

公益社団法人 応用物理学会

先進パワー半導体分科会

Advanced Power Semiconductors

vol.02 No.02
2015

第3回 先進パワー半導体分科会研究会

「次世代パワー半導体デバイスの進展」



ダイヤモンドの研究状況と課題

Current status and issues of diamond for power device application

鹿田真一

関西学院大学 理工学部、兵庫県三田市学園 2-1、SShikata@kwansei.ac.jp

1. 概要

本稿ではダイヤモンドのパワーデバイス応用に向けた現状紹介と、課題について述べる。物性値として最も重要な絶縁破壊電界の現状観測最高値 7.7MV/cm を越すためのきちんとした素子構造での計測と高い数値の実現は不可欠である。また n 型は、さらなる高品質化（高移動度）・低抵抗が不可欠である。

ウェハに関して、大口径化はモザイク方式が現状での解答となるが、単結晶プレートサイズを大きくする努力が必要である。その元となる低欠陥 HPHT の大口径化と、欠陥の増えない CVD コピー技術の向上は必須であり、見通しはつけられそうである。低抵抗ウェハについては、HFCVD により p 型で高濃度できる可能性が出てきたが、これを高速成長化するか、MPCVD で同様のことを可能にする必要がある。n 型については高濃度ドーブと厚膜化そのものへのトライが必要である。研究用低抵抗・低欠陥ウェハの供給を急ぐ必要がある。

デバイスは、p 型 SBD は、上記の材料物性の向上、ウェハ課題が解決されれば、問題は少ないように見える。MOS については研究開始されたばかりであり、 Al_2O_3 で反転層観測(?)、といった報告もあるが、今後の研究が待たれる。

2. 物性

ダイヤモンドは、L 及び K 殻のみでできている高結合エネルギー材料のため、特異な材料物性を多数有する。図 1 に他ワイド材料との物性比較を示す。ここでは絶縁破壊電界の数値として 10MV/cm を用いた。SiC が注目され実用化が進んだ最大の理由は、バンドギャップが 5.48eV と高く絶縁破壊電界が高いため、高耐圧デバイスを低損失で実現できるところにあり、ダイヤモンドもきちんとした素子構造で計測した正確な絶縁破壊電界の情報が待たれる。材料実測データとして 20MV/cm の数値まで報告されているが[1]、デバイス評価としては 7.7MV/cm の観測が報告[2, 3]されている。このデータを図 2 に示す。ダイヤモンド特有の界面での伝導（その表面終端処理）、適切な電界緩和構造など、正確な計測実現のための研究進展とともに、本来の数値を明らかにする必要がある。またパワーデバイスとして関連する材料・電子物性について、あわせて表 1 に示す。その他オン抵抗に影響が大きい電子・ホール移動度、動作速度に影響する飽和ドリフト速度や誘電率など有利な特性が挙げられる。ドリフト層想定濃度でのホール測定による移動度は、電子(P)で $660\text{cm}^2/\text{Vs}$ 、ホール(B)で $1870\text{cm}^2/\text{Vs}$ である。P 準位は 0.57eV と深く、キャリア濃度はドナー濃度より、補償比で殆ど決まる。ホールと電子の移動度とキャリア濃度の温度依存性より、高温でも比較的高い移動度を有することがわかっている[4-6]。但し、n 型は移動度がまだホールより相当低いことから、高品質化の検討が不可欠である。パワーデバイスは用途によっては常時動作状態にあり、自己発熱温度で $200\sim 250^\circ\text{C}$ に上昇するが、 250°C では SiC の

140～150 に比べて高い $240 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ (いずれもキャリア濃度 $7 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$) となる。冷却せず断熱状態で熱均衡を取ることで、高温でキャリアが増加する効果と併せて、低損失が実現可能である。その様子を SiC と比較して図 3 に示す[7]。Baliga の性能指数 (BFOM) [8]、Huang 指標[9]など報告されているが、Ga2O3 などを入れて、また正確な絶縁破壊電界、使用温度、熱伝導など再考して、より実用に近い FOM 比較を行う必要があると思われる。

3. ウェハ

バルク単結晶：

単結晶ウェハ大面積化に関しては、高温高压 (HPHT) 法で、概ね最大 1cm 角程度のサイズが得られている。しかし、これ以上のサイズは望めないため HPHT 法による大面積化は実質的に中断されたままである。そこで CVD を用いた手法により大面積化へのトライアルがなされている。一つはヘテロエピであり、もう一つは SiC の RAF 法のように三次元的に大きくする手法である。

ヘテロエピは Si, SiC などの大面積化可能なウェハ上のエピ [10, 11] と、Ir 等の金属上への研究 [12] をきっかけに、様々な基板上での研究が行われた。現在、Ir(100)/MgO(100) 上の成長 [13] や Ir/YSZ/Si 上の成長 [14] などが鋭意研究されている。前者では 1 インチ Φ の結晶が出来ている。ヘテロエピの欠点は、転移欠陥が多いことにあるが、Ir/YSZ/Si 上の成長例で厚膜化することにより 10^{10} (数 μm) から 10^7 cm^{-2} 台 (1mm) に減少する (厚み 3 桁で、欠陥 3 桁) ことが実証されている [15]。 10^3 cm^{-2} 台以下が可能になるか興味深い。

RAF 法と同様のバルク成長は 3～5mm 角程度の単結晶をベースに、世界最大のハーフィンチの単結晶まで得られている [16]。ダイヤモンドの合成ではグラファイト化を防ぐため温度 900–1100°C に試料を保持する必要があるが、プラズマのガス温度の最大は 3000°C 近くになるので、下部から冷却系を導入し、結果として、著しく大きな温度勾配の系となっている。温度勾配による結晶の歪みが発生し、現状ではこのサイズが、ほぼ限界に近い。この問題は、マイクロ波プラズマ CVD (MPCVD) の抱える本質的課題で、大口径その他の課題にも共通のものであり、解決策の例はいくつか提示されている [17]。後述の「モザイク結晶」を用いる場合でも、単結晶プレートサイズはなるべく大きい方がよいので、必要不可欠の開発であろう。

大口径化：

以上の状況下で、提案されたのが、複数の結晶を横に接続して大面積にする「モザイク結晶」である。これはデバイスの場合、ダイシングによりチップでサイズに分割されるので、接続部分をダイシングラインとする考え方である。ダイヤモンドの場合、電流密度が高く取れるのでチップサイズを小さくすることが可能であるということと、SiC と最近の高密度実装技術から、電流密度 $250 \text{ A}/\text{cm}^2$ は可能であるので、実用化可能と考えられる。単結晶プレートサイズとデバイスサイズのずれは、最大 30% 程度の未使用部分を生むという問題があるので、単結晶プレートサイズの異なるウェハを用意し、デバイスサイズに応じて使い分ける事により、未使用部分は 10% 以下に抑えられる。

「モザイク結晶」を記述する前に、その前提技術となる「コピー技術」概要を記載する。

上記のハーフインチ結晶を複数得るには、スライスすることが必要であるが、ダイヤモンドのレーザーによるスライスは大きいサイズになると、入射深度や切りしろ発生など様々な問題が発生する。そこでリフトオフの手法が検討された。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、追成長を行った後、ウェットエッチングによりグラファイト化した部分を除去し、追成長部分をリフトオフで取出す手法である [18]。この例では 3MeV 注入で実験しているが、200keV 注入を用いても可能なことは確認しており十分工業化可能な技術である。「モザイク結晶」は、こうして出来た兄弟ウェハが、全て結晶のオフ角、オフ方向が揃っているという特徴を用いて合成される。このプロセスフローを図 4 に示す [19]。兄弟ウェハの場合ステップが同一方向に連続になるため、ステップフロー成長に大きな支障が発生しない。こうして接合されたウェハを元に、さらにコピーを行うと、完全一枚板になったモザイク状のウェハを得る。本手法を用いて 2 インチ相当のサイズが実現できている。図 5 に最近のウェハサイズの変遷を示す [20, 21]。この技術と長波長化、大型設備に関する技術開発で、4 インチや 6 インチへの大口径化は、将来可能かと考えられる。

大口径対応の設備に関しては、ホットフィラメント (HF) CVD を用いて 80 年代後半に Si を基板とした 10~20 μm 厚程度の多結晶ダイヤモンドウェハの開発が進み、既に 2~4 インチが実用化されている [22]。HFCVD 法は、各種ダイヤモンド製品の合成に用いられている手法で、低速合成 (1~5 $\mu\text{m}/\text{h}$) であるものの、面積は 300mm、450mm サイズまででも大きくすることが可能である。一方、MPCVD は 2.45GHz の ISM 帯を用いているが高出力電源がなく、大面積・高速合成は難しい。欧米では ITU で定められた ISM 帯周波数 915MHz の使用が可能のため、波長を長くした大面積対応可能な設備が利用可能である。4 インチ Φ が可能である。また大出力の電源が可能であり、高速合成も可能である。現在では合成圧力が高くなり、100~400Torr で 50~150 $\mu\text{m}/\text{h}$ の高速合成が主流になっている [23, 24]。その他最近の流れをまとめた解説もあり、参照されたい [25]。

欠陥：

パワーデバイスの用途とデバイス構造を考えると、低出力、高周波用途は、Si MOSFET および GaAs、InP 及び GaN 系 MESFET、特に高パワーで AlGaIn/GaN HEMT の高移動度にかなう事は不可能である。一方、SiC が Si を高出力・高耐圧分野で、まずはユニポーラデバイスから、その低損失を活かしてリプレースしつつある状況を見ると、ダイヤモンドは後者の系譜に属するであろうウェハとしては、上記記載の絶縁型ではなく、最終デバイスの低損失化を目指した低抵抗ウェハが不可欠となる。さらに、この用途のデバイス構造は縦型であり、同時に低欠陥が不可欠になる。

欠陥に関しては X 線トポグラフィ、ドライエッチによるエッチピット観察 (ウェットエッチングは困難)、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。これらと併せて、バンドギャップが大きい電子線を用いたカソードルミネセンス (CL) が現在同定に有力手段となっている。CL で観測される典型的なバンド A と呼ばれる欠陥が、X 線トポグラフィで観測されていることなどが明確に観察されている [26]。理論及びこれまでの転位及びバーガーズベクトルの解析から、刃状 (edge) 貫通欠陥、各

種の混合 (Mixed) 貫通欠陥などが示唆されている[27-29]。表 2 にダイヤモンドの貫通欠陥解析の例を示す。現在の結晶は概ね $10^1 \sim 10^5$ 台/cm² というところである。ショットキーバリアダイオードで Murphy プロット (面積とデバイス生存率から欠陥を推定する一手段) を作成すると、概ね欠陥数は 10^1 台/cm² であり、必ずしも欠陥全てがデバイスに大きく影響する、ということではなさそうである。しかしどの欠陥がどのような影響を及ぼすかは研究途上で、未だよくわかっておらず、今後の解析が待たれる。ダイヤモンドは、バルク、エピ問わず CVD によるエピ成長するため、表面処理の影響は大きく、UV アシスト研磨など加工技術開発も極めて重要である[30, 31]。最近、電子線誘起電流法 (EBIC) を用いてデバイスと欠陥の関連性を探索する研究なども開始されている[32]。

低欠陥基板実現に関して、種となる HPHT (高圧高温) 結晶では、既に超低欠陥のものが既に実現されているが [33, 34]、こういった低欠陥結晶を元に上記結晶コピー技術を用いて低欠陥 CVD 基板が開発されつつある。現状では、まだ小さい限定部分であるが、400/cm² 程度の低欠陥 CVD 結晶の作製を実証した例がある[35]。図 6 にこの状況を示す。これらの技術の発展により、低欠陥ウェハは、将来十分可能になるものと予想される。

低抵抗：

低抵抗ウェハは縦型デバイスの場合、最終的なオン抵抗を決めるので、極めて重要である。最終的に必要となるデバイスのオン抵抗に合わせるため (熱抵抗を下げる目的と併せて) ウェハバックラップなどを実施することも通常行われるが、薄膜化にも限界があるため、ウェハはなるべく低抵抗であることが望ましい。100A 以上の電流を流す低損失デバイスには、現状の SiC レベル $0.01 \Omega \text{cm}$ 、できれば $0.005 \Omega \text{cm}$ が望ましい。縦型で高出力デバイスを目指す際の抵抗率とウェハ厚みの関係を図 7 に示す。n 型は前述のように n+ 形成までハードルが高いが、p+ は既に得られているので、そのバルク化技術に焦点が絞られる。仏 CNRS のグループが、マイクロ波 CVD を高エネルギー密度 (60W/cm^3) で用いて、 $300 \mu\text{m}$ 厚の 10^{19}cm^{-3} 台の B ドープ膜を作成している[36]。これで概ね数十 Ωcm 程度と見られる。最大の問題は、B が原因で装置の中に「スス」が堆積し、マイクロ波導入窓に付着すると反射波が大きくなって危険なことであり、現状は 10^{20}cm^{-3} 台に入れた程度に留まっているところから打破する必要がある[37]。最近これを、HFCVD を用いる事によって、一桁高濃度ドーピングできた事が報告された[38]。この数値は、前述の所望される抵抗率を満足している。図 8 に、合成法の違いによる p+ 高濃度ドーピングの差を示す。合成法の違いにより、不純物の取り込みに違いができていて、原因を探ることで、MPCVD でも可能になるかもしれない。

4. デバイス

ウェハが前述の状況であるため、デバイス研究には実質的に、小型の絶縁基板しか供給されておらず、「パワー」デバイスと呼べる高耐圧・高出力デバイスの研究例は殆どなく、基礎研究段階にある。概要は既報を参照されたい[39]。

唯一多少の電圧、電流での動作が見られているのがショットキーバリアダイオードである。P 型層をドリフト層にした SBD が研究されている。コンタクトはオーミックもショットキーも時に大きな課題はない。オーミックは依然より超耐熱性が知られていて[40]、この数年

の研究でショットキーも、カーバイド[41]、非カーバイド[42]共に 400-500°C耐熱性を備えている。絶縁基板上に p 層を積層した疑似縦型で 150 $\mu\text{m}\Phi$ の小型素子で 10kV を越した高耐圧デバイスの報告例がある[2]。電界緩和構造で Al₂O₃ の FP を設けた研究例もあり、大電流については、縦型小型デバイス 1mm² で 250°C5A 動作の報告がある[43]。高温動作については、室温で出払い領域に達していないため、温度があがるとキャリア増と散乱の関係で、室温からいったん上昇し、250°C程度を境に高温側で減少する。これは高温での使用で変動が少ないという利点と、温度上昇による出力現象のトレードオフがないという利点を有する。SBD のスイッチング特性の計測も行われており、250°C動作実証したほか、15nsec の高速スイッチング、60nJ の小さなスイッチング損失が実証された[39, 44]。これを図9に示す。

ショットキーダイオードの類似デバイスでは、ショットキーpn ダイオードで n 層をドリフト層に使った試作例[45]、pin ダイオードの試作例[46]が報告されている。

トランジスタは、さらに基礎試作のみの段階である。JFET として斜め(111)面の n+層を使った変則構造で試作がなされており、ノーマリーオンでトランジスタ動作が確認されている[47]。MOSFET でもいくつか反転層を形成する試みが行われている。図 10 にダイヤモンドの表面終端の状況と各種絶縁膜のバンドアライメントを示す。SiO₂, Al₂O₃ が適しており、0 終端で試作した結果が報告されている[48]。反転側でもれ電流が大きく、まだ解釈も別れるところであろう。最新[49]では、同様の 0 終端と Al₂O₃ で界面準位密度 $3 \times 10^{13} \text{cm}^{-2} \text{eV}^{-1}$ を観測した、という報告もなされた。

5.まとめ

以上見てきたように、本稿ではダイヤモンドの現状と各技術の課題と見通しについて述べた。物性値として最も重要な絶縁破壊電界の現状観測最高値 7.7MV/cm を越すためのきちんとした素子構造での計測と高い数値の実現は不可欠である。また n 型は、さらなる低抵抗、高品質化（高移動度）が不可欠である。

ウェハに関しては、種結晶は欠陥レベルからすると $<100 \text{cm}^{-2}$ が可能であり、見通しがきく。大口径化は、モザイク方式が現状の解答となるが、単結晶プレートサイズを大きくする必要がある。その元となる低欠陥 HPHT の大口径化と、欠陥の増えない CVD コピー技術の向上は必須であり、見通しはつけられそうである。大型・高速合成可能な設備技術が不可欠である。低抵抗ウェハについては、HFCVD により p 型で高濃度できる可能性が出てきたが、これを高速成長化するか、MPCVD で同様のことを可能にする必要がある。n 型については、高品質以外に高濃度ドーブと厚膜化そのものへのトライが必要である。また本稿では省略したが、各種加工技術開発は急務である。とにかく、研究開発用の低抵抗・低欠陥ウェハ供給は急務と考えられる。

デバイスは、p 型 SBD は、絶縁破壊電界など材料物性の向上、ウェハ課題が解決されれば、問題は少ないように見える。MOS については研究開始されたばかりであり、Al₂O₃ で反転層観測 (?)、界面準位密度 $3 \times 10^{13} \text{cm}^{-2} \text{eV}^{-1}$ といった報告もあるが、今後の研究が待たれる。

引用文献

- 1) M.I.Landstrass, M.A.Plano, M.A.Moreno and S.McWilliams,
Diamond and Related Materials, 2(1993) pp.1033-1037
- 2) P.N.Volpe,P.Muret, J.Pernot, F.Omnes,T.Teraji, Y.Koide,F.Jomard,e, Appl.Phys. Lett., 97(2010)223501
- 3) P.N.Volpe, P.Muret, J.Pernot, F.Omnes,T.Teraji, F.Jomard, D.Planson, P.Brpsseard, N.Dheilly,
B.Vergne,and S.Scharnholtz, Phys.Status Solidi,A207(2010)pp.2088-2092
- 4) T.Teraji, H.Wada, M.Yamamoto, K.Arima,and T.Ito,
Diamond and Related Materials, 15 (2006) pp.602-606 7 0
- 5) M.Katagiri, J.Isoya, S.Koizumi and H.Kanda, App.Phys.Lett., 85(2004)pp.6365-636
- 6) R.Ohtani,T.Yamamoto,S.Janssens,S.Yamasaki and S.Koizumi, Apl.Phys.Lett., 105(2014) 232106
- 7) S.Shikata and H.Umezawa, Synthesiology, 6(2013)pp.152-161
- 8) B.J.Baliga, J.Appl.Phys., 53, 1759 (1982)
- 9) A.Q.Huang, IEEE Electron Device Letters, 25,298 (2004)
- 10) X. Jiang , C.P. Klages , R. Zachai , M. Hartweg , H.-J. Fusser , Appl. Phys. Lett.62 , 3438 (1993)
- 11) B.R. Stoner , J.T. Glass , Appl. Phys. Lett. 60 , 698 (1992)
- 12) K. Ohtsuka , K. Suzuki , A. Sawabe , T. Inuzuka , Jpn. J. Appl. Phys. 35 , L1072(1996)
- 13) S.Washiyama, S.Mita,K.Suzuki and A.Sawabe, Appl.Phys.Exp.,4(2011)095502
- 14) C.Stehl, M.Fischer, S.Gsell and M.Schreck, Appl.Phys.Lett., 103(2013)151905
- 15)C.Stehl, M.Fischer, S.Gsell, E.Berdermann, M.S.Rahman, M.Traeger, O.Kleain, M.Schreck,
Appl.Phys.Lett., 103(2013)151905
- 16) Y. Mokuno , A. Chayahara, Y. Soda, H. Yamada, Y. Horino, N. Fujimori,
Diamond & Related Materials 15,455 (2006)
- 17) 鹿田、梅澤、加藤、大曲、山田、坪内、杵野、茶谷原、第 27 回ダイヤモンドシンポジウム p220(2013)
- 18) Y. Mokuno, A. Chayahara and H. Yamada, Diamond and Related Materials 17,415 (2008)
- 19) H.Yamada, A.Chayahara, H. Umezawa, N. Tsubouchi, Y. Mokuno and S.Shikata ,
Diamond and Related Materials 24 (2012) pp.29-33
- 20) H. Yamada , A. Chayahara , Y. Mokuno , N. Tsubouchi , S. Shikata ,
Diam. Relat.Mater. 33 , 27 (2013)
- 21) H.Yamada, A.Chayahara, Y.Mokuno, Y.Kato and S.Shikata, Appl. Phys. Lett. 104 , 102110 (2014)
- 22) 鹿田、弾性波デバイス技術、オーム社、第三章
- 23) F. Silva , X. Bonnin , J. Achard , O. Brinza , A. Michau , A. Gicquel ,
J. Cryst.Growth 310 , 187 (2008)
- 24) K.W. Hemawan , T.A. Grotjohn , D.K. Reinhard , J. Asmussen ,
Diam. Relat. Mater. 19 , 1446 (2010)
- 25)M.Schreck, J.Asmussen, S.Shikata, J.C.Arnault and N.Fujimori, MRS Bulletin39(2014)pp.504-510

- 26) H.Umezawa, Y.Kato, H.Watanabe, A.M.M.Omer, H.Yamaguchi and S.Shikata,
Diamond and Related Materials, 20, (2011), pp.523-526
- 27) N.Fujita, A.Blumenau, R.Jones, S.Oberg and P.R.Bridson, *phys.stat.sol.*, 203(2006)pp3070-3075
- 28) Y.Kato, H.Umezawa, H.Yamaguchi and S.Shikata, *Diamond and Related Materials*, 29(2012)pp37-41
- 29) Y.Kato, H.Umezawa, H.Yamaguchi and S.Shikata, *Jap.J.Appl.Phys.*, 51(2012)090103
- 30) Y. Kato, H.Umezawa, S.Shikata and M.Touge, *Applied Physics Express*, 6 (2013)025506
- 31) 田川, 峠, 坂本, 鹿田, 山田, 加藤、精密工学会誌, 80, (2014) pp. 587-591
- 32) S.Kono, T.Teraji, H.Kodama and A.Sawabe, *New Diamond and Nano Carbons 2015, Proc.*, p225(2015)
- 33) H.Sumiya, N.Toda, S.Satoh, *J.Crystal Growth*, 237-239(2002) 1281
- 34) M.Kasu, R.Murakami, S.Masuya, K.Harada and H.Sumiya, *Appl.Phys.Exp.*, 7(2014)125501
- 35) Y. Mokuno, Y Kato, N. Tsubouchi, A. Chayahara, H. Yamada, and S. Shikata,
Applied Physics Letters, 104 (2014) 252109
- 36) J.Achrard, F.Silva, R.Issaoui, O.Brinza, A.Tallaire and A.Gicquel,
Diamond and Related Materials, 20 (2011)pp.145-152
- 37) S.N.Demlow, R.Rechenberg and T.Grotjohn, *Diamond and Related Materials*, 19 (2014)pp.19-24
- 38) S.Ohmigari, K.Srimongkon, H.Yamada, H.Umezawa, N.Tsubouchi, A.Chayahara and S.Shikata,
Int'l Conf.New diamond and Nano Carbons, May 24 Shizuoka (2015)Proc., 128
- 39) 鹿田、応用物理、82 (2013) pp. 299-304
- 40) Y..Nishibayasi, N.Toda, H.Shiomi, and S.Shikata, *4th Int'l Conf. New Diamond Sci.Technol.*,
717(1994)
- 41) M.Liao, J.Alvarez and Y.Koide, *Diamond and Related Materials*, 14,2003(2005)
- 45) K. Ikeda, H.Umezawa, K.Ramanujam, and S.Shikata, *Appl.Phys.Express*, 2, 011202 (2009)
- 43) H.Umezawa, Y.Kato and S.Shikata, *Applied Physics Express*, 6 (2013) 011302
- 44) T.Funaki, M.Hirano, H.Umezawa and S.Shikata, *IEICE Electronics Express*, 6, (2012) 011302
- 45) T.Makino, K.Oyama, H.Kato, D.Takeuchi, M.Ogura, H.Okushi and S.Yamasaki,
Jap.J.Appl.Phys., 53 (2014) 05FA12
- 46) M.Suzuki, T.Sakai, T.Makino, H.Kato, D.Takeuchi, M.Ogura, H.Okushi and S.Yamasaki,
phys.sta.sol., 210 (2013)p2035
- 47) T.Iwasaki, Y.Hoshino, K.Tsuzuki, H.Kato, T.Makino, M.Ogura, D.Takeuchi, T.Matsumoto,
H.Okushi, S.Yamasaki and M.Hatano, *Applied Physics Express* 5 (2012) 091301
- 48) K.Kovi, O.Vallin, S.Majdi and J.Isberg, *IEEE Electr.Dev.Lett.*, 36(2015)pp.603-605
- 49) J.Pernot, A.Marechal, T.Pham, G.Chicot, D.Eon, E.Gheeraert, and P.Muret,
New Diamond and Nano Carbons, May 24 Shizuoka Proc., p114 (2015)

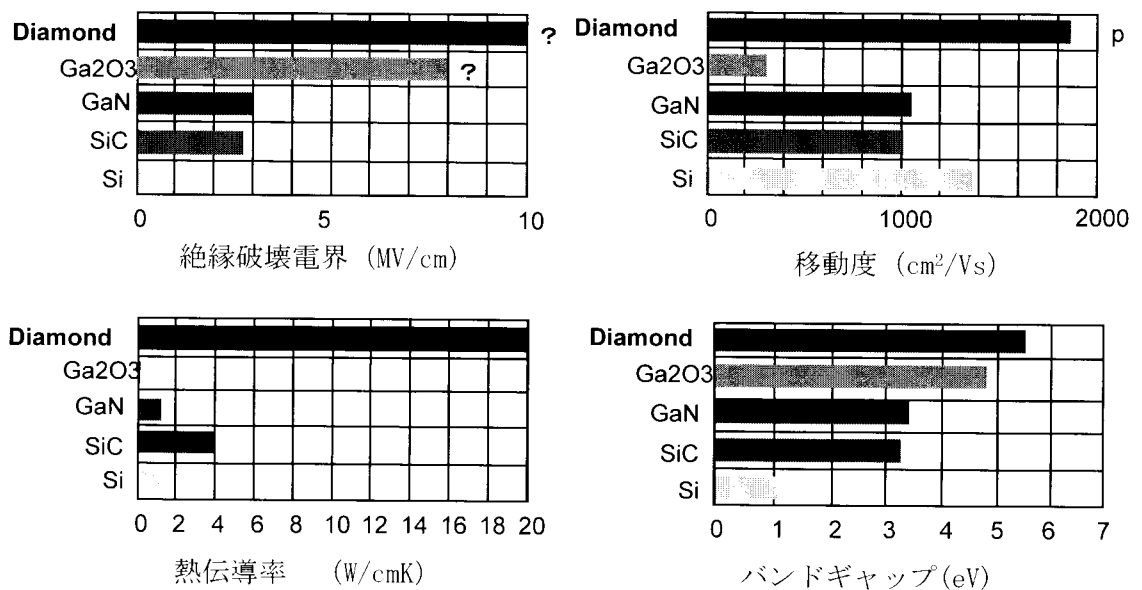


図1 各種材料の物性比較

表1 ダイヤモンドの電気的性質

バンドギャップ	5.48eV
抵抗率	$10^{-3} \sim 10^{14} \Omega \text{ cm}$
誘電率	5.7 (300K)
絶縁破壊電界	7.7MV/cm (デバイスでの観測例あり) 20MV/cm (実測報告例あり)
飽和ドリフト速度	$1.1 \times 10^7 \text{ cm/s}$
アクセプタ	B 0.36eV
ドナー	P 0.57~0.6eV
電子移動度(P)	$660 \text{ cm}^2 \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-1}$ (室温)
ホール移動度(B)	$1870 \text{ cm}^2 \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-1}$ (室温)
電子親和力	+0.5eV (100)2×1) -1.3eV (100)2×1:H終端) +1.7eV (100)1×1:O終端)

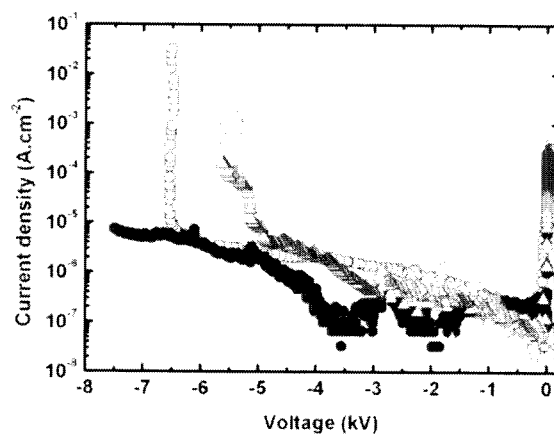


図2 絶縁破壊電界の実証例
(白、赤はフロリナート中、
青は真空中の計測)

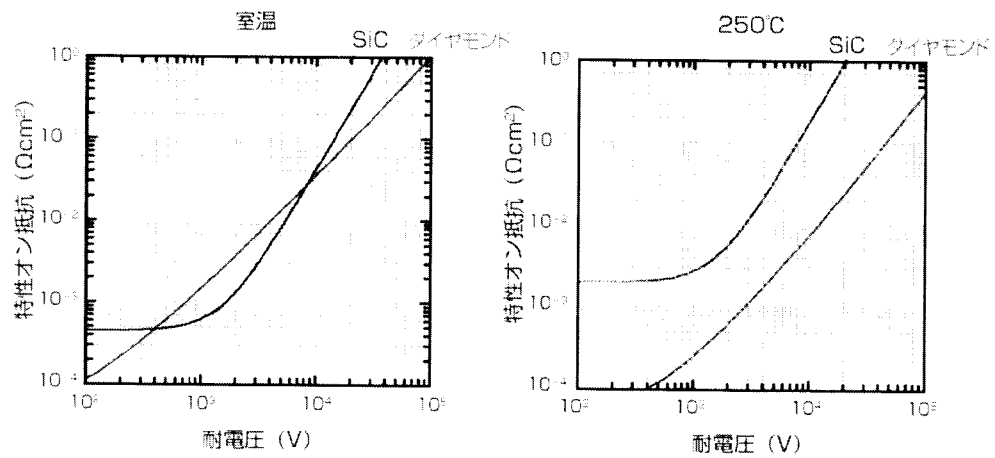


図3 SiCとダイヤモンドの特性オン抵抗の温度依存性

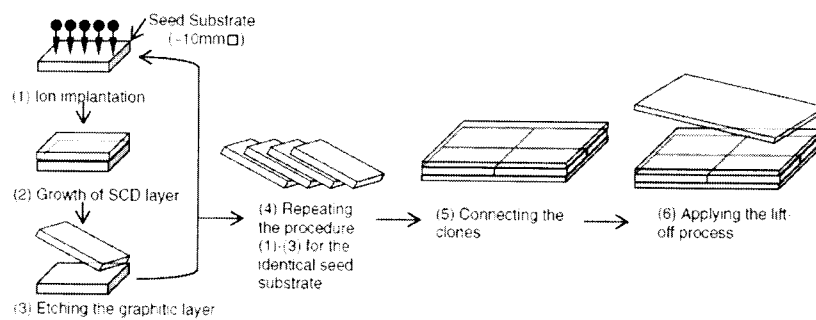


図4 モザイク単結晶の作製プロセスフロー図

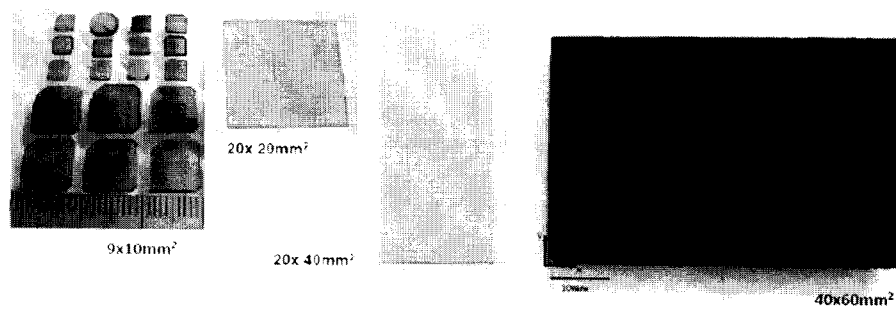


図5 モザイク単結晶の大型化の変遷
(40x60mm²以外は、リフトオフ済のウェハ)

表2 ダイヤモンドの貫通欠陥の例

	Dislocation vector t	Burgers vector b ($a/2\langle 110 \rangle$)
	$[001]$	$\pm a/2[110]$ $\pm a/2[1\bar{1}0]$
Edge dislocation	(001)	$\pm[1\bar{1}0]$ $\pm a/2[110]$
	in plane	$\pm[110]$ $\pm a/2[1\bar{1}0]$
	$[001]$	not applicable
Screw dislocation	(001)	$\pm[1\bar{1}0]$ $\pm a/2[110]$
	in plane	$\pm[110]$ $\pm a/2[1\bar{1}0]$
Mixed dislocation (45°)	$[001]$	$\pm a/2[101]$ $\pm a/2[1\bar{1}0]$ $\pm a/2[011]$ $\pm a/2[0\bar{1}1]$
	(001)	$\pm[100]$ $\pm a/2[110]$ $\pm a/2[1\bar{1}0]$
	in plane	$\pm[010]$ $\pm a/2[110]$ $\pm a/2[1\bar{1}0]$
	$[001]$	not applicable
Mixed dislocation (60°)	(001)	$\pm[1\bar{1}0]$ $\pm a/2[101]$ $\pm a/2[011]$
	(001)	$\pm[110]$ $\pm a/2[101]$ $\pm a/2[011]$
	in plane	$\pm[110]$ $\pm a/2[101]$ $\pm a/2[011]$

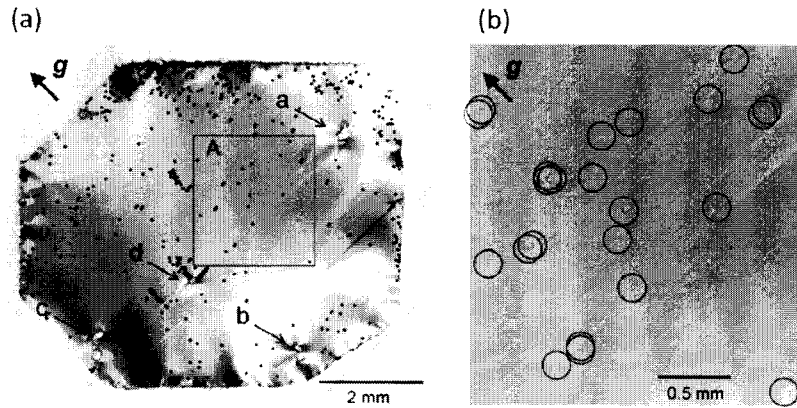


図6 低欠陥種結晶をコピーして作成した低欠陥CVD単結晶

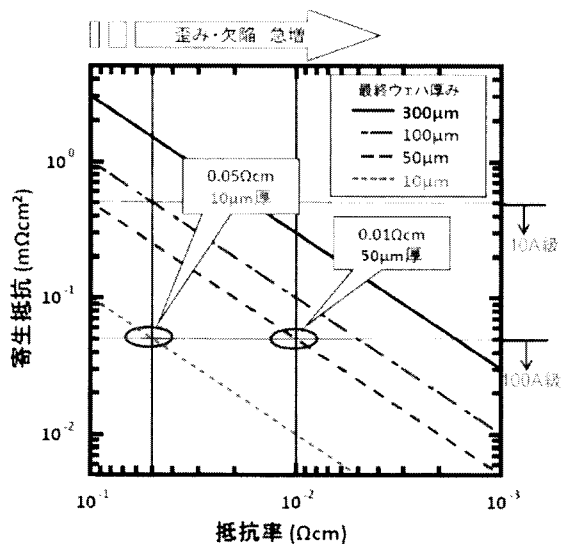


図7 縦型で高出力デバイスを目指す際の抵抗率とウェハ厚みの関係

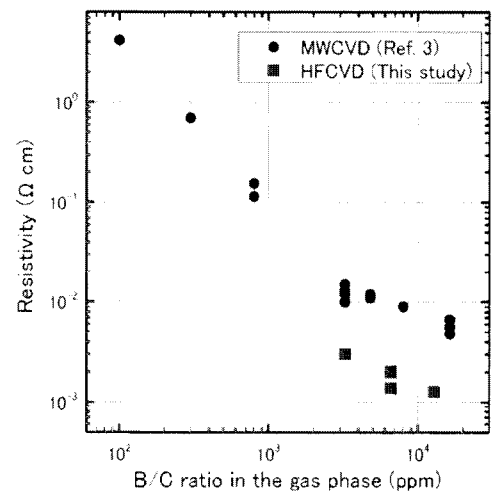
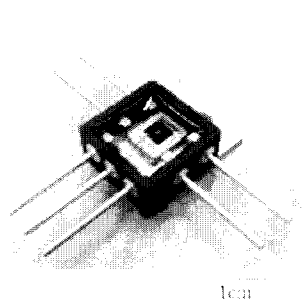
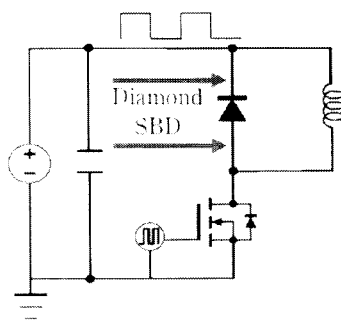


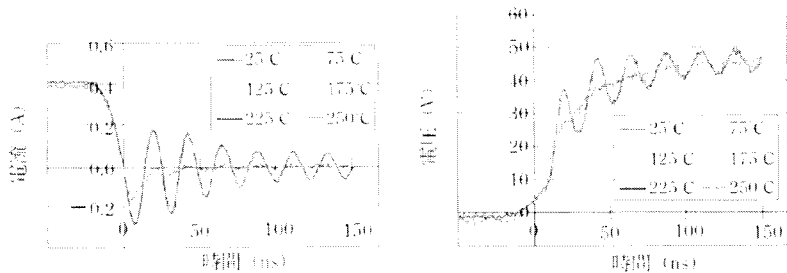
図8 合成法の違いによるp+高濃度ドーピングの差



(a) 超耐熱SBD外観



(b) 測定回路構成 (ダブルパルス法)



(c) スイッチング特性

図9 ショットキーダイオードのスイッチング特性

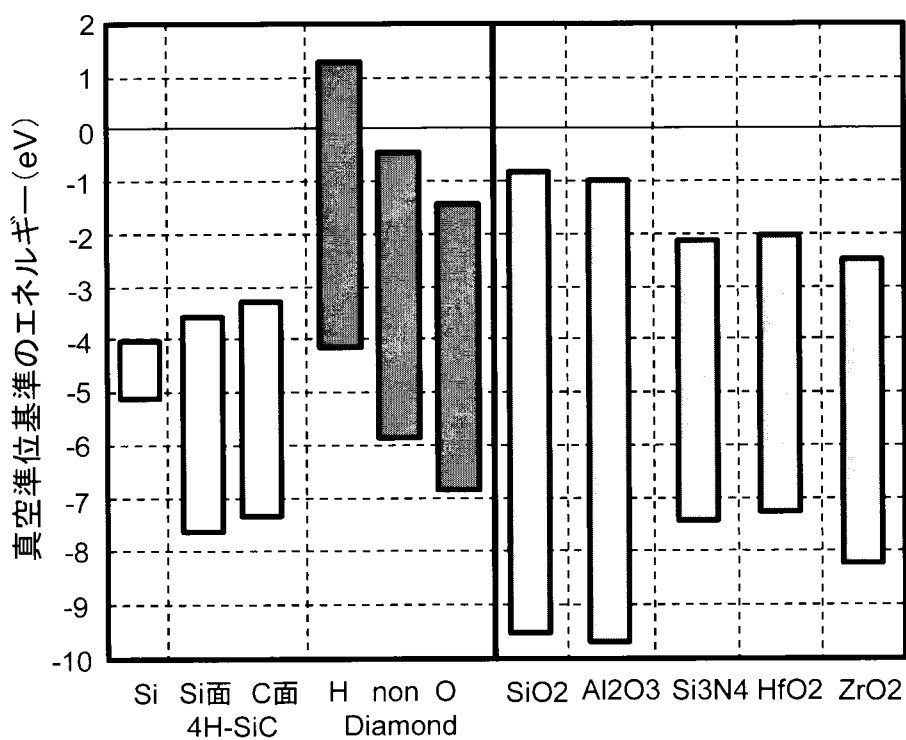


図10 MOS用絶縁膜のバンドアライメント