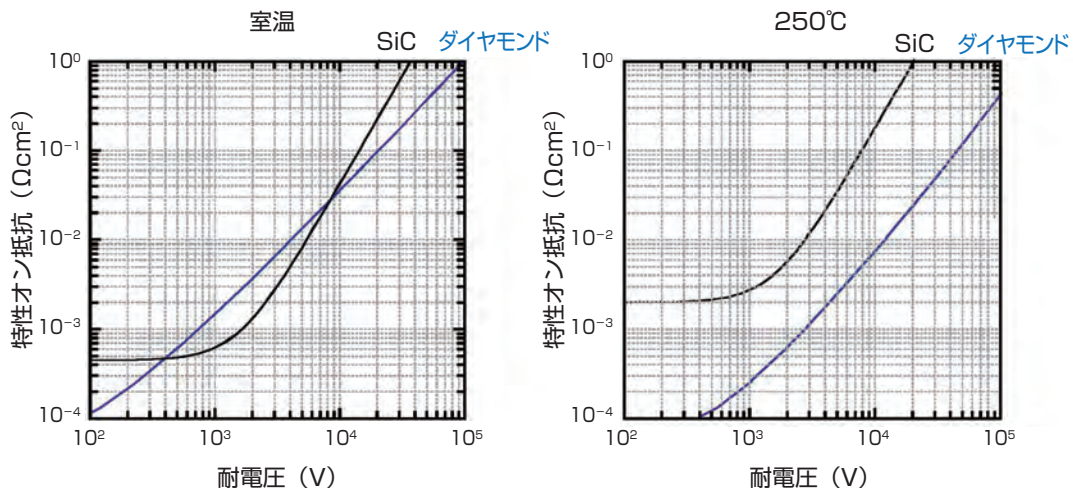


図2 室温と250℃におけるオン抵抗と耐電圧の関係性の比較

3 要素技術の開発例

この論文では、デバイスの要素技術課題に関して、ブレークスルーとなった項目について概説する。

1) キラー欠陥撲滅

まずは、デバイスの活性層となるドリフト層の低欠陥エピタキシャル膜成長についてであるが、通常の半導体材料のエピ成長では、ステップフロー成長により、低欠陥を目指すのが常道になっていることは、周知の事実である。ダイヤモンドは結合エネルギーがSiCの3倍強もあり任意研磨が難しく、結晶表面に再現性のあるステップを作るのは困難であり、実験もままならないという状況であった。このためまず最初に、ダイヤモンド結晶を任意方向に、かつ平坦面を得てステップを形成する研磨技術開発を行った。これまでの研磨技術では全く対応不可能なことが明白になった時点で、我々は徹底的にさかのぼることを決め、研磨装置の設計・製作から実施することにした。下記の2点が開発したポイントである。

- ① 研磨ヘッドにX線ラウエ用ゴニオメーターを搭載し、X線回折でオフ角・オフ方向を計測し、そのまま任意方向に研磨可能なようにした。
- ② 高剛性アームに加重調整用のおもりを設置し、研磨盤は低振動構造に設計した。

研磨機と共に研磨板、研磨プロセスの開発により、さまざまなオフ角・オフ方向の基板を、しかも超平坦加工（算術平均粗さRa < 1 nm）してステップ形成することが実現できた。これを元に、エピ層成長の検討を行った。エピ層は通常用いられる2.45 GHzのマイクロ波CVDにより、CH₄とH₂系ガスに、Bドーパントガスとしてトリメチルボロンを用いて行った。詳細は省略するが、低密度プラズマによるマイクロ波CVD成長では、オフ角・オフ方向を変えても異常粒子欠陥は減少せず、うまくステップフローしないことと、プラズマ密度によって多少の差が存在することが分かった。そこでプラズマの高パワー導入可能なCVD装置に設備改造を行った。マイクロ波を0.75 kWから4 kWに高パワー化し、オフ方向の依存性を検討した。

この結果、方位が〈110〉と〈100〉の間では巨大な成長丘（ヒロック）が発生しやすかった。〈110〉方位と〈100〉方位では、この成長丘がなく、かつ異常粒子もなく、極めて平坦な表面が、2度以上であればオフ角にあまり依存せず、得られることが分かった^[4]。特に〈110〉方位については、表面の炭素原子がダイヤモンド列を作るためステップフロー成長しやすくなることは容易に推定できる。エピ成長でできる欠陥とのオフ角依存性を図7に示す。プラズマ密度を変えた場合の状

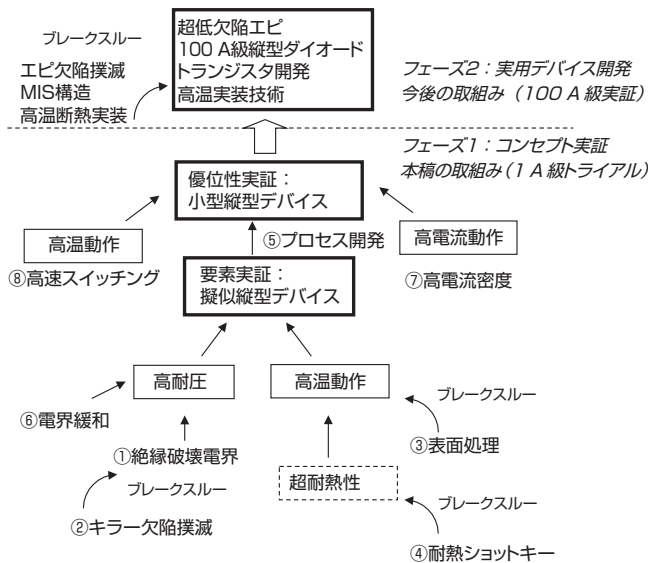


図3 ダイヤモンドパワーデバイスの優位性実証開発における構成学的ツリー図（記載の数字は実施の順）

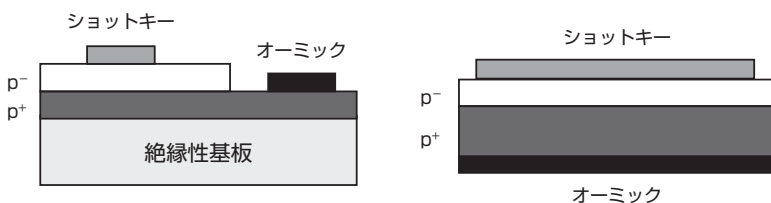
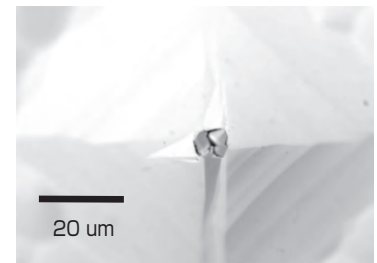


図4 デバイス構造図
(a) 初期実験に用いた擬似縦型構造
(b) 縦型構造



(キラー欠陥)

図5 ダイヤモンドのエピ層に存在するキラー欠陥

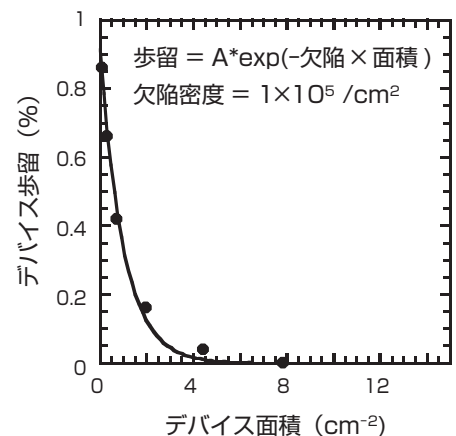


図6 デバイスの欠陥と歩留の関係

況も併せて記す。以上によりキラ欠陥が 10^5 cm^{-2} あったものを、およそゼロにすることに成功した^[11]。このエピ膜の表面を AFM で測定した平坦性 Ra は 1.1 nm であり、原子レベルで平坦な膜であった。ホール効果測定でダイヤモンド中のホールの移動度を測定したところ $1540 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ と高く、高品質膜であることが分かった。またエピ成長の速度は、これまでの低プラズマ密度（750 W）の $0.2 \text{ }\mu\text{m/hr}$ 以下に比べて、今回の（4 kW）時は 5 倍以上で、 $0.8 \sim 3 \text{ }\mu\text{m/hr}$ と高速であった。パワーデバイスにおいては、耐圧を確保するために、動作層となる厚いドリフト層エピを必要とするため、概ね $10 \text{ }\mu\text{m/hr}$ 以上のエピ成長が求められるが、ダイヤモンドの場合は絶縁破壊電界が高く、Si より一桁小さい厚みで済むことから、今回得られたエピ成長速度は、十分に実用に耐える速度と考えられる。

以上述べたように、ウェハを平坦研磨して任意の結晶オフ角・オフ方向にする技術を確認し、ナノステップ制御可能にし、キラ欠陥のないエピ成長を可能にした。デバイスや結晶エピ成長の研究に先立ち、基礎から応用までを一貫して行う本格研究を目指す中で本腰を入れて研磨技術まで遡って一貫した技術として開発できた。

2) 高温動作を可能にするショットキー界面形成

ダイヤモンドのショットキー界面に関して、2005 年当時逆方向リークのマカニズムすら分かっていなかったため、まず基礎研究から開始した。このような段階での検討はプロセスの簡便性を考え、図 3 に記載した擬似縦型構造^[10]3 をもちいて検討した^[12]。ダイヤモンドのショットキーダイオード（SBD）を作成し、逆方向リーク電流の温度依存性解析を実施した。温度上昇と共にリーク電流は上昇し、例えば $23 \text{ }^\circ\text{C}$ においては $10 \text{ }\mu\text{A}/\text{cm}^2$ （@ $2 \text{ MV}/\text{cm}$ ）で、 $120 \text{ }^\circ\text{C}$ においては $10 \text{ mA}/\text{cm}^2$ へと上昇する。これらの値は、同

電界における SiC SBD のリーク電流に対して数桁程度低い電流密度レベルとなっている。このリーク電流を、一般的に Si SBD や GaAs SBD の逆方向リーク電流解析に用いられる電界誘起バリア低下モデルを用いて解析することは難しい。これに対して大電界印加によるトンネル過程を考慮して、TFE モデル^[13]4 を用いることにより、およそ電流電圧特性の傾向は説明可能となることが分かった^{[13][14]}。アバランシェブレイクダウン^[15]5 による電流増幅での動作限界以前に熱電界放出電流によってデバイス動作限界が起るため、バリア高さを高くする必要があることが分かった。もちろんバリア高が高いと動作電圧が高くなるが、今回の高温動作を想定すると問題はない。そこで、ショットキー界面に表面処理を施して、フェルミ準位をピン止め（ピンング）するような局在準位を導入する手法に挑戦した。ダイヤモンド表面のドライ処理を検討する中で、UV/O₃ 処理^[15]により安定に局在準位を導入し、バリア高を高く保つことを見いだした。また $3.1 \text{ MV}/\text{cm}$ に達する耐電界を観測することができた。この局在準位の同定にはいまだ至っていないが、工学的に先行して用いることとした。実際この手法でショットキーダイオードを作成し、SiC^[16]と比較すると、高温でも 3 桁ほど低い逆方向リーク電流と、良好な順方向特性（高温で低くなりすぎない VF（順方向電圧）とキャリア増から来る低オン抵抗）を観測することができた^[17]（図 8）。

3) 耐熱金属

次に述べるのは、耐熱ショットキー電極探索に関するブレイクスルーである。当時すでに耐熱オーミック接合は開発されていて、TiPtAu や TiMoAu 等の TiAu 系で極めて高い耐熱性を有することが知られていた^[18]。難関はショットキー接合であった。耐熱性もさることながら、ショットキー特性、低抵抗、密着性、プロセスの容易さ（ウェハプロセス、ワイヤボンド）等の同時実現ということで、ハードルが高

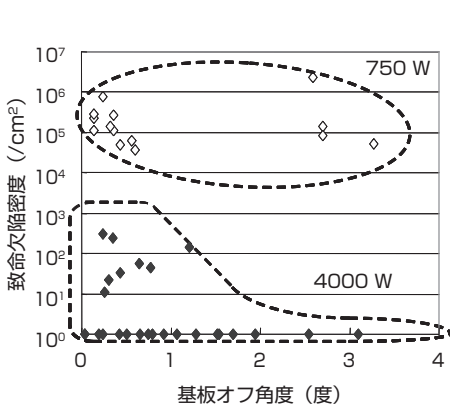
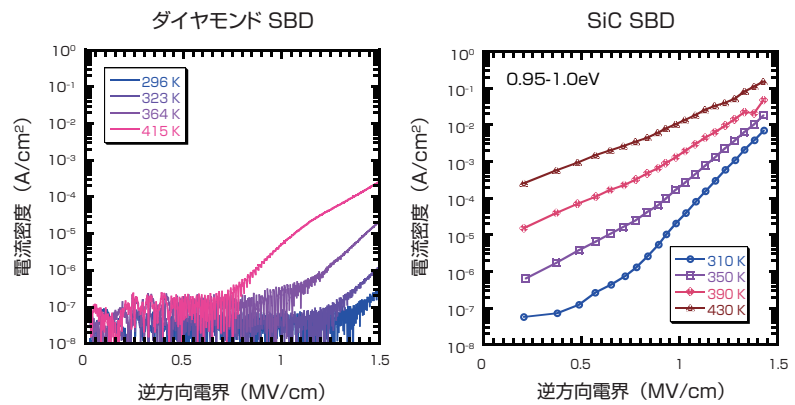


図 7 キラ欠陥と基板オフ角及びプラズマ密度の依存性



(a)ダイヤモンド
（表面処理して高バリア高のデバイス）

(b)SiCの例
（文献 [16] T.Hatakeyama らより引用）

図 8 ショットキー接合の逆方向リーク電流

く、実現性も不確かな研究であった。高温でダイヤモンドと反応しカーバイドを形成する材料とカーバイド非形成の両面から検討したが、最有力な安定カーバイドであるWCは抵抗率が高く、またさほど十分な耐熱性が得られるということではなく^[19]、カーバイド非形成の高融点金属探索に軸足を移した。数多くの金属の検討を行い、その中でMoが諸項目に優れることがわかり、有力候補として開発を進めた。ところが多くのデバイスを用いて高温保存における劣化を検討する中、無欠陥エピ層領域に成膜したショットキー接合では良好特性を示すのに、有欠陥エピ層領域では、逆方向リーク電流がアニール時間と共に増大することが判明した。この様子を図9に示す。エピ層の欠陥部分はsp³結合状態でなくなっており、 γ MoC_{1-x}の形でカーバイド形成する。エピ欠陥部分では、高温保存時間とともに逆方向リーク電流が増加するので、実用に用いることはできないことが分かった。こうした紆余曲折の中、若手ポストドク研究員から、以前の研究で用いていたRuを検討してみたいという提案があり、他部署のスパッタリング装置を借用して検討を行った。結果として、この金属の適用によって、耐熱性からプロセス容易さまで見事に上記5項目全ての特性を同時満足することを見つけ出した。加速劣化試験では欠陥有無に関わらず、図10に示すように400℃で1500時間行っても、変化しないことが分かった^[20]。表面グラファイト化による劣化の活性化エネルギーを1eVと仮定した場合、250℃30万時間以上の超耐熱性を有することが見積もられた。以上のように耐熱ショットキー金属探索は、元の計画的な研究開発からは遠いものではあった。しかし早期段階で高温劣化試験を実施することで、先に問題をつぶすことができ、開発が進んでから大問題発生とならずに済んだ。またRu提案のように「遊び心」でうまく進むことがあ

るのも、研究開発の事実であり、またよく耳にすることでもある。研究開発を進める上では、自由度を確保するのは大変重要なことと思われ、敢えて記載した。

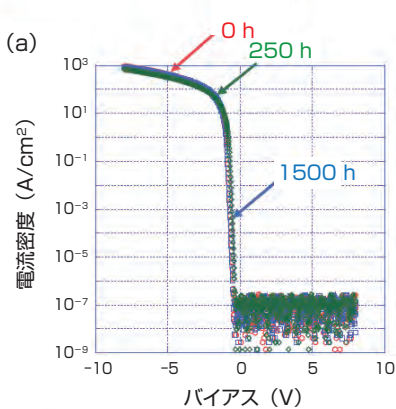
4 実証できた技術構成

以上パワーデバイスを目指したダイヤモンドの研究過程の中から、ブレイクスルーとなった開発について記述した。ダイヤモンドの優位性の実証として、図3の位置付けで、擬似縦型構造を用いて諸特性の実証を行い、プロセス・デバイス・実装技術等の開発後、縦型構造を用いた動作特性を検討し、トータルで下記のダイヤモンドの優位性を実証できた。紙面の都合で詳細は省略するが、内容としては下記のような項目に分類することができる。

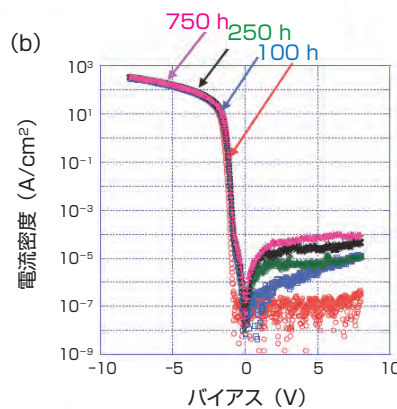
- ① 絶縁破壊電界：ショットキー接合でSiCを凌駕する3.5 MV/cmを実証^[21]
- ② ドリフト層エピ成長改善によるキラ欠陥撲滅（本稿紹介）
- ③ 表面処理技術と高φ_Bによる低リーク電流実現（本稿紹介）
- ④ 超耐熱ショットキー接合実現（本稿紹介）
- ⑤ 縦型デバイスプロセス開発^[22]
- ⑥ 電界緩和構造開発^{[23]-[25]}
- ⑦ 高温高電流密度の実証（擬似縦型の小サイズデバイスで5 KA/cm²@250℃）^[26]

また、上記以外に追加的実験として、動作時のデバイスの温度マッピングにより、ダイヤモンドはホットスポットができないことを観察するなど、ダイヤモンドならではの特性観察も実施している^[27]。

以上により、250℃高温動作かつ高電流密度を同時に達成可能なダイヤモンドダイオードを開発し、高温で低損失、高耐圧と合わせて、冷却フリーのパワーデバイスの可能性を示した。これは自己発熱でせつかく高温になっているデバイ

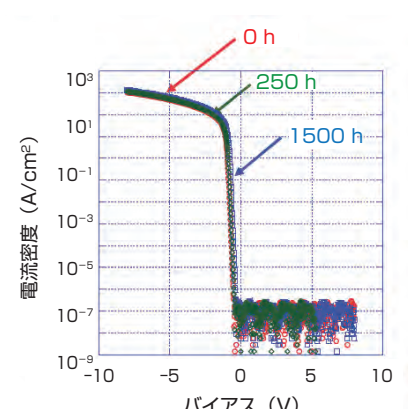


(a) エピ欠陥のない部分
400℃1500時間で、特性変化なし



(b) エピ欠陥のある部分
逆方向リーク電流増加

図9 Moショットキー接合の高温保存時の特性
(文献[20] K.Ikedaらより引用)



(a) 400℃1500時間保存

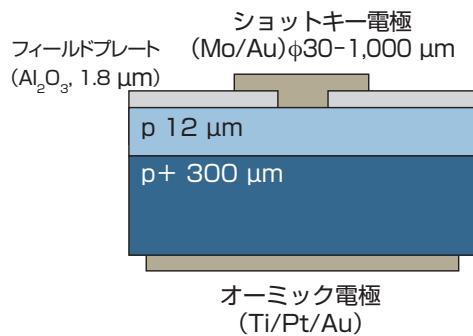
図10 Ruショットキー接合の高温保存時の特性
(文献[20] K.Ikedaらより引用)

スを、大きな冷却モジュールでわざわざエネルギーを費やして冷却せずとも、そのまま活かそうという発想である。

電界緩和構造として Al_2O_3 絶縁膜をフィールドプレートに採用した、縦型構造ダイオードを試作した。図 11 (a) に示すように Al_2O_3 をショットキー電極周囲に設置した構造である。初めてアンペア級のデバイスを試作できた結果を同図 (b) に示す^[28]。

高速動作特性については、大阪大学大学院工学研究科の舟木教授と共同研究を行い、ダイヤモンドダイオードのスイッチング特性を、Si MOSFET を用いて駆動回路を構成し、ダブルパルス法を用いてダイヤモンドショットキーダイオードの回復特性を計測した。このスイッチング特性を図 12 に掲載する^{[29][30]}。これは図 3 の構成学的ツリーの⑧として記載の内容である。

⑧の高速スイッチングについては、初試作の小型縦型ダイオードで、 $0.01 \mu\text{sec}$ の高速スイッチングと 40 A/cm^2 の小さな逆回復電流（低損失）を $225 \text{ }^\circ\text{C}$ の高速動作において確認し、さらに 1 A 級のデバイスで $250 \text{ }^\circ\text{C}$ 動作も達成している^{[28][31]}。

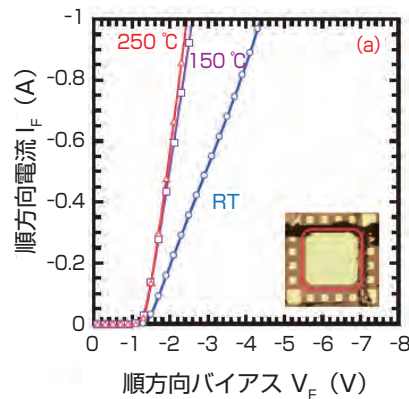


(a) フィールドプレートを電界緩和層とした縦型デバイス構造模式図

ダイヤモンドダイオードが高温で高速、低損失で動作することを、小型縦型デバイスとは言え、実際に用いる構造で実証したことで、この研究のフェーズ 1（優位性実証）ステージをクリアしたといえよう。

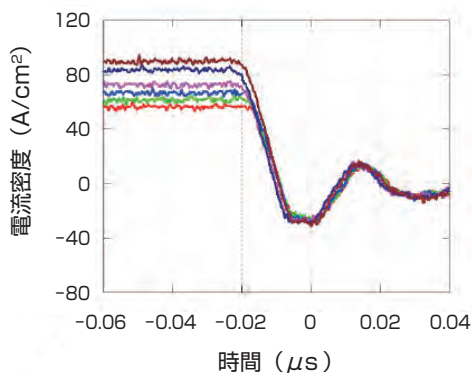
5 将来展開とロードマップ

まずは一にも二にも、低欠陥のエピ膜成長が課題である。キラ欠陥は撲滅できたものの、デバイスサイズを大きくすると著しくリーク電流が増大することが分かっており^{[32]-[34]}、欠陥を減らすことが最重要課題である。現在、欠陥の種類別、デバイス特性への影響、その低減等への取り組みを開始したところである。こういった観点での研究はこれまでダイヤモンドでは実施されておらず、一旦、基礎研究に戻る必要が出てくる。現状、X線トポグラフィをはじめとする解析より、主な欠陥種類として、刃状転位と混合転位の存在と、大まかな欠陥密度等が見えてきつつあり^{[35][36]}、デバイスへ各々どのような影響を及ぼすか詳細な検討が急がれる。実用縦型構造デバイスの実現と、実用可能な数

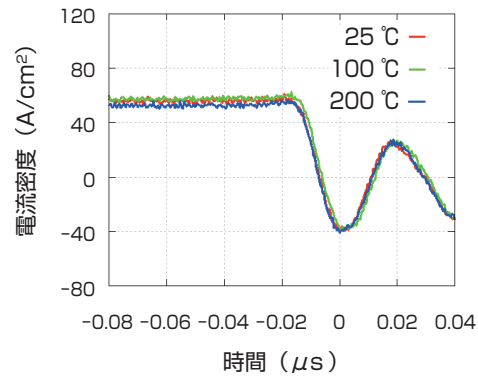


(b) ダイオードの順方向特性例

図 11 電界緩和構造を有するアンペア級ダイヤモンドショットキーダイオード（文献 [28] H.Umezawa ら より引用）



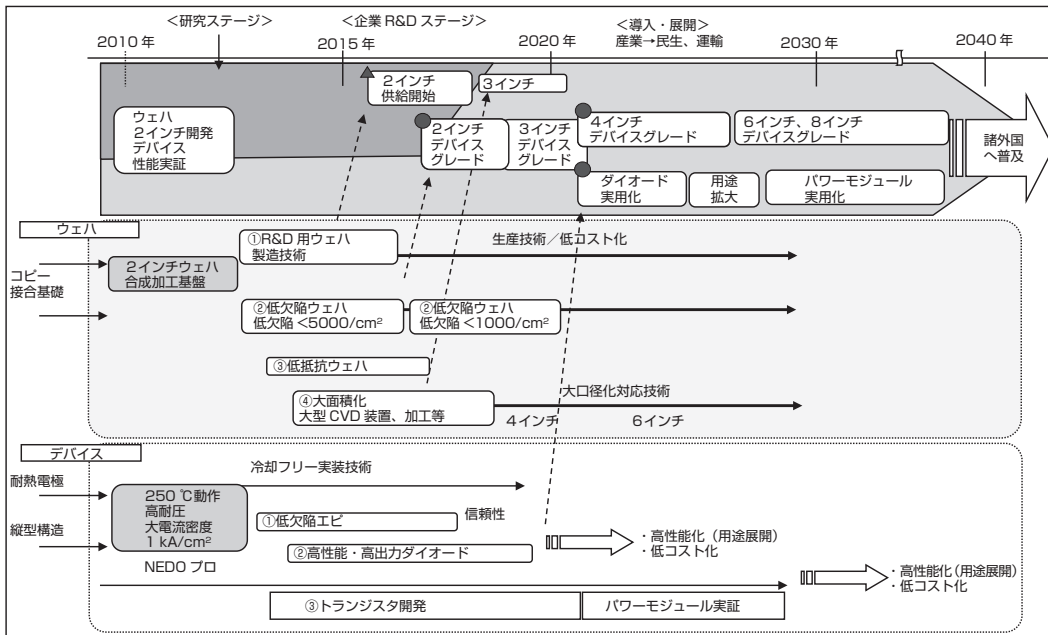
(a) 様々な電流レベルでの比較
（同一の高速回復特性を示す）



(b) 様々な温度での比較
（同一の回復特性を示す）

図 12 ダイヤモンドショットキーダイオードの回復特性（文献 [29] K.Kodama ら より引用）

表1 ダイアモンドパワーデバイス及びウェハロードマップ



A ~ 100 A のデバイス実証を目指す。

トランジスタについては、これまで横型デバイス構造で高速・高周波デバイスを目指した研究が盛んに行われてきた^{[37]-[39]}。ただ、パワーデバイスでは高耐圧、高出力可能な縦型デバイスが必須であり、過去の知見をベースに、この研究を急ぐ必要がある。さらにまたデバイスの実装等高温動作で冷却フリー動作を実現する技術も含めて、優位性を定量的に探る計画である。

経済産業省の技術戦略マップをベースに産学で調査する中で作成したウェハおよびデバイスのロードマップを表1に示す。ウェハについては企業と共同で、2インチウェハの試供体制を構築し、企業、大学等におけるデバイス研究促進に貢献する。併せて、低抵抗ウェハ、低欠陥ウェハ等実用ウェハの開発を行う。デバイスに関しては、今回のショットキーダイオードの実用化を目指した低欠陥エビ成長等の研究を行い、高出力・高性能ダイオードの実用化を促進する。

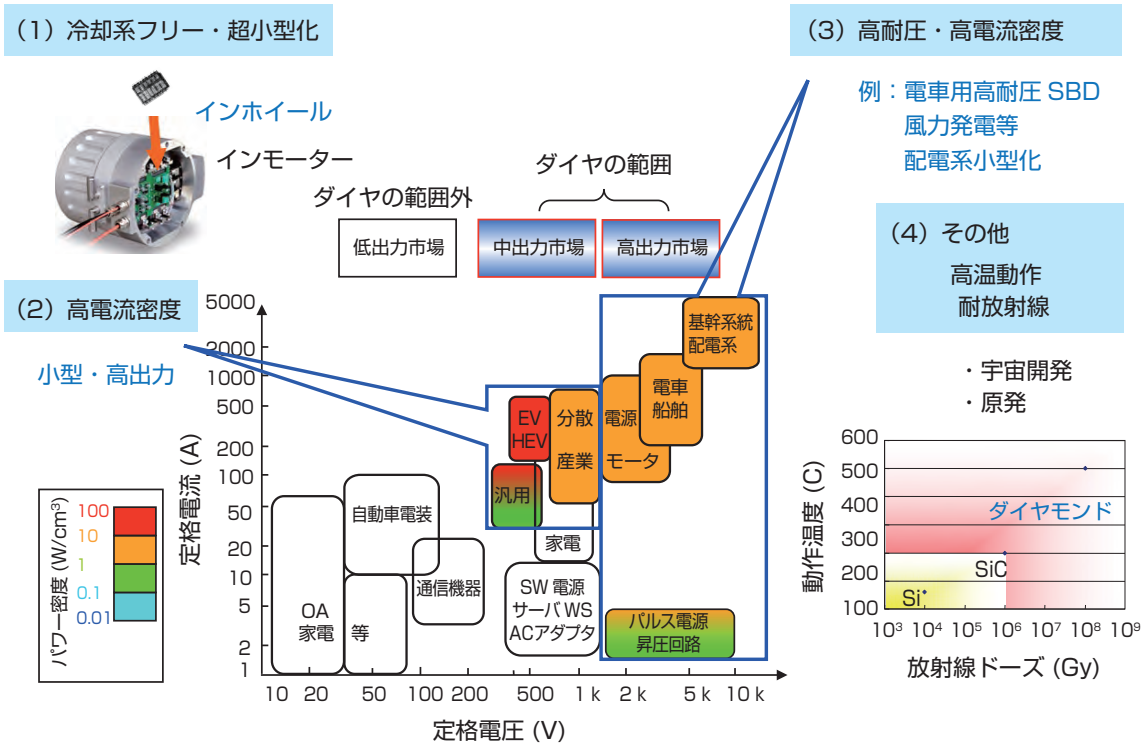


図13 ダイアモンドパワーデバイス応用展望の図

同時に多くの大学等と共に、MIS (MOS) 型や接合型のトランジスタの研究を進める。応用として、企業ヒアリング等により図 13 に示すような応用展望を念頭において開発する予定である。

長期間に及ぶ本格研究を開始したところであるが、資源、安全等で日本の国益に沿う 21 世紀の主材料、デバイスとなるよう、また早く温暖化問題の解決に役に立てるよう、開発を急ぎたいと考える。

謝辞

当時の研究員吉川博道氏（現トーメイダイヤ）、産総研特別研究員の池田和寛氏（現住友電工）、R. Kumaresan 氏（現神戸大学）、A. M. M. Omer 氏（現住友化学）、辰巳夏生氏（住友電工より出向）、研究員永瀬正範氏（現ナノシステム研究部門）および現在ダイヤモンド研究ラボ在籍の主任研究員渡邊幸志氏、研究員加藤有香子氏、ウェハ開発メンバー（副ラボ長茶谷原昭義氏、主任研究員空野由明氏、主任研究員坪内信輝氏、主任研究員山田英明氏）に深謝致します。またスイッチング特性で共同研究を実施している大阪大学舟木教授に深謝致します。

この研究の一部は、（独）新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）省エネルギー革新技术開発事業による助成のもとに行われた。

注) http://www.enecho.meti.go.jp/policy/coolearth_energy/coolearth-hontai.pdf

用語の説明

用語1: 電界緩和構造: 耐圧を確保するためにデバイス構造を工夫して、電界集中を分散させて回避する。フィールドプレートや接合終端構造などがよく知られている。

用語2: ドリフト層: パワーデバイスとして動作する活性層を指す。

用語3: 縦型構造と疑似縦型構造: パワーデバイスは大電流を流すため、LSiや高周波デバイスで用いられる横型構造のデバイスではなく、縦型に電流経路を有する構造を用いて、面積全面を使って電流を流す。疑似縦型は、絶縁基板を用いた実験用デバイスで、活性層の部分のみ縦型で、電流取り出しは上面から行う。図3参照。

用語4: TFEモデル (Thermionic Field Emission Model): ショットキー接合障壁でのキャリア伝導のモデルとして3タイプある内の一つで、熱電子と電界放出の両効果が関連するモデル。

用語5: アバランシェブレイクダウン: 自由電子が電界で加速され、衝突電離を繰返し発生させ、雪崩 (アバランシェ) のように大電流が流れ破壊に至る現象。

参考文献

- [1] B.J. Baliga: Semiconductors for high-voltage, vertical channel field-effect transistors, *J. Appl. Phys.*, 53, 1759 (1982).
- [2] 大橋弘通: パワーデバイスの現状と将来展望, *FEDジャーナル*, 11 (2), 3-7 (2000).
- [3] W. Saito, I. Omura, T. Ogura and H. Ohashi: Theoretical limit estimation of lateral wide band-gap semiconductor power-switching device, *Solid-State Electron.*, 48, 1555-1562 (2004).
- [4] A.Q. Huang: New unipolar switching power device figures of merit, *IEEE Electron. Device Lett.*, 25 (5), 298-301 (2004).
- [5] 荒井和雄, 吉田貞史: 第5章 デバイス設計・評価, *SiC素子の基礎と応用*, オーム社 (2003).
- [6] H. Umezawa and S. Shikata: Diamond high-temperature power devices, *Int'l Symp. Power Semiconductor Devices*, 259-262 (2009).
- [7] 茶谷原昭義, 空野由明, 坪内信輝, 山田英明: 単結晶ダイヤモンド・ウェハの開発, *Synthesiology*, 3 (4), 272-280 (2010).
- [8] H. Yamada, A. Chayahara, Y. Mokuno, H. Umezawa, S. Shikata and N. Fujimori: Fabrication of 1 inch mosaic crystal diamond wafers, *Appl. Phys. Express*, 3, 051301 (2010).
- [9] 山田英明, 茶谷原昭義, 空野由明, 坪内信輝, 梅澤仁, 加藤有香子, 鹿田真一: インチサイズの単結晶ダイヤモンド接合ウェハの作製と大面積化に向けての取組み, *第25回ダイヤモンドシンポジウム*, 8 (2011).
- [10] 小林直人, 赤松幹之, 岡路正博, 富樫茂子, 原田晃, 湯元昇: *Synthesiology*論文における構成方法の分析, *Synthesiology*, 5 (1), 36-52 (2012).
- [11] N. Tatsumi, H. Umezawa and S. Shikata: Reduction of epitaxial defects in diamond for high power device, *Int'l Conf. SiC and Related Materials*, Th-P-33 (2007).
- [12] R. Kumaresan, H. Umezawa and S. Shikata: Parasitic resistance analysis of pseudoverlateral structure diamond Schottky barrier diode, *Phys. Status Solidi A*, 207 (8), 1997-2001 (2010).
- [13] H. Umezawa, T. Saito, N. Tokuda, M. Ogura, S.G. Li, H. Yoshikawa and S. Shikata: Leakage current analysis of diamond Schottky barrier diode, *Appl. Phys. Lett.*, 90 (7), 073506 (2007).
- [14] H. Umezawa, N. Tokuda, M. Ogura, S.G. Li and S. Shikata: Characterization of leakage current on diamond Schottky barrier diodes using thermionic-field emission modeling, *Diamond Relat. Mater.*, 15, 1949-1953 (2006).
- [15] H. Umezawa, N. Tatsumi, S. Shikata, K. Ikeda and R. Kumaresan: Increase in reverse operation limit by barrier height control of diamond Schottky barrier diode, *IEEE Electron. Device Lett.*, 30 (9), 960-962 (2009).
- [16] T. Hatakeyama, M. Kushibe, T. Watanabe, S. Imai and T. Shinohe: Optimum design of a SiC Schottky barrier diode considering reverse leakage current due to a tunneling process, *Mater. Sci. Forum*, 433-436, 831-834 (2003).
- [17] H. Umezawa, K. Ikeda, R. Kumaresan and S. Shikata: High temperature characteristics of diamond SBDs, *Mater. Sci. Forum*, 645-648, 1231-1234 (2010).
- [18] Y. Nishibayashi, N. Toda, H. Shiomi and S. Shikata: Thermally stable ohmic contact to boron doped diamond films, *4th Int'l Conf. New Diamond Science and Technology*, 717-720 (1994).
- [19] M. Liao, J. Alvarez and Y. Koide: Tungsten carbide Schottky contact to diamond toward thermally stable photodiode, *Diamond Relat. Mater.*, 14 (11-12), 2003-2006 (2005).
- [20] K. Ikeda, H. Umezawa, K. Ramanujam and S. Shikata: Thermally stable Schottky barrier diode by Ru/Diamond,

- Appl. Phys. Express*, 2, 011202 (2009).
- [21] 梅澤仁, 辰巳夏生, 山口博隆, 加藤智久, 池田和寛, R. Kumaresan, 鹿田真一: ダイヤモンドのエピ欠陥観察とショットキーダイオード特性相関, 第17回SiC及び関連ワイドギャップ半導体研究会, P-76, (2008).
- [22] R. Kumaresan, H. Umezawa, N. Tatsumi, K. Ikeda and S. Shikata: Device processing, fabrication and analysis of diamond pseudo-vertical Schottky barrier diodes with low leak current and high blocking voltage, *Diamond Relat. Mater.*, 18, 299-302 (2009).
- [23] K. Ikeda, H. Umezawa and S. Shikata: Edge termination techniques for p-type diamond Schottky barrier diodes, *Diamond Relat. Mater.*, 17 (4-5), 809-812 (2008).
- [24] K. Ikeda, H. Umezawa, N. Tatsumi, R. Kumaresan and S. Shikata: Fabrication of a field plate structure for diamond Schottky barrier diodes, *Diamond Relat. Mater.*, 18 (2-3), 292-295 (2009).
- [25] H. Umezawa, M. Nagase, Y. Kato and S. Shikata: High temperature application of diamond power device, *Diamond Relat. Mater.*, 24, 201-205 (2012).
- [26] S. Shikata, K. Ikeda, R. Kumaresan, H. Umezawa and N. Tatsumi: Recent progress of diamond device toward power application, *Mater. Sci. Forum*, 615-617, 999-1002 (2009).
- [27] H. Umezawa and S. Shikata: Characterization of temperature distribution of forward biased Schottky barrier diode on diamond wafer, *Eur. Conf. SiC and Related Materials*, TueP-15 (2010).
- [28] H. Umezawa, Y. Kato and S. Shikata: 1Ω On-resistance diamond vertical-Schottky barrier diode operated at 250 °C, *Appl. Phys. Express*, 6, 011302 (2013).
- [29] K. Kodama, T. Funaki, H. Umezawa and S. Shikata: Switching characteristics of a diamond Schottky barrier diode, *IEICE Electron. Express*, 7 (17), 1246-1251 (2010).
- [30] T. Funaki, K. Kodama, H. Umezawa and S. Shikata: Characterization of fast switching capability for diamond Schottky barrier diode, *Mater. Sci. Forum*, 679-680, 820-823 (2011).
- [31] T. Funaki, M. Hirano, H. Umezawa and S. Shikata: High temperature switching operation of a power diamond Schottky barrier diode, *IEICE Electron. Express*, 9 (24), 1835-1841 (2012).
- [32] H. Umezawa, K. Ikeda, R. Kumaresan, N. Tatsumi and S. Shikata: Device characteristics dependence on diamond SDBs area, *Mater. Sci. Forum*, 615-617, 1003-1006 (2009).
- [33] H. Umezawa, Y. Mokuno, H. Yamada, A. Chayahara and S. Shikata: Characterization of Schottky barrier diodes on a 0.5-inch single-crystalline CVD diamond wafer, *Diamond Relat. Mater.*, 19 (2-3), 208-212 (2010).
- [34] R. Kumaresan, H. Umezawa and S. Shikata: Vertical structure Schottky barrier diode fabrication using insulating diamond substrate, *Diamond Relat. Mater.*, 19 (10), 1324-1329 (2010).
- [35] H. Umezawa, Y. Kato, H. Watanabe, A.M.M. Omer, H. Yamaguchi and S. Shikata: Characterization of crystallographic defects in homoepitaxial diamond films by synchrotron X-ray topography and cathodoluminescence, *Diamond Relat. Mater.*, 20 (4), 523-526 (2011).
- [36] Y. Kato, H. Umezawa, H. Yamaguchi and S. Shikata: X-ray topography used to observe dislocations in epitaxially grown diamond film, *Jap. J. Appl. Phys.*, 51, 090103 (2012).
- [37] H. Taniuchi, H. Umezawa, T. Arima, M. Tachiki and H. Kawarada: High-frequency performance of diamond field-effect transistor, *IEEE Electron. Device Lett.*, 22 (8), 390-392 (2001).
- [38] K. Hiram, H. Sato, Y. Harada, H. Yamamoto and M. Kasu:

Diamond field-effect transistors with 1.3 A/mm drain current density by Al_2O_3 passivation layer, *Jap. J. Appl. Phys.*, 51, 090112 (2012).

- [39] T. Iwasaki, Y. Hoshino, K. Tsuzuki, H. Kato, T. Makino, M. Ogura, D. Takeuchi, T. Matsumoto, H. Okushi, S. Yamasaki and M. Hatano: Diamond junction field-effect transistors with selectively grown n^+ -side gates, *Appl. Phys. Express*, 5, 091301 (2012).

執筆者略歴

鹿田 真一 (しかた しんいち)

1978年京都大学工学部卒業、1980年京都大学大学院工学研究科修士課程修了。企業を経て、2004年産業技術総合研究所入所。現在、ユビキタスエネルギー研究部門総括研究主幹。ワイドギャップ半導体デバイス、弾性波デバイス、ダイヤモンドの材料及びデバイス応用の研究開発に従事。大阪大学博士(工学)。兼千葉大学大学院工学研究科客員教授。IEEE Senior member、応用物理学会、電子情報通信学会各会員。2004年12月に本研究の基本長期計画を策定し、この論文では全体に渡って開発を主導した。



梅沢 仁 (うめざわ ひとし)

1998年早稲田大学理工学部卒業。2000年早稲田大学大学院 理工学研究科 修士課程修了。2002年早稲田大学大学院 理工学研究科 博士課程修了。早稲田大学理工学研究センター 助手、同大生命医療工学研究所助手を経て、2005年産業技術総合研究所入所。現在、ユビキタスエネルギー研究部門主任研究員。ダイヤモンドの材料合成技術、評価技術、及びデバイス応用の研究開発に従事。早稲田大学博士(工学)。応用物理学会、IEEE 会員。入所以降、メインの実務担当者として、この論文では研磨以外の研究全体を担当した。



査読者との議論

議論1 論文全体

質問・コメント(小林 直人:早稲田大学研究戦略センター)

この論文は、ダイヤモンドのパワー半導体デバイス化をめざした優位性の実証研究を総合的に行った結果を報告したものであり、著者らが長年にわたり積み重ねてきた個々の要素技術をベースにして実際に実証まで示した統合的成果として、構成学としても意義のある論文となっていると考えられます。特に、これからダイヤモンドのパワーデバイスの実用化ないし利用をめざしている読者に対して、より有効な指針や方向性を与えることができると考えられます。ただし、記述に分かりにくい点や不確実な点がありますので、丁寧な推敲が必要と考えられます。

質問・コメント(清水 敏美:産業技術総合研究所)

この研究は、物質中で最高の性能を多数有するダイヤモンド材料を用いて、次世代パワー半導体デバイスとしての優位性実証を確認した結果を示したものであります。ブレイクスルーを交えながら4つの構成要素を解決してきた本格研究に値する内容を記述しており、シンセシオロジーとしてふさわしい論文と考えます。論理構成に大きな問題はないのですが、表現記述に関して、一般読者により理解しやすい工夫が必要と思います。これらのポイントが補足されることによりさらに充実した論文になると思います。

議論2 研究シナリオや具体的応用

質問・コメント（小林 直人）

図3にダイヤモンドパワーデバイスの優位性実証研究のシナリオ（構成学的ツリー図）が描かれています。まさに構成学としてのこの論文の眼目であり、とても重要であると思います。ただ、①絶縁破壊、②キラ欠陥撲滅・・・、と書かれている項目の番号の意味とそれらの関係が良く分かりません。第4章でその説明がありますが、時間の流れを示しているのか、研究にとりかかかった順序を示しているのかなどが不明ですので、この論文や図のキャプションでの説明が必要でしょう。

回答（鹿田 真一）

番号は結果としての、実施の順です。図に注釈入れました。おおむね2004年12月に基本計画を考えたときの筋書きに沿って進んでおり、平行して研究を進めているウェア開発とあわせて、表1に示したロードマップへ繋がってきております。今後の課題は、図3の左上に例示したような、実用化に向けたブレークスルーですが、多くの機関と協力して日本で成し遂げたいと考えます。

質問・コメント（小林 直人）

第1章にダイヤモンドパワーデバイスの応用について簡単に書かれていますが、この論文の成果の実用化に関する最も重要な部分なので、図（例えば、http://www.chubu.meti.go.jp/jisedai_jidoushiya/chubu/pdf/sansoken/sansoken_8.pdf 内の図）なども使用して、より詳細に述べた方がよく、それが読者の理解を助けることになると思います。

回答（鹿田 真一）

紙面の都合で割愛していた図を入れました。具体的な応用機器名を入れています。IEAのENERGY OUTLOOKではCO₂削減に及ぼす役割の67%が省エネ技術であり、それに対応すべく早期実用化を、目指したいと考えています。この論文で例題デバイスとして取り組んだショットキーダイオードは、SiCの例を見ても、Si pnダイオードに比べてメリットが大きく、中出力機器から可能性があらうかと考えます。その他ダイヤモンドは、γ線、中性子線耐性に優れるので、小電流デバイスでも可能性が考えられます。

議論3 低損失パワーデバイス性能の比較とダイヤモンドデバイスの研究開発状況

質問・コメント（清水 敏美）

種々の物性値を、物質としてのダイヤモンド、SiC、GaN、Siと比較していますが、実際にデバイスにそれらの物質が実装された際のデバイスとしてのベンチマーク情報が知りたいところです。言い換えれば、将来のパワーデバイス応用に関して、ダイヤモンドはどの部分で特徴を発揮するのか、その根拠や理由は何なのかなどを記述してください。荒井和雄氏が執筆したSynthesiology論文「SiC半導体のパワーデバイス開発と実用化への戦略」（Vol. 3, No. 4, pp. 259-271）において、パワー半導体のアプリケーションと要求デバイス性能の関係を明確に示した概念図があります（pp. 269）。例えば、この図にダイヤモンドの性能を重ねるなど、理解が容易な図の作成が必要だと思います。

回答（鹿田 真一）

新たなイメージ図を作成しました。もう少し具体的に電流、電圧に即した応用を類型で示しました。実際にはこれに、冷却系フリーで、高温の軸をいれて、そのまま出力を落とさずに使うダイヤモンドのメリットが特徴とならうかと考えています。

質問・コメント（小林 直人）

この論文では、著者らが長年にわたり積み重ねてきた要素技術の

それぞれの内容と意義を詳細に述べていますが、国内外のこの間の研究開発状況についての記述がなく、この研究の位置付けにやや不透明な印象を与えています。例えばT.Iwasaki他、Applied Physics Express 5 (2012) 091301、など他の研究開発についても言及されることを期待します。また、本成果は特許としても活かされていると思いますので、特許情報の引用も入れた方がよいと思います。

回答（鹿田 真一）

トランジスタについて論文を引用して、展望を入れました。ご指摘の最近の論文はpn接合ベースのデバイス研究ですが、用途としては超高耐圧等が想定されます。ただnA級から100 A級に10桁以上の向上が必要です。ダイヤではn+が未だできておらず、さらなる材料の研究が望まれます。当面はSiCと同様に、低電圧駆動可能なユニポーラ系デバイスが先行すると考えられます。この論文ではすでに1 A級なので、欠陥を減らして、2桁の向上を目指します。特許については、ダイヤモンドに特有の特許ははじめ数件、登録になっています。

議論4 アドバンテージ実証に関して

質問・コメント（清水 敏美）

「1. 研究の目的とアウトカム」の最後に、「・・・アドバンテージ実証として、フェーズ1の研究開発を実施した・・・」とあります。例えば、創業研究には、基礎研究から始まって、動物を用いて実施する非臨床試験、人での薬物の有効性と安全性試験（フェーズ1、フェーズ2、フェーズ3）を実施する臨床試験があります。ここでは実証の対象において動物か人かという大きな研究フェーズの相違があります。デバイス研究においては、図3にあるコンセプト実証のフェーズ1研究と実用デバイスとしての実証のフェーズ2とを区別する大きな構成要素や技術要素は何でしょうか。それらは著者が考える個人的な差別化でしょうか、それとも一般的に受け入れられている差でしょうか。デバイス研究者では当たり前でも幅広い読者にとっては、フェーズ1とフェーズ2の位置付けが明確ではありません。

回答（鹿田 真一）

フェーズ1のコンセプト実証は、例えば1 A級で確認して原理的に可か否かという意味で、動物実験。フェーズ2の実用デバイス開発は、搭載可能な100 A級で実証という意味で、人での有用性確認に相当します。信頼性試験は、安全性試験ということでフェーズ3になります。この後、エンジニアリングサンプル、製品とフェーズが上がっていきます。呼び方は企業によって異なりますが、概念は一般的なものです。図3に補足入れました。

議論5 トランジスタの性能実証に関して

質問・コメント（清水 敏美）

ダイヤモンド半導体を用いたパワーデバイス実証を目指すためには、ダイオードのみでなくトランジスタ性能の実証も必要不可欠と考えます。つい最近、産総研の研究グループによって接合型電界トランジスタの動作実証に初めて成功した学術論文が発表されました。当Synthesiology論文ではダイヤモンド半導体を用いたトランジスタ動作に関する今後の見通しに関して全く言及されていません。究極のパワーデバイスを目指すのであればダイヤモンド材料を用いたトランジスタ開発の最新技術動向に関して何らかのコメントが必要だと思います。

回答（鹿田 真一）

昔から山のようにトライアル成果がありますが、残念ながら高周波狙いの横型デバイスのみで、縦型構造で将来の100 A級に繋がるプロトタイプという成果はありません。しかし、トランジスタについての記載がないのはご指摘のとおりなので、記載しました。これは多くの機関の参画によって、研究していかねばならない項目かと考えます。