

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 2 日現在

機関番号：17401

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2011～2013

課題番号：23360070

研究課題名(和文) 省エネパワーデバイス用ダイヤモンドウェハ実現のための紫外光支援加工技術の開発

研究課題名(英文) Development of UV-Assisted Polishing Technology to Realize Diamond Wafer for Power Electronic Devices

研究代表者

峠 睦 (TOUGE, Mutsumi)

熊本大学・先進マグネシウム国際研究センター・教授

研究者番号：00107731

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 14,500,000円、(間接経費) 4,350,000円

研究成果の概要(和文)：単結晶ダイヤモンドはワイドギャップ半導体としての性質を有するため、パワーデバイスへの応用が期待されている。しかし、ダイヤモンドは非常に高い硬度を有し、熱的、化学的にも安定であるため加工が極めて困難な材料である。我々は単結晶ダイヤモンドの高精度加工技術として紫外光励起を援用した超精密研磨技術を試作開発し、優れた到達面粗さや高い研磨レートを実現していることを確認している。本研究では、これまで明らかにしてきたUVアシスト研磨法がダイヤモンドウェハの研磨に適用可能かどうかを、到達粗さ、モザイクウェハへの適用の可否および加工ひずみの発生の観点から明らかにした。

研究成果の概要(英文)：Diamond materials are expected to be used as future substrates for power devices because they have excellent material properties. On the other hand, etching and mechanical processing are very difficult because of the chemical and physical properties of diamond. As device materials must be polished without crystallographic distortion beneath a polished substrate, simplified planarization techniques accompanied are especially required. Ultraviolet rays excited polishing of single crystal diamond substrates has been studied in our laboratory, and the UV-assisted polishing characteristics, such as a higher polishing rate and superior final surface roughness, have been revealed. By using these polishing techniques, we can use diamond as a substrate material for future power devices because we are able to polish a mosaic wafer, and minimize the occurrence of dislocation on the polished substrate.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学・生産工学・加工学

キーワード：ダイヤモンドウェハ 紫外線照射研磨 紫外光励起 超精密研磨 ダイヤモンド基板 転位 仕上げ面粗さ

1. 研究開始当初の背景

単結晶ダイヤモンドは不純物の添加により電気特性を制御でき、ワイドギャップ半導体としての性質を有するため、パワーデバイスへの応用が期待されている。半導体材料として近年開発が進んでいる炭化ケイ素 (SiC) や窒化ガリウム (GaN) に比べダイヤモンドは高い熱伝導性、絶縁破壊電界強度などを有しており、優れた省エネ効果など付加価値の大きな半導体を実現することができる。半導体材料はひずみのない研磨面であることが必須条件であり、より高品位な平坦化研磨加工技術が必要とされる。しかし、ダイヤモンドは非常に高い硬度を有し、熱的、化学的にも安定であるため加工が極めて困難な材料であり、加工やエッチングが困難である。特に、化学的な作用を複合的に与えて超精密研磨を行う CMP 技術の適用はほとんど報告されていない。熱化学反応を利用した研磨およびレーザーやイオンビーム、放電など的高エネルギービームを用いた研磨など、さまざまな方法が研究されてきた。熱化学反応を利用した方法の多くは、1000℃近い高温領域での反応を利用するため実験装置が大規模になり、コスト面での実用化は難しい。

我々は単結晶ダイヤモンドをはじめ PCD（多結晶ダイヤモンド焼結体）や SiC などの難加工材料に対する高精度加工技術として、紫外光励起を援用した超精密研磨技術（以下、UV アシスト研磨）を試作開発し、優れた到達面粗さや高い研磨レートを実現していることを確認している。

2. 研究の目的

本研究では、これまで明らかにしてきた UV アシスト研磨法がデバイスに用いられるダイヤモンドウェハの研磨に適用可能かどうかを、

- ① 到達仕上げ面粗さのレベル
- ② 基板サイズがこれまでの十倍以上に大きくなるモザイクウェハへの適用の可否

- ③ 研磨に伴う加工ひずみが発生しないことの証拠として転位増加がないこと
- の3点から明らかにすることを目的とした。

3. 研究の方法

(1) 10 mm 角までのダイヤモンドウェハの UV アシスト研磨に用いた横型 UV アシスト研磨装置を図 1 に示す。高速に回転させたダイヤモンド試料と石英を接触させ、接触部に紫外光を照射しながら加工が進行する。UV アシスト研磨のメカニズムは、①放電除去 ②酸化除去であり、この二つの複合的な作用によると考えている。要約すると以下のようになる。

- ① 放電除去：本研究で使用するダイヤモンドと石英はともに絶縁性の非常に高い物質であり、摩擦接触部分では摩擦新生面で発生する帯電が高電界を引き起こし、トライボマイクロプラズマが発生する。この微小な放電の集積によりダイヤモンドは除去される。
- ② 酸化除去：ダイヤモンドのバンドギャップエネルギー以上 ($\lambda \leq \text{約 } 225 \text{ nm}$) の光を照射すると、ダイヤモンド中の電子が荷電子帯から伝導帯に励起し、電子とホール（正孔, hole）の対が形成される。この電子とホールはそれぞれ空気中の酸素や水分子と反応し、寿命は短いものの酸化力が極めて強い活性酸素種やヒドロキシラジカルが発生する。これらの活性種がダイヤモンド表面の炭素原子を酸化し、CO ガスとして放出し、研磨が進行する。

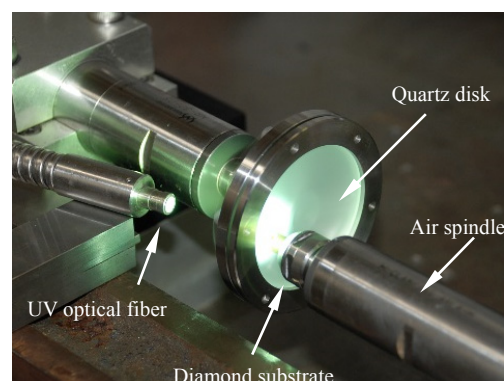


図 1 横型 UV アシスト研磨装置の写真

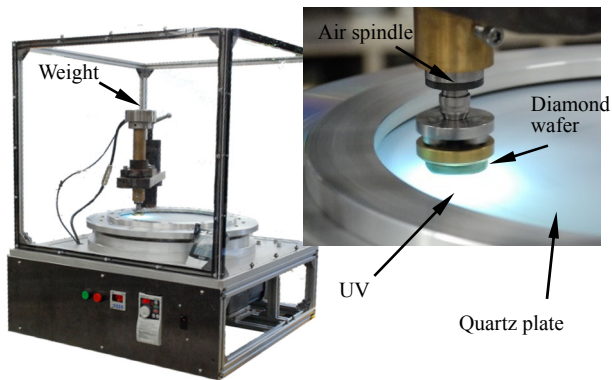


図2 ダイヤモンドウェハ研磨用の大型紫外線援用研磨装置の写真

(2) 大口径試験では 10 mm 角, 厚さ 1 mm, (100)面の単結晶ダイヤモンドウェハ, 複数枚のウェハを接合させ 20 mm 角まで大口径化した(100)面ダイヤモンドウェハ (以下, モザイクウェハ) の 2 種類を使用し, 欠陥測定試験では 4.5 mm 角, 厚さ 1.5 mm の I b(100)面の試料を用いた. 試料の大口径化に対応するため, 図 2 に示す自作した縦型研磨装置を新たに製作した. 相対速度の向上のため, 石英を直径 50 mm から直径 350 mm に変更した. また, UV アシスト研磨の研磨レートや到達面粗さは研磨部の雰囲気状態に依存するため, 研磨中の湿度や酸素濃度を大型密閉容器を作成して定常化し, 研磨の安定化を図った. 石英板の下側から UV を照射し, ダイヤモンドウェハを石英に 0.3 MPa の圧力で押し付け, 互いに同一方向に回転させた. 石英は直径 350 mm, 厚さ 5 mm であり, 波長 200 nm 付近での UV 透過率は約 90% である. UV 光源としてウシオ電機製 UV 照射装置 SP-9 を 3 本用いており, 光ファイバー出口での照度は 260 mW/cm² であるが, ウェハ表面では石英板および空気により吸収されるため約 200 mW/cm² まで減衰する. 測定機器に光学顕微鏡, 走査型白色干渉計 (以下 Zygo), 原子間力顕微鏡, X 線トポグラフィを用いた.

(3) デバイス作製用の半導体ウェハには大面積化が求められる. 1 つの種結晶からは 10 mm 角のダイヤモンドウェハを作り出すことができ, 更なる大口径化に対応すべく, モ

ザイクウェハの作製が行われている. モザイクウェハとは複数の単結晶ダイヤモンドを接合し, それを成長させることで大面積化したウェハのことである. 接合部表面にはうねりや傷が存在する. 本研究では, 第一にマイクロ波プラズマ CVD 法により作製された 10 mm 角ウェハに対して UV アシスト研磨を適用した. 次に, モザイクウェハの研磨実験では UV アシスト研磨後の接合部を観察し, その後 20 mm 角のモザイクウェハの全面研磨を行った.

(4) 半導体デバイスのウェハとして利用するためには優れた表面粗さの獲得はもちろんのこと, ウェハの転位密度が重要になってくる. ウェハをエピタキシャル成長させた場合, 転位の引継ぎやウェハとエピタキシャル薄膜界面での格子不整合により新たな転位が発生するため, エピタキシャル薄膜内では転位が増加する傾向にある. エピタキシャル薄膜に転位を有した場合, 半導体としての性能低下や動作不良を引き起こすため, デバイスとして利用するウェハの転位密度は重要な問題である. そのため, ウェハ表面に存在する転位密度が UV アシスト研磨により増加しないことを確かめるため, 研磨前後の X 線トポグラフィ像を観察した.

4. 研究成果

(1) 10 mm 角ダイヤモンドウェハに対して, UV アシスト研磨した時の研磨前後の表面粗さを図 3(a)~(d)に示す. 図 3(a)の Zygo のステッピング像からわかるように, 本試料はウェハ中心部が低く, 外周部から研磨が進行している. 9.5 hr の UV アシスト研磨により, 試料全体のうねりや, スカيف痕, 凹凸を取り除くことができた. また, 図 4(d)の微小領域の観察結果から, うねりの大きな研磨痕が取り除かれた後に微小な凹凸が除去されて平滑な面が得られることがわかる. 図 4 に 11 hr 研磨後の表面を AFM により測定した結果を示

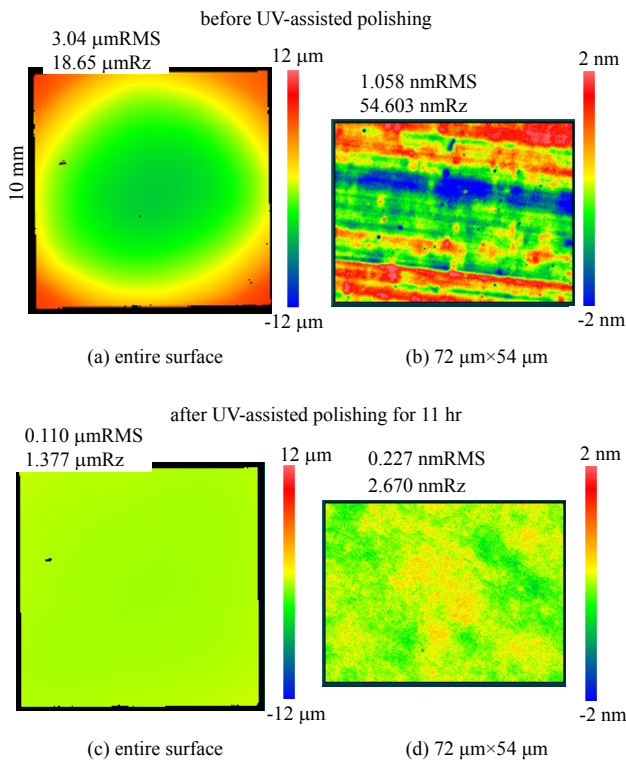


図3 UV アシスト研磨時間の進行に伴うダイヤモンドウエハ表面の Zygo 像

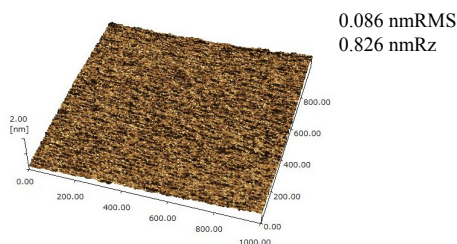


図4 UVアシスト研磨を11時間行った基板表面の AFM 像(観察領域:1.0 μm×1.0 μm)

す。この結果より 0.086 nmRMS, 0.826 nmRz の非常に良好な値が得られ、デバイス用途に必要な 0.2 nm 程度の表面粗さが達成できたことがわかる。

(2) 次に、モザイクウエハの接合部に対する UV アシスト研磨の可否について調べた。ここで用いた試料のうねりは大きく、観察箇所まで平坦化されるのに 69 hr という長い研磨時間を要した。研磨前には接合部中心から左右に 200 nm 程度の高低差が存在していたが、UV アシスト研磨後には、うねりや傷が取り除かれ、フラットな面を得ることができた。そ

の後、77 hr の研磨では微小な凹凸が取り除かれ、さらに平滑な面が得られている。この結果より、モザイクウエハに対して UV アシスト研磨を行い、接合部に割れや欠けなどのダメージが生じることなく、単体の種基板と同様に UV アシスト研磨できることが確認できた。

(3) 図2および図3に示した大型 UV アシスト研磨装置を用い、21.3 mm×16.7 mm×0.7 mm のモザイクウエハを酸素 100% の条件下で UV アシスト研磨を 33 hr 行った。Zygo による測定画像を図5に示す。図5(a)(b)を比較すると、研磨前に存在した大きなうねりは取り除かれ、平坦化されていることがわかる。また、図5(c)は全高さデータの累積ヒストグラムを示す。本試料はうねりの方向が一方向でないことから、ラインプロファイルでは特徴が示せないため、高さデータの累積ヒストグラムを用いた。研磨前は、-4 μm から 3 μm までゆるやかに増加しているのに対し、研磨後は -0.5 μm から 0.5 μm の範囲に収束している。このことからも全体が平坦になっていることがわかる。中心付近の微小領域の測定画像を図5(d)(e)に、外周部(端部から 1 mm)の微小領域の測定画像を図5(f)(g)に示す。試料の外周部、中心部に関係なく、研磨前に存在したスクラッチや凸部は取り除かれ、表面粗さが向上しており、両者に大きな差異はない。また、接合部に割れなども生じることなくモザイクウエハの全面研磨に成功した。

(4) 図2に示した研磨装置を用い、UV アシスト研磨を 93 hr 行った。ウエハは 4.5 mm 角のものを使用した。UV アシスト研磨前後の X 線トポグラフィー像(以下、XRT 像)を図6(a)~(d)に示す。図6(a)(b)は試料全体の研磨前後の像であり、図6(c)(d)は枠で囲った領域を拡大した像である。図6(c)(d)を比較すると丸で囲んだ部分の転位が取り除かれている。成長前の種結晶に存在する転位は成長後のウエハにも引き継がれる。そのため、研磨による削

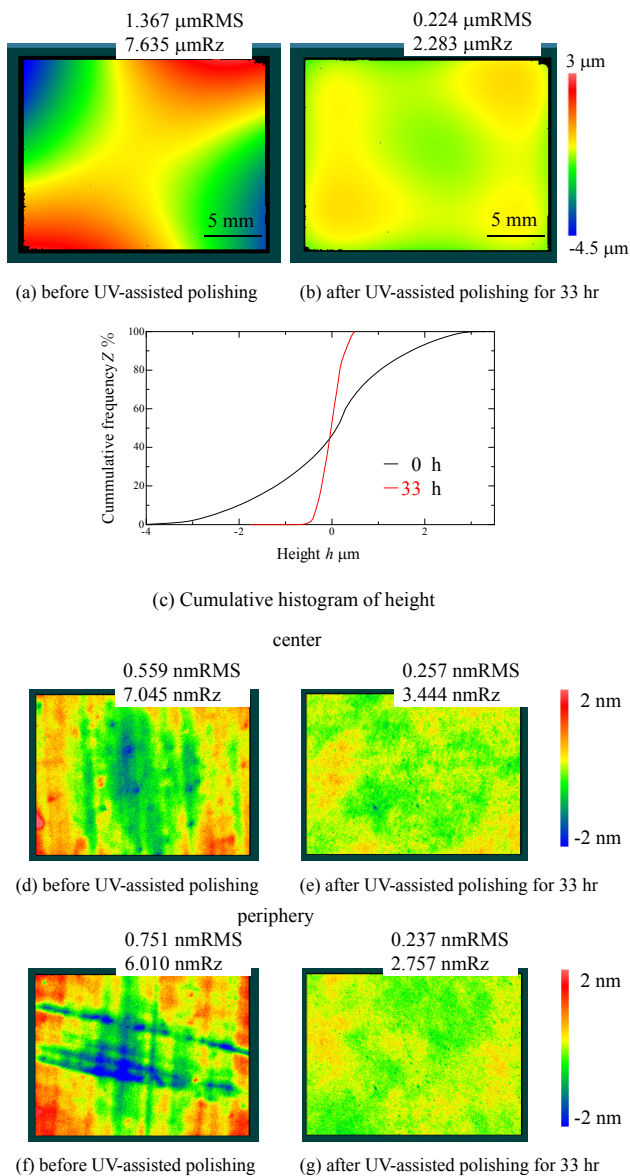


図5 33時間UVアシスト研磨したモザイクウェハのZygo像((d)~(g)の観察領域: 72 μm×54 μm)

除量では取り除くことができない転位がほとんどであるが、丸で囲んだ部分は成長途中から発生した比較的浅い転位のため、取り除かれたと考えられる。一方、研磨によって転位が発生した場合は新たにコントラストが発生するが、研磨後のX線トポグラフィ像では研磨前と同じ箇所のみコントラストが認められる。以上よりUVアシスト研磨による新たな転位の導入はないと判断できる。石英はダイヤモンドに比べて非常に軟質であるため、研磨後の表面に転位を新たに発生させないことがわかった。

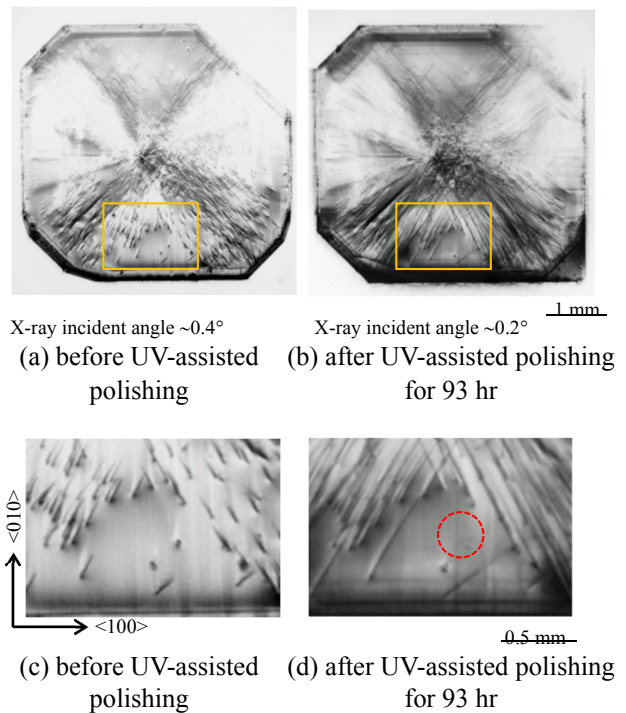


Fig.6 UVアシスト研磨したダイヤモンド基板のXRT像

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計8件)

1. 田川智彦, 峠 睦, 坂本武司, 鹿田真一, 山田英明, 加藤有香子, デバイス用ダイヤモンドウェハのUVアシスト研磨に関する研究, 精密工学会誌, 査読有, 80巻, 6号, 2014, 印刷中.
2. 坂本武司, 稲木 匠, 小田和明, 峠 睦, 藤田 隆, 4インチSiC基板のUVアシスト研磨に関する研究, 砥粒加工学会誌, 査読有, 58巻, 4号, 2014, 235-240.
3. 峠 睦, 長野拓義, 田川智彦, 坂本武司, 横井裕之, 岩本知広, 渡邊純二, 紫外光励起による単結晶ダイヤモンドの研磨メカニズムに関する研究, 精密工学会誌, 査読有, 80巻, 1号, 2014, 112-116.
4. 石丸大祐, 坂本武司, 神崎成広, 峠 睦, UVアシスト研磨によるCVDダイヤモンド膜付超硬工具切れ刃の鋭利化と切削性能評価, 精密工学会誌, 査読有, 79巻, 12号,

2013, 1235-1239.

5. Junji Watanabe, Mutsumi Touge, Takeshi Sakamoto, Ultraviolet-Irradiated Precision Polishing of Diamond and Its Related Materials, *Diamond & Related Materials*, 査読有, Vol.39, 2013, 14-19.
6. 坂本武司, 南部陽亮, 齋藤廉平, 峠 睦, 川下智幸, 峠 直樹, ダイヤモンド砥粒整列ブロックの UV ツルーイング技術の開発, 砥粒加工学会誌, 査読有, 57 巻, 9 号, 2013, 600-604.
7. 坂本武司, 久保田章亀, 峠 睦, 2 インチ SiC 基板の紫外光支援研磨に関する研究, 砥粒加工学会誌, 査読有, 57 巻, 8 号, 2013, 524-529.
8. Y. Kato, H. Umezawa, S. Shikata, M. Touge, Effect of an Ultraflat Subsurface on the Epitaxial Growth of Chemical-Vapor-Deposited Diamond, *Appl. Phys. Express*, 査読有り, Vol.6, 2013, 0225506.

[学会発表] (計 7 件)

1. 神崎成広, 坂本武司, 峠 睦, UV 鋭利化技術により高度化されたダイヤモンド工具による超精密切削, 2013 年度精密工学会秋季大会学術講演会, 関西大学, 平成 25 年 9 月 12-14 日
2. 稲木 匠, 小田和明, 坂本武司, 峠 睦, 久保田章亀, UV アシスト研磨による大口径 SiC 基板の高効率加工技術の開発, 2013 年度精密工学会秋季大会学術講演会, 関西大学, 平成 25 年 9 月 12-14 日
3. 田川智彦, 峠 睦, 久保田章亀, 坂本武司, 鹿田真一 (産総研), 山田英明 (産総研), 加藤有香子 (産総研), 大口径ダイヤモンドウエハへの UV アシスト研磨技術の開発, 2013

年度精密工学会秋季大会学術講演会, 関西大学, 平成 25 年 9 月 12-14 日

4. 南部陽亮, 齋藤廉平, 坂本武司, 峠 睦, 峠 直樹 (ノリタケカンパニーリミテド), 川下智幸 (佐世保高専), 砥粒整列ダイヤモンド砥石の UV ツルーイング技術の開発とその加工性能評価, 2013 年度精密工学会秋季大会学術講演会, 関西大学, 平成 25 年 9 月 12-14 日

[図書] (計 2 件)

1. 峠 睦, ダイヤモンド基板およびその関連材料の UV アシスト研磨, *NEW DIAMOND*, 29 巻, 3 号, 2013, 7-12.

[その他]

研究室ホームページ

<http://www.mech.kumamoto-u.ac.jp/Info/lab/prec/tkgroup/index.html>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

峠 睦 (TOUGE, Mutsumi)

熊本大学・先進マグネシウム国際研究センター・教授

研究者番号: 00107731

(2) 連携研究者

久保田 章亀 (KUBOTA, Akihisa)

熊本大学・大学院自然科学研究科・准教授)

研究者番号: 80404325

中西 義孝 (NAKANISHI, Yoshitaka)

熊本大学・大学院自然科学研究科・教授

研究者番号: 90304740