

令和元年8月30日現在

機関番号：12101

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2015～2018

課題番号：15H02213

研究課題名(和文)単結晶サファイアの「機械+化学」ハイブリッド先進加工および評価技術の開発

研究課題名(英文)Development of mechanical + chemical hybrid manufacturing technology of sapphire crystal wafer

研究代表者

周立波(ZHOU, LIBO)

茨城大学・理工学研究科(工学野)・教授

研究者番号：90235705

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 33,100,000円

研究成果の概要(和文)：単結晶サファイアが機械強度、化学安定性、光学透過性など優れた物理特性を持ち、LEDを始め、半導体、電子機器、光学素子等の分野に応用が急増している。それに伴い基板材である単結晶サファイアウエハの高効率、高精度加工に加えて高品位な加工技術が求められている。本研究は研削プロセスに化学反応を融合したCMG(Chemo-Mechanical Grinding)技術を基盤に、単結晶サファイアウエハの形状精度、加工能率と表面品位を並立したOne-stop超精密・無欠陥加工技術の開発、確立を目的に、反応性を有するCMG砥石の開発、サファイア特性に基づく除去メカニズムの解明、及び関連計測・評価技術の開発を行う。

研究成果の学術的意義や社会的意義

現行の硬脆材料の超精密加工技術体系は、延性モード除去メカニズムに基づいて構築されている。延性モードでは転位発生、増殖により加工変質層が必ず形成され、その応力と結晶歪みによりその上に成長するエピ層の電子特性が大きく劣化する。

本研究では、機械加工に化学反応を融合したハイブリッドプロセスを開発した。超精密・高精度である機械加工の特長を継承しながら、従来の応力場での材料除去と異なり、表面と亜表面に原子配列を乱すことなく、完全表面の生成が可能である。この異種相互補完加工技術の融合により、現在の加工技術のブレークスルーだけでなく、学術面においても被削材の化学物理特性を生かした新加工技術の基盤が構築できる。

研究成果の概要(英文)：Mono-crystal sapphire (-Al₂O₃) is a multi-functional material with excellent physical and chemical properties and has been widely applied in optical and electronic products such as light emitting diodes (LEDs) and cover-glass for mobile devices. However, -Al₂O₃ is very difficult to be finished because of its "excellent" physical strength and chemical stability.

This study has developed the fixed-abrasive CMG (Chemo-mechanical-grinding) process by integrating both chemical reaction and mechanical grinding into a one-stop process, which shows advantages in finishing efficiency, geometric controllability, and waste disposal. The research project involves manufacturing process development of BAP (binder-free abrasive pellets) for CMG wheel, elucidation of the removal mechanism of sapphire based on its material property, and related metrology methods for remote monitoring of process and evaluation of the sub-surface damage of processed sapphire wafers.

研究分野：生産工学・加工学

キーワード：切削・研削加工 CMG サファイア ハイブリッド加工

様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

赤崎勇, 天野浩, 中村修二氏が青色発光 LED を開発した功績で 2014 年ノーベル物理学賞を受賞された。1962 年に最初の赤色発光 LED が Nick Holonyak Jr. によって報告されて以来半世紀が経ち、その間、省エネ、長寿命などの特長を背景に、LED が単なる表示デバイスの役割を超え、LCD バックライト、自動車用ヘッドライト、一般照明などの応用製品が次々開発された。その市場が 2015 年に 135 億ドルに達すると予想されている。

高輝度青色 LED の開発過程は、いわば良質な GaN 結晶開発の奮闘記であった。1986 年に赤崎氏らは単結晶サファイア ($\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$) 基板上に GaN をエピタキシャル成長させて良質な結晶膜を作る技術を編み出した。後に中村氏が発明したツー・フロー MOCVD 法により、良質な GaN 結晶を安定して量産できるようになった。ここで使用する $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ 基板の表面性状は、その上に成長する GaN 膜の品質に直接的影響を及ぼすため、原子レベルの平坦性が要求される。現在最終仕上げ工程では、コロイダルシリカを用いた化学機械研磨(CMP)によって原子的平坦かつ無じょう乱のウエハ表面が得られているが、 $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ は化学的安定でかつダイヤモンドに次ぐ硬度を持つため、CMP の加工能率が $1\sim 3\mu\text{m/hr}$ と極めて低く、多くの課題が残っている (H. Aid, et al. *Curr. Appl. Phys.*, 2012)。さらにスマートフォンのカバーケースに使われ始めたため、 $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ ウエハの大口径化に伴い、超精密加工の問題が一層顕在化になった。

一方生産工学・加工学の分野では、研削加工は、運動転写原理に基づく形状創成能力が高く、個々の砥粒の切込量を比削材の亀裂発生臨界値以下に制御した、いわゆる延性モード加工技術によりクラック・フリーの表面創成を可能にしている。しかしながら延性モードでは、転位の発生、成長、増殖に伴う塑性すべりが生ずるため、原理上は比削材表面に必ず加工変質層が形成される。加工変質層は、内部応力や物性が単結晶とは異なるため、最終仕上げ工程で除去しなければならない。この加工変質層の除去(ストレス・リリーフ)は、遊離砥粒を使う CMP 加工に頼っているのが現状である。CMP 加工は加工能率が低く加工時間が長いことに加えて、圧力転写原理に基づくため、加工時間に伴い平坦度の劣化を招く。したがって、固定砥粒加工のみで加工変質層の無い (あるいはほとんど無い) $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ ウエハの表面創成技術が生産加工分野で求められている。

2. 研究の目的

本研究は、申請者らがこれまで行ってきた基盤研究(B)の成果をさらに発展させ、研削プロセスに化学反応を融合した CMG(Chemo-Mechanical Grinding)技術を基盤に、ハイブリッド送り機構を具備した先端加工機械を開発し、単結晶サファイアウエハの形状精度、加工能率と表面品位を並立した One-stop 超精密・無欠陥加工技術及びその評価技術を開発、確立する。

3. 研究の方法

研究者らは、近年固定砥粒による加工変質層のない“完全”表面創成技術に関する研究に取り組んでいる。これまで単結晶 Si ウエハの研削工程に固相化学反応を取り入れた機械・化学融合加工技術 CMG を開発、確立してきた。さらにこの CMG 技術を石英ガラス、また LiTaO_3 などの“軟脆”機能材料の表面加工に応用している。

一方、安定性に優れた $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ に対して効果的に化学反応が発現する砥石を開発することが難しい。そこで申請者が、アルミナ(A)砥粒を使ってコバルト合金を研削したときに砥石摩耗が突出して高い実験結果を記述した古い論文(R. Komanduri, *Ann. CIRP*, 1976)に着目した。著者が合金表面に析出した Cr_2O_3 は A 砥粒との固溶が原因であると考察している。サファイアの組成が A 砥粒と同じ Al_2O_3 であるため、 Cr_2O_3 を主成分とした CMG 砥石であれば、 $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ ウエハの CMG 加工ができるとの発想に至った。

本研究では、 $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ ウエハの CMG 加工の確立を目的に、工具 (CMG 砥石)、加工プロセス及びその評価技術を体系的に研究・開発した。具体的な内容は以下の通りである。

- (1) CMG の開発： $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ と反応性有する軟質砥粒を探索し、基礎実験を経て、効果的な CMG 砥石の制作法を開発する。また CMG における基本的な除去メカニズムを解明し、CMG 砥石の組成の最適化を行う。
- (2) 先進加工プロセスの開発： $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ 材料特性からサファイアの除去メカニズムを解明し、ドライ環境下でダイヤモンド砥石による形状精度、表面品位及び加工能率を並立した加工プロセスを確立する。
- (3) 評価技術の開発：加工プロセスにおける研削抵抗、研削熱をオンマシンでモニタできる無線計測技術及び非破壊(亜)表面加工品位の評価技術を開発する。

4. 研究成果

(1) CMG の開発

Fe_2O_3 , Cr_2O_3 などの金属酸化物を中心に $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ に対し化学活性な砥粒を探索した結果、 CeO_2 , SiO_2 , Cr_2O_3 の 3 種類の砥粒が比較的高い研磨率を示した。そのうち、Fig.1 に示すように、従来の CMP に使われている SiO_2 に比べて、 Cr_2O_3 はいかなる加工環境においても高い材料除去率(MRR)を有している。

さらに化学反応を活性化させるため、従来研削

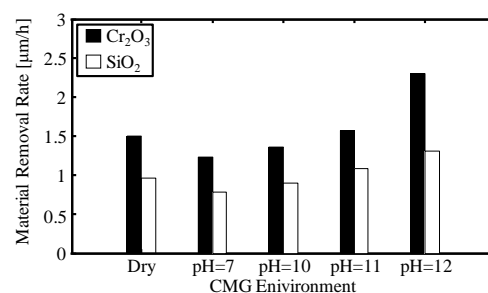


Fig.1 MRR obtained at different abrasives

砥石製造に必須な結合剤を排除した砥粒率 100wt%の CMG ペレット BAP (Binder-free abrasive pellet) を新たに開発した。ペレット作成手順を Fig.2 に示す。砥粒と Binder の PVA を混合、乾燥した後、CIP により成型する。そ際の CIP 圧力を 200MPa 以上に高めることで結合剤を用いず砥粒率 100 wt%の BAP が得られる。後に焼結温度により BAP に所望の機械強度を付与することができる。

摩擦摩耗試験機と三点曲げ試験機を用いて、BAP の MRR, 耐摩耗性及び抗折強度を評価し、成型時圧力及び成形後の焼結温度を最適化した。Fig.3 に本研究で開発した BAP とそれを装着した CMG 砥石を示す。

Fig.4 には、CMG 加工における α -Al₂O₃ ウエハ表面の粗さ変化を示す。今回開発した BAP(100wt%) は従来制法の砥石(86wt%)に比べておよそ 2/3 加工時間で所望の Ra=1 nm に達した。Fig.5 に前加工として SD1000 で研削した、CMG および CMP で仕上げた 3 種類の α -Al₂O₃ ウエハの概観を示す。砥粒径や種類の異なる複数の研磨盤を使い分けて仕上げた従来 CMP 品に遜色のない表面品位を固定砥粒のみ、かつ 1 台の加工機械で実現可能であることが CMG プロセスの最大特徴である。

(2) 先進加工プロセスの開発

One-stop で α -Al₂O₃ ウエハ粗加工から仕上げまで実現するには、CMG と同じロータリインフィード研削盤 (Fig.8) で固定砥粒ダイヤモンド砥石による高い除去率・低い粗さを實現して後続の CMG 最終仕上げプロセスに α -Al₂O₃ ウエハを供することが重要である。

温度上昇と共に α -Al₂O₃ の臨界分解せん断応力が指数関数的に低下することに着目し、特に 800°C 以上の環境下では、C 面(0001)において <1120> 方位に双晶すべりが発生しやすい現象を利用して、ダイヤモンド砥石研削で発生する熱による高温延性モード研削プロセスを開発した。Fig.6 に示すように 2~3 分程度の加工時間で表面粗さが Sa=450nm から Sa= 100 nm までに大きく改善できた。また得られた実験データを解析することにより、除去モードの遷移が切込量/切り屑断面積の大小に依存する従来の除去メカニズムを再確認すると同時に、切り屑断面の形状(例えば、アスペクト比)からも大きく影響されることを発見した。その影響度合いについて理論解析及び実験の両側面から検証している。

さらに、これまでほとんど注目してされなかったダイヤモンド粒径のばらつきについて、粒径の標準偏差が研削表面トポグラフィの形成および研

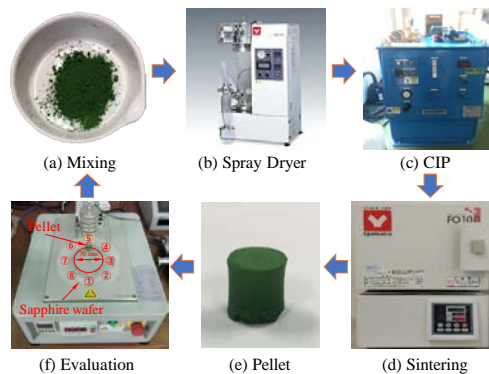


Fig.2 BAP development procedures

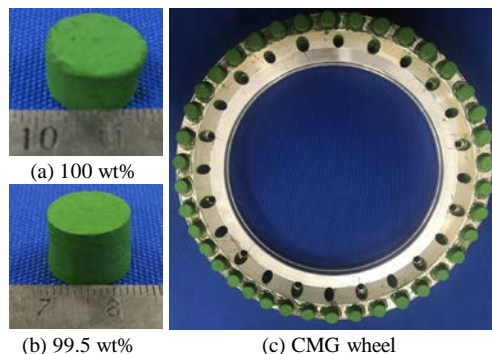


Fig.3 BAP pellets and CMG wheel

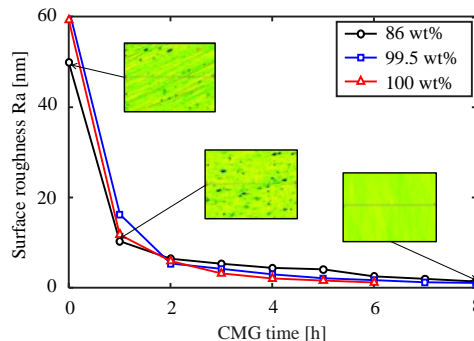


Fig.4 Roughness change in CMG

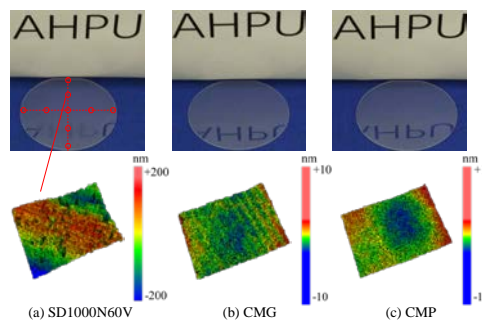


Fig.5 Finished sapphire surfaces

	Initial Surface	$\Delta = 6 \mu\text{m}$ MR = 2.1 μm	$\Delta = 8 \mu\text{m}$ MR = 0.7 μm	$\Delta = 10 \mu\text{m}$ MR = 1.8 μm
Center	Sa=446nm	Sa=79nm	Sa=44nm	Sa=95nm
Middle	Sa=472nm	Sa=144nm	Sa=177nm	Sa=143nm
Circumference	Sa=454nm	Sa=157nm	Sa=170nm	Sa=149nm

Fig.6 Surface roughness in high Temp. grinding

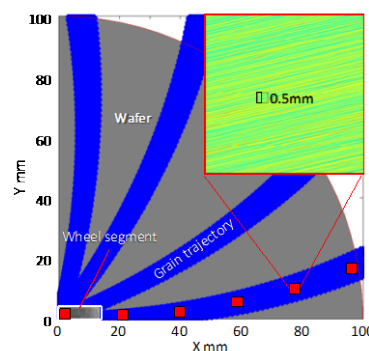


Fig.7 Simulation of wafer surface topography

削面粗さに与える影響を理論解析し、標準偏差の異なる3種の砥石を使って、Fig.7に示すシミュレーション及び実験によりその影響を解明した。その成果をまとめた学術誌論文が精密工学会で高く評価され、2018年度の精密工学会論文賞を受賞した。

(3) 評価技術の開発

研削メカニズムを解明するには、加工中の研削抵抗および研削温度を知ることが不可欠である。ところで、Fig.8に示すようなロータリー型インフィード平面では、砥石と工作物が共に回転するため、従来の動力計など有線計器類を使用することができない。そこで無線式動力計と温度計を新たに開発した。

Fig.8, 9に構成要素と回路図を示す。八角リング型動力計の下部に砥石セグメントを取り付け、砥石回転時に他の砥石セグメントと同様ウエハを研削する。その砥石セグメントにはK-typeの熱電対が内蔵され、研削時に生じた研削抵抗の二分力および接触弧内の研削温度が計測できる。得られた電圧信号がAD変換され、Bluetoothにより送・受信される。

Fig.10には、計測したウエハ半径方向における研削抵抗の二分力の一例である。ウエハ半径距離の増加に伴い大きくなり、ウエハ外周では急激に小さくなる。これらは理論解析と定量的にもよく一致している。同時に研削温度の解析と実測を行っている。これらの結果を元に高温延性モード研削の遷移条件などの解明が可能になる。本研究成果は、2018年度砥粒加工学会学術講演会で優秀講演賞に表彰された。

一方、GaN膜の品質を保障するため、基板である α - Al_2O_3 ウエハ表面に原子レベルの平坦性が求められるだけでなく、垂表面に加工による変質層(SSD)のない“完全”原子配列が要求される。SSDの評価は、これまで被削物から断面薄片を切出し、透過型電子顕微鏡を使った観察手法に頼っている。この方法は、時間、コストがかかる一方、基板ウエハを破壊しなければならないのが最大の欠点である。

そこで、本研究ではRaman顕微分光によるSSDの非破壊評価法を開発した。Fig.11にその計測原理を示す。SSDで生じた残留応力は結晶に歪みをもたらし、その度合いがピーク位置に対応している。また格子欠損があれば、ピークの半値幅が増大する。それぞれを定量評価すれば、 α - Al_2O_3 結晶の残留応力及び結晶化度を測定することができる。さらに、共焦点顕微鏡を利用してウエハ内部のSSDを評価計測する手法を開発した。

Fig.12は本研究で開発したCMGと従来のCMPで加工した α - Al_2O_3 ウエハに対して表面から7 μm 深さまでスキャンした波数417 cm^{-1} のピーク位置のトモグラフィである。本手法では、表面から深さ10mmまで非破壊で加工したウエハのSSDが正確に計測・評価できる。さらにFig.13は、ダイヤモンド砥石(SD1000)、従来製法のCMG砥石、本研究で開発したCMG用BAPで加工した α - Al_2O_3 ウエハのSSDをCMPとの比較である。このように固定砥粒であるCMGはCMPと比較して表面粗さだけでなく、垂表面SSDにも遜色がない。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文, 全て査読有] (計13件)

(1) 石橋憲, 月井裕太, 蛭名雄太郎, 周立波, 清水

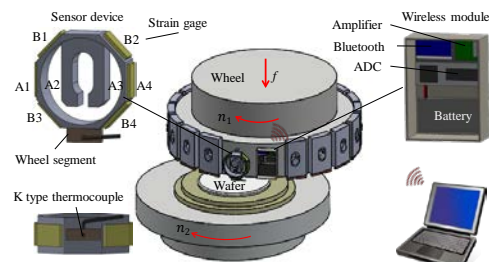


Fig.8 Wireless instruments configuration

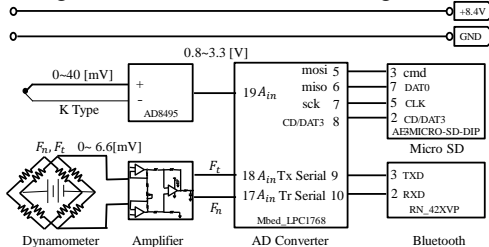


Fig.9 Diagram of force/Temp. sensors

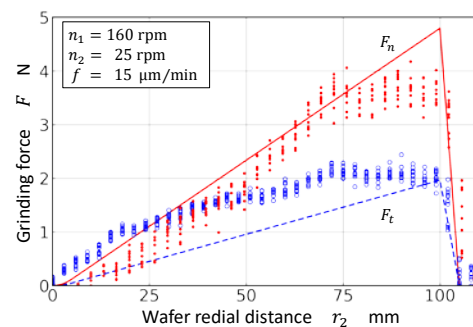


Fig.10 Grinding force measured.

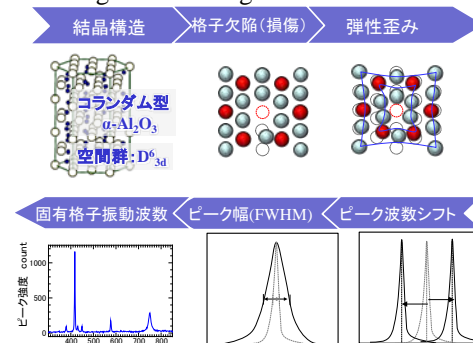


Fig.11 Concept of Raman spectrum analysis

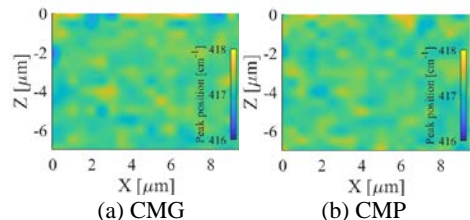


Fig.12 Raman tomography of processed wafer

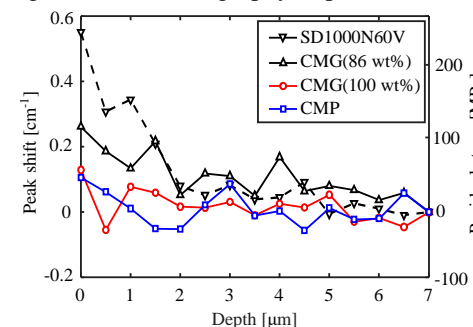


Fig.13 Stress distribution in depthwise

- 淳, 小貫哲平, 山本武幸, 尾島裕隆: ロータリー型インフィード平面研削メカニズムに関する研究, 砥粒加工学会誌, 63, 1(2019), pp.31-35. doi.org/10.11420/jsat.63.31.
- (2) 蛭名雄太郎, 前崎智博, 周立波, 清水淳, 小貫哲平, 尾島裕隆, 乾正知: 実験とシミュレーションによる砥粒径のばらつきがウエハ研削面に与える影響の調査, 精密工学会誌, 84, 7(2018), pp.640-645. doi.org/10.2493/jjspe.84.640.
 - (3) Ke Wu, Libo Zhou, Teppei Onuki, Jun Shimizu, Takeyuki Yamamoto and Julong Yuan: Study on the finishing capability and abrasives-sapphire interaction in dry chemo-mechanical-grinding (CMG) process, Precision Engineering, 52, 4(2018), pp.451-457. doi.org/10.1016/j.precisioneng.2018.02.007.
 - (4) Libo Zhou, Yutaro Ebina, Ke Wu, Jun Shimizu, Teppei Onuki, Hiroataka Ojima: Theoretical analysis on effects of grain size variation, Precision Engineering, 50, 10(2017) pp. 27-31. doi.org/10.1016/j.precisioneng.2017.04.010.
 - (5) 高橋清樹, 周立波, 清水淳: シリコンウエハ変形による加工変質層残留応力の評価, 一有限要素法を用いた数値シミュレーションによるウエハ変形メカニズム解明一, 精密工学会誌, 83 5(2017), pp.426-432. doi.org/10.2493/jjspe.83.426.
 - (6) Ke Wu, Libo Zhou, Jun Shimizu, Teppei Onuki, Takeyuki Yamamoto, Hiroataka Ojima and Julong Yuan: Study on the potential of chemo-mechanical-grinding (CMG) process of sapphire wafer. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Issue 1539~1546, 91(2016), pp.1539-1546. 10.1007/s00170-016-9836-1.
 - (7) Wei Hang, Libo Zhou, Kehua Zhang, Jun Shimizu, Julong Yuan; Study on grinding of LiTaO₃ wafer using effective cooling and electrolyte solution, Precision Engineering, 44, 4(2016), pp.62-69. 10.1016/j.precisioneng.2015.10.001
 - (8) 尾島裕隆, 長山拓矢, 周立波, 清水淳, 小貫哲平: ステレオ画像による砥石作業面トポグラフィの機上 3 次元計測システム開発に関する研究, 精密工学会誌, 82 2(2016), pp.186-191. doi.org/10.2493/jjspe. 82.186.
 - (9) 田代芳章, 周立波, 清水淳, 篠田知顕, 三上祐樹: Si ウエハの Chemo-Mechanical-Grinding(CMG) に関する研究(第 3 報), 精密工学会誌, 81, 10(2015), pp.957-962. doi.org/10.2493/jjspe.81.957
 - (10) Yutaro EBINA, Tomoya YOSHIMATSU, Libo ZHOU, Jun SHIMIZU, Teppei ONUKI and Hiroataka OJIMA: Process study on large-size silicon wafer grinding by using a small-diameter wheel, Journal of Advanced Mechanical Design, Systems, and Manufacturing, 9, 5(2015), pp.1-11. doi.org/10.1299/jamdsm.2015jamdsm0073.
 - (11) Teppei Onuki, Yutaro Ebina, Hiroataka Ojima, Jun Shimizu, Libo Zhou: Wide range and accurate measurement of wafer thickness gauge using optical spectral analyzer, Applied Mechanics and Materials, 1136, (2015), pp.581-585. 10.4028/www.scientific.net/AMM.1136.581.
 - (12) Ke Wu, Naoki Yamazaki, Yutaro Ebina, Libo Zhou, Jun Shimizu, Teppei Onuki, Hiroataka Ojima, Takashi Fujiwara: Study on Sapphire Wafer Grinding by Chromium Oxide (Cr₂O₃) Wheel, Applied Mechanics and Materials, 1136, (2015), pp.311-316. 10.4028/www.scientific.net/AMM.1136.311
 - (13) Jun Shimizu, Keito Uezaki, Libo Zhou, Takeyuki Yamamoto, Teppei Onuki, Hiroataka Ojima: Molecular Dynamics Simulation of a Cutting Method by Making Use of Localized Hydrostatic Pressure, Applied Mechanics and Materials, 1136, (2015), pp.156-161. 10.4028/www.scientific.net/AMM.1136.156
- [国際学会発表] (計 20 件)
- (1) Teppei Onuki, Kazuki Kamoshida, Takeyuki Yamamoto, Hiroataka Ojima, Jun Shimizu, Libo Zhou: Cross-sectional measurement of laser damage in sapphire using confocal micro Raman spectrometer, The 17th International Conference on Precision Engineering (ICPE2018), paperNo. F-2-1, 2 pages.
 - (2) Nao Sugano, Libo Zhou, Jun Shimizu, Hiroataka Ojima, Ken Ishibashi, Mituru Kaneyasu: Investigation on high temperature grinding of mono-crystal sapphire wafer, The 17th International Conference on Precision Engineering (ICPE2018), paperNo. B-2-3, 2 pages.
 - (3) Jianbin WANG, Tomohito Maezaki, Libo Zhou, Jun Shimizu, Teppei Onuki, Hiroataka Ojima: Development of high efficiency CMG pellets for finishing mono-crystal sapphire, The 21st International Symposium on Advances in Abrasive Technology (ISAAT 2018), paperNo.37, 6 pages.
 - (4) Teppei Onuki, Ke Wu, Kazuki Kamoshida, Piao Lin, Nao Sugano, Hiroataka Ojima, Jun Shimizu, Libo Zhou: Comparative investigation of subsurface damages induced on sapphire with different machining methods using micro Raman spectroscopy, The 21st International Symposium on Advances in Abrasive Technology (ISAAT 2018), paperNo. 60, 5 pages.
 - (5) Masatomo INUI, Yutaro Ebina, Tomohiro Maezaki, Libo Zhou: Geometric Simulation of Infeed Grinding Process of Silicon Wafer Using GPU, August 20-24, 14th IEEE International Conference on Automation Science and Engineering (CASE 2018), paperNo.0074. 6 pages.
 - (6) Wangpiao Lin, Jun Shimizu, Libo Zhou, Teppei Onuki, Hiroataka Ojima and Takeyuki Yamamoto: Study on Nanoscratching of C-plane Sapphire Wafer, The 20th International Symposium on Advances in Abrasive Technology (ISAAT2017), pp.1045-1050.
 - (7) Teppei Onuki, Ke Wu, Nao Sugano, Hiroataka Ojima, Jun Shimizu and Libo Zhou: Raman analysis of machining qualities on ground surfaces of sapphire wafers, The 20th International Symposium on

- Advances in Abrasive Technology (ISAAT2017), pp.1122-1126.
- (8) Yuta Tsukii, Libo Zhou, Hiroataka Ojima, Jun Shimizu and Teppei Onuki: Development of wireless dynamometer for rotary infeed surface grinding, The 20th International Symposium on Advances in Abrasive Technology (ISAAT2017), pp.293-297.
 - (9) Tomohiro Maezaki, Jun Shimizu, Teppei Onuki, Hiroataka Ojima, Masatomo Inui, Yutaro Ebina and Libo Zhou: Study on the Effect of Grain Size Variation on Ground Surface Roughness, 7th International Conference of Asian Society for Precision Engineering and Nanotechnology (ASPEN2017), HSP-O-02.
 - (10) Teppei Onuki, Hiroataka Ojima, Jun Shimizu and Libo Zhou: Analysis of variance in optical inspections of wafer thickness, The 9th International Conference on Leading Edge Manufacturing in 21st Century (LEM21), 2017, 4pages.
 - (11) Daisuke Takenouchi, Hiroataka Ojima, Teppei Onuki, Jun Shimizu: The development of hybrid-feed system and technology of CFRP machining, 9th International Conference on Leading Edge Manufacturing in 21st Century (LEM21), 2017, 4pages.
 - (12) Wentong LU, Libo ZHOU, Jun SHIMIZU, Teppei ONUKI, Hiroataka OJIMA, Takeyuki YAMAMOTO: Stress analysis of LT wafer during grinding process, 16th International Conference on Precision Engineering (ICPE2016), 2 pages.
 - (13) Teppei ONUKI, Yuki NEMOTO, Hiroataka OJIMA, Jun SHIMIZU, Libo ZHOU: Error characteristics analyses in optical wafer-thickness measurements, 16th International Conference on Precision Engineering (ICPE2016), 2 pages.
 - (14) Libo Zhou, Yutaro Ebina, Ke Wu, Jun Shimizu, Teppei Onuki, Hiroataka Ojima: Theoretical analysis on effects of grain size variation, the 19th International Symposium on Advances in Abrasive Technology (ISAAT2016), pp.124-129.
 - (15) Mitsuyoshi Nomura, Yutaka Matsushima, Yongbo Wu, Masakazu Fujimoto, Zhou Libo: Effects of ultrasonic vibration on abrasive pellet working life for Si wafer using ultrasonic assisted fixed abrasive chemical mechanical polishing (UF-CMP), The 8th International Conference on Leading Edge Manufacturing in 21st Century (LEM21), 2015, 5pages.
 - (16) Jun Shimizu, Libo Zhou, Teppei Onuki, Hiroataka Ojima, Takeyuki Yamamoto: Molecular dynamics simulation of relationship between friction anisotropy and atomic-scale stick-slip phenomenon, The 8th International Conference on Leading Edge Manufacturing in 21st Century (LEM21), 2015, 5pages.
 - (17) Ke Wu, Naoki Yamazaki, Libo Zhou, Jun Shimizu, Teppei Onuki, Hiroataka Ojima: Study on the Effects of Chemical Agents and Environment on Material Removal Rate in Sapphire Polishing, The 8th International Conference on Leading Edge Manufacturing in 21st Century (LEM21), 2015, 5 pages.
 - (18) Teppei Onuki, Hiroataka Ojima, Jun Shimizu, Libo Zhou, Itaru Takahama, Kazuki Kamoshida: Machining quality controls in ultrashort pulse laser micromachining on lithium Niobate substrates, The 8th International Conference on Leading Edge Manufacturing in 21st Century (LEM21), 2015, 5pages.
 - (19) Jun Shimizu, Takeyuki Yamamoto, Teppei Onuki, Hiroataka Ojima, Libo Zhou: Surface Texturing by Using Vibration-assisted Microscratching, International Tribology Conference (ITC) 2015, 2 pages
 - (20) Jun Shimizu, Takeyuki Yamamoto, Libo Zhou, Teppei Onuki, Hiroataka Ojima: Molecular Dynamics Simulation of Abrasive Machining Process of Silicon Wafer by Controlling Interatomic Potential, The 6th Advanced Forum on Tribology, (2015), p.12
- [図書] (計1件)
- (1) 周立波: 迫りくる AI 時代に向けた半導体製造プロセスの今, 情報機構, 2019, 第3章第4節第2項執筆, pp.181-189.

[その他]

<https://sites.google.com/site/nlabibarakiuniv/>

6. 研究組織

(1) 研究分担者

清水 淳 (Jun Shimizu)

茨城大学・理工学研究科・教授

研究者番号: 40292479

小貫 哲平 (Teppei Onuki)

茨城大学・理工学研究科・准教授

研究者番号: 70400447

尾畷 裕隆 (Hiroataka Ojima)

茨城大学・理工学研究科・准教授

研究者番号: 90375361

山本 武幸 (Takeyuki Yamamoto)

茨城大学・理工学研究科・技術職員

研究者番号: 40396594