ダイヤモンドを用いた次世代パワーデバイスの開発

鹿 田 真 一^a

^a (独)産業技術総合研究所 ダイヤモンド研究ラボ(〒 305-8565 茨城県つくば市梅園 1-1-1 つくば中央第 2)

Next Generation Power Device by Diamond

Shinichi SHIKATA^a

^a Diamond Research Laboratory, National Institute of Advanced Industrial Science and Technology(Tsukuba Central 2, 1-1-1, Umezono, Tsukuba-shi, Ibaraki 305-8565)

Keywords : Diamond, Power Device, Shottky Diode, Diamond Wafer

1. パワーデバイスにおけるダイヤモンドのメリット

パワーデバイスは、電力を用いるすべての機器に用いられる基本デバイスで、特にハイブリッド車のモーター駆動で、次世代自動車の心臓部の位置付けになってきた頃から、急速に注目を集めるようになってきている。省エネのキーデバイスであり、10%を超す高い年率で市場が伸長する他、環境・エネルギー問題を主導せねばならない日本としては負けられない分野である。この分野では周知のようにSiの限界を超えて低損失を実現するため、急速にSiCなど次世代材料の開発・普及が進んでいる。

ダイヤモンドの結合のエネルギーはSiCの約3倍にも達し、物質中最高の特性を多数与えることに寄与している。熱伝導率、絶縁破壊電界、キャリア移動度、低誘電率などパワー半導体デバイスとして極めて有利な諸特性を有する(図1)。熱伝導は桁違いに高くヒートシンク材料を超えるためデバイスの熱設計を抜本的に変えることは容易に類推できる。絶縁破壊電界は他材料より一桁高く、高耐圧素子が可能である。移動度も他材料より高く、高速動作、高電流密度動作に優位であり、また誘電率は低く寄生容量が小さくなり高速動作に

有利である。これらを元にさまざまなデバイス指標予想がなされているが^{1)~5)}、いずれも他材料を凌駕する。我々は世界に先駆けて、2005年からこの用途を探索し、ダイヤモンドで予想されていることが現実に可能なのか、大口径ウェハが可能なのか、実証する初期研究を開始した。この2、3年、大きなブレークスルーが得られており、答えはYESと言えるような状況にあるので、本稿で概要を紹介したい。

2. 単結晶ウェハ開発状況

ダイヤモンド多結晶ウェハに関しては、1980年代後半にSiを基板としたダイヤモンドウェハの開発が進み、すでに2~4インチが実用化されている⁶⁾。ダイヤモンドのウェハ化に関する基本的な技術が可能であることは立証済みであり、それに付加して単結晶特有のやりやすさ／やりにくさが出現してくるものと思われる。現在の単結晶ウェハ開発であるが、高温高压(HPHT)法で製造した3~5mm角程度の単結晶をベースに、気相合成を用いて大型化する方法が主流である。三次元的に大きくする手法で、世界最大のハーフインチの単結晶まで得られている⁷⁾。ダイヤモンドのカットは、通常レーザーによって行われているが、このように大きいサイズにな

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

ると、入射深度や切りしろ発生などさまざまな問題が発生し極めて困難になる。ところが、最近スライスをせずにウェハを複製する「ダイレクトウェハ化」手法が開発された。図2に示すようなプロセスを経る。まずイオン注入により表面から1~2 μm 深いところにダメージ層を作り、そのままダイヤモンド薄膜の追成長を行った後、成長中に950~1050℃に上がった温度でダメージ層が黒鉛化する。その部分をウェットエッチングにより追成長部分をリフトオフにより、ウェハとして取出す手法である⁸⁾。本手法は種結晶が一度できれば、①同様サイズのウェハを何枚もコピーできる、②材料のロスがたったの1~2 μm で済むというという特徴がある。さらに厚く成長して、別の種結晶となるものを製作することにより、量産対応することも可能である。またデバイスは、ウェハを研磨せず、そのままリフトオフ分離面を用いることが可能である。また同じ結晶をベースにコピーしていくので、オフ角、オフ方向が兄弟ウェハ間で揃っており、常に同じ状態でのステップフローエピ成長ができる。

さらにこの特徴を活かし、リフトオフして得られた「兄弟」ウェハを複数枚、CVDにより横に並べて成長したところ、成長部分がコアレスし、見事に接合することに成功した。それを元にさらにダイレクトウェハ化を行うと、単結晶が接合し完全一枚板になった1インチのウェハを得ることに成功した⁹⁾。この写真を図3に示す。「ダイレクトウェハ化」によって得られるウェハは、すべて結晶のオフ角、オフ方向が揃っているということで、この接合が可能になっている。接合部分は単結晶ではなくデバイスには用いることはできないが、ダイシングライン付きウェハという位置付けになる。幸い後述のように、ダイヤモンドは高電流密度が可能なので、チップサイズを小さくすることが可能であるので、単結晶部分が

ハーフィンチもあれば、相当高出力用途でも問題はない。現在産総研ではこの技術を用いて2インチウェハの開発を目指している。半導体プロセスにおいて2インチは閾値サイズであり、プラズマチャンバーの設計など極めて難しいものもあるが、あとはなんとか大口径の大型化が見えてくるかと考えている。以上、今後大口径化を進めるための大きな課題が二つ解決できた、と言っても過言ではないと思われる。

欠陥に関してはstacking faultがマイクロパイプのようなものを形成することはないので、大きな欠陥に関してはSiCより本質的な状況は良さそうである。X線トポグラフィ、エッチピット観察、デバイスとの相関解析などで欠陥についての解析が漸く始まったところであるが、現状 10^4 cm^{-2} 台のエッチピット欠陥があり¹⁰⁾、この分類と低減が目下の最大の課題である。低欠陥ウェハについては、すでに高圧高温結晶で超低欠陥のものがすでに実現されている¹¹⁾が、こういった低欠陥結晶を種として上記ダイレクトウェハ化と接合ウェハを作製してウェハとすることにより、大型低欠陥ウェハを目指すことは可能と考えられ、すなわちウェハ大型化と低欠陥を同時並行で進めることが可能であろうと思われる。ウェハのブレイクスルーポイントである2インチウェハ実現と結晶欠陥低減などが至近の課題であり、長期的には4, 6, 8インチに向けた装置を含む大型化技術、低コスト化、低抵抗ウェハなどが挙げられる。低抵抗ウェハについては、最近、フランスのチームからp+ウェハ開発の報告¹²⁾がなされた。まだまだ初期データにすぎないが、今後こうした取り組みの増加が期待される。ダイヤモンドは、炭素のみからなり資源問題はない、どんな形の原材料ガスからでも合成可能、合成温度はせいぜい1000℃、用いる原材料も安全で、高価な安全付帯設備も不要、など製造上基本的に高コスト要因は見当た

図2 ダイレクトウェハ法とウェハ写真

図3 接合ウェハ製造方法と1インチウェハ写真(4枚接合したもの)

らず、基本技術ができてしまえば、低コスト生産も可能かと思われる。

3. デバイス開発状況

ダイヤモンドのキャリアはp型で0.37 eVと深く、室温で未だ出払い領域に入っていないということで、従来の発想で考えると否定的見方がほとんどであった。しかし、せっかくの耐熱性、熱伝導を生かして、どっちみち200℃を超える高温になったデバイスを、無理矢理巨大冷却装置で冷やして使わず、そのまま高温で断熱して利用するという新しいコンセプトが可能であり、我々は「冷却フリー」という概念を導入した。図4は、250℃におけるパワーデバイスのオン抵抗と耐電圧の関連を予想した図である。デバイスの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、次世代低損失デバイスとして期待のかかるSiCに対して、さらに低損失化が実現可能である⁵⁾。また後述のように大出力も同時達成可能であり、小型化と併せて、例えば車のデバイスのインホイール化などのアイデアに繋がる。図5に自己発熱温度(例250℃)で冷却システムフリー動作するデバイスのイメージ図を示す。例えば自動車のデバイス冷却系は65℃の系統が、ラジエータとは別に設置されているが、これを冷却なしの断熱・小型化可能であれば、大きな利点が生まれる。それを表1に示す。容量・重量低減以外にも多数あり、特に信頼性がFIT数の高いデバイスのみになることは、大きなア

図4 自己発熱温度(例250℃)におけるオン抵抗の比較

図5 自己発熱温度(例250℃)で冷却システムフリー動作するデバイスのイメージ図

ドバンテージとなる。高温保持デバイスは、OCXO（オープン制御発振器）などではすでに馴染みの技術であり、保持温度を200～250℃にする技術開発は必要であるが、いろいろな技術の進歩と新しい発想で可能になるのではないかと考えて、冷却フリー動作を前提に研究を進めている。

パワーデバイスを目指した研究は、我々のところで2005年初から着手した。現在はp型ユニポーラデバイスで比較的取り組みやすく、かつSiで高耐圧デバイスが存在せず実用化の見えやすいショットキーダイオードを例題デバイスとして、高耐圧、冷却フリーを実現するための高温動作、高電流駆動というダイヤモンドのアドバンテージを探り実証しようとする研究と、これらを含むダイヤモンド半導体の各種要素技術研究を実施している¹³⁾。

まず他材料に比して圧倒的優位にある高耐圧確認に向けては、ドリフト層エピの絶縁破壊電界確保と電界緩和終端の二つで検討がすすんでいる。ショットキーダイオードにおいてケンブリッジ大の1.88 MV/cm¹⁴⁾、産総研の3.1 MV/cm¹⁵⁾など、すでにSiCを超す値が得られている。電界緩和終端に関してはAl₂O₃がよい絶縁膜になることがわかってきており¹⁶⁾、FP（フィールドプレート）やJTE（接合終端）などの電界緩和終端技術開発が可能である。エピタキシャル成長するドリフト層の欠陥に関して、ステップフロー成長させると欠陥が低減することや¹⁷⁾、リーク電流に影響する欠陥が、未だ10⁴ cm⁻² 台の数を有することがわかっている。現在、数十～100 μmφサイズのダイオードは非常に高性能であるが、サイズの増加とともに、特に逆方向リーク電流が激増し、エピ欠陥がいかに甚大な影響を与えているかがわかる。これが今後の課題で最も重要なものと思われる。リーク電流はTFモデルに従うことがわかっている¹⁸⁾。ショットキー接合部のダイヤモンドの表面処理技術によって、高バリアハイトを確保し、高い電界強度や高温で低リーク電流を確保できることもわかっていて、回路の低損失化に貢献可能と思われる。

はじめに述べた冷却系フリーを実現するための高温動作については、電極の耐熱性が問われる。オーミック電極については、p型の技術はすでに確立されていて、Ti/Mo/Auで10⁻⁶ Ωcm²のコンタクト抵抗を有し、800℃という高温でも400 h劣化のないことが、すでに確認されている¹⁹⁾。ショットキー電極

表1 冷却システムがないメリット

技術的効果	大電流 低損失 信頼性向上* 重量削減 容量削減 設計＆製造コスト削減 保守削減
産業へ及ぼす効果	電気自動車の小型化、高性能化、省エネ化 バス、トラックのEV化 配電設備の超小型化
環境・省エネ効果	冷却電力削減による省エネ 冷却部品製造に関わる省エネ
資源等効果	炭素系材料で海外に非依存 ヒートシンク部品資源不使用 (Mo, Cu など)

* 冷却系の信頼性：500 FIT (1万時間で10万個中500個故障)
デバイス信頼性より2～3桁悪い

について、最近安定なカーバイド(WC)による方法²⁰⁾と、カーバイドを形成しない安定金属による方法と二通り検討されている。後者ではショットキー特性、抵抗率、材料およびワイヤとの密着性などすべてに秀でたRu /ダイヤモンドを見つけることができた²¹⁾。これは400℃、1500時間高温保存でも特性は変わらず、500℃などのデータを併せたアレニウスから予測すると、250℃、30万時間以上耐えられるものと推定されている。この超耐熱ショットキーバリアダイオードの400℃高温保存特性と、パッケージに入った素子の写真を図6に示す。

高電流密度については、未だ小さいデバイスでの検討しか行われていないが、それにしても従来デバイスでは得られない5 kA/cm² (@ 250℃) などという数値が得られている²²⁾。ショットキーバリアダイオードの順方向および逆方向特性の温度依存性を図7に示す。これは冷却に苦勞して、さらに冷却することにより出力を下げざるを得ない、という従来材料によるデバイスのジレンマから抜け出し、超小型&冷却フリーでかつ大出力も可能というデバイスが可能であることを示唆している。誘電率も低く高速動作も期待できることから、SiのMOSFETと組み合わせたスイッチング動作なども検討しており²³⁾、テスト的に試験を行ったところ、かなり良好に高速動作することなどを確認している(図8)。印象的であ

るのは、通常のSiなどのデバイスでは電流印加するとその周辺だけが昇温し、ホットスポットができるが、ダイヤモンドでは熱伝導が一桁高いため、一瞬にして基板全体に広がることで、実装を含めたトータルのアドバンテージを考えていく必要があると思われる。

以上、例題デバイスとして検討しているショットキーバリアダイオードを例にとりて、ダイヤモンドパワーデバイスのアドバンテージがありそうなことを例示したが、高電流対応縦型構造、低欠陥エピ膜の実現による100 A級デバイス、エッジ処理など実用化には未だ課題山積である。しかし、基本的には、シリコンデバイスで実施済み技術の焼き直しであり、むしろ開発の中心は、高温動作を確保し、定常動作させるための実装技術などが中心になるものと考えられる。

4. 今後の見通し

ダイヤモンドで大型ウェハは不可能であると思われていたが、いくつかのブレークスルー技術ができ、デバイスを実現できる大口径化ウェハも夢ではなくなってきた。またデバイスも従来および最近注目されている次世代材料に比べても、アドバンテージがありそうである。資源・安全問題もなく、高コスト要因も本来存在しない材料である。ましてデバイスの熱設計も含めてシステム全体で考えると、むしろコストは逆転する可能性も有り得る。限りのない炭素材料を、結晶形

図6 超耐熱ショットキーバリアダイオードの高温保存(400℃で1500時間保存しても特性の変化はない)

図7 ショットキーバリアダイオードのFORWARDおよびREVERSE特性の温度依存性(高温ではキャリア増により電流密度が増大し、オン抵抗はさがる。また高温でもリーク電流は小さい。)

(a)ダイヤモンドの試作素子

(b)市販SiCダイオード

図8 ダイヤモンドショットキーダイオードのスイッチング特性

だけで有益なものに変換できるわけで、まさに 21 世紀以降の日本に相応しい材料ではないだろうか。海外にマネされ、追い越されないように、オールジャパンで急ぎ進めていくべきではないかと考える。

(Received December 23, 2010)

文 献

- 1) B. J. Baliga ; *J. Appl. Phys.*, **53**, 1759 (1982).
- 2) 大橋弘通 ; *FEDジャーナル*, **11**, (2), 3 (2000).
- 3) W. Saito, I. Omura, T. Ogura, H. Ohashi ; *Solid State Electronics*, **48**, 1555 (2004).
- 4) A. Q. Huang ; *IEEE Electron Device Letters*, **25**, 298 (2004).
- 5) H. Umezawa, S. Shikata ; Int'l Symp. Power Semiconductor Devices, p.259 (2009).
- 6) 鹿田真一 ; 弾性波デバイス技術, 第三章(オーム社, 2004).
- 7) Y. Mokuno, A. Chayahara, Y. Soda, H. Yamada, Y. Horino, N. Fujimori ; *Diamond and Related Materials*, **15**, 455 (2006).
- 8) Y. Mokuno, A. Chayahara, H. Yamada ; *Diamond and Related Materials*, **17**, 415 (2008).
- 9) H. Yamada, A. Chayahara, Y. Mokuno, H. Umezawa, S. Shikata, N. Fujimori ; *Applied Physics Express*, **3**, 051301 (2010).
- 10) S. Shikata, K. Ikeda, T. Kumaresan, H. Umezawa, N. Tatsumi ; *Materials Science Forum*, **615-617**, 999 (2009).
- 11) H. Sumiya, N. Toda, S. Satoh ; *J. Crystal Growth*, **237-239**, 1281 (2002).
- 12) J. Achard, F. Silva, et al. ; 4th Int'l Conf. New Diamond and Nano Carbons, p.71 (2010).
- 13) 鹿田真一 ; パワーエレクトロニクスの新展開, 第三章(シーエムシー出版, 2009).
- 14) S. J. Rashid, L. Coulbeck, A. Tajani, G. A. J. Amaratunga1, J. Isberg ; *Proc. ISPSD*, **17** 315 (2005).
- 15) 梅澤 仁, 辰巳夏生, 池田和寛, R. Kumaresan, 鹿田真一 ; 第17回 SiC及びワイドギャップ半導体研究会, p.76 (2008).
- 16) K. Ikeda, H. Umezawa, S. Shikata ; *Diamond and Related Materials*, **17**, 809 (2008).
- 17) N. Tatsumi, H. Umezawa, S. Shikata ; Int'l Conf. SiC and Related Materials, Th-P-33 (2007).
- 18) H. Umezawa, N. Tatsumi, S. Shikata, K. Ikeda, R. Kumaresan ; *IEEE Electron Device Letters*, **30**, 960 (2009).
- 19) Y. Nishibayashi, N. Toda, H. Shiomi, S. Shikata ; 4th Int'l Conf. New Diamond Sci. Technol., p.717 (1994).
- 20) M. Liao, J. Alvarez, Y. Koide ; *Diamond and Related Materials*, **14**, 2003 (2005).
- 21) K. Ikeda, H. Umezawa, K. Ramanujam, S. Shikata ; *Appl. Phys. Express*, **2**, 011202 (2009).
- 22) S. Shikata, K. Ikeda, T. Kumaresan, H. Umezawa, N. Tatsumi ; *Materials Science Forum*, **615-617**, 999 (2009).
- 23) K. Kodama, T. Funaki, H. Umezawa, S. Shikata ; *IEICE Electronics Exp.*, **7**, 1246 (2010).