

平成 22 年 3 月 31 日現在

研究種目： 基盤研究 (B)
 研究期間： 2007～2009
 課題番号： 19360056
 研究課題名 (和文) CMGによる超高速光通信用可変分散補償器コア要素エタロンの加工技術に関する研究
 研究課題名 (英文) Research on Manufacturing Technology of Etalon: A Core Element of Tunable Dispersion Compensator for Optical Communication, by means of CMG Process
 研究代表者
 周 立波 (ZHOU LIBO)
 茨城大学・工学部・教授
 研究者番号： 90235705

研究成果の概要 (和文)：本研究は、超高速光通信用可変分散補償器のコア要素である単結晶 Si エタロンの加工技術を確立することを目的に、独自に開発した Si と化学反応する CMG 加工技術を用いて、大口径 Si ウエハを高精度・高品位に加工できる One-stop 加工システムを開発し、CMG 砥石およびプロセスの最適化を行い、固定砥粒加工だけで GBIR<0.3 μm, 加工変質層のない 15μm の極薄 Si ウエハを実現した。

研究成果の概要 (英文)：Si based etalon is a core element of tunable dispersion compensator for ultra high-speed optical communication, which demands both high geometrical accuracy and high surface integrity. Aiming at establishing manufacturing technology to fulfill such application, this research has developed a one-stop grinding system by full use of the advantage of CMG. After optimizations of CMG wheel and process, it was successful to thin 8 inch Si wafer down to 15 μm with GBIR<0.3 μm.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007 年度	11,400,000	3,420,000	14,820,000
2008 年度	1,900,000	570,000	2,470,000
2009 年度	2,200,000	660,000	2,860,000
年度			
年度			
総計	15,500,000	4,650,000	20,150,000

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：エタロン，単結晶シリコン，極薄ウエハ，CMG，化学・機械融合加工

1. 研究開始当初の背景

(1) ファイバに伝播される光がその波長によって進む速度が異なるため、伝送距離に従って、光信号の波形に歪(波長分散)が生じ、一定距離ごとに分散を補償して元の波形に戻す必要がある。次世代 40-Gbit/s の光通信速度においては低損失、安価、広域可変などの特長を持つエタロン多重反射方式が注目され

ている。

(2) この方式は、エタロン内での光共振を利用して光の逆分散を行なうため、損失リップルが小さく屈折率が高いエタロン材料必須である。n=1.5 のガラス材の代わりに n=3.5 の単結晶シリコンを使用することができれば、単位損失当たりの分散量で示すエタロンの性能指数が 2 倍以上になる。Si エタロンに

求められる仕様により, Si 基板を 300 μm まで薄片化する必要がある. 特に 15nm(厚さの 0.005%)以下の厚さ均一性が求められている. 扱う波長次第では, さらに薄くかつ高精度の Si 基板の加工技術が要求される. これに対応できる加工技術の開発が急務となっている.

2. 研究の目的

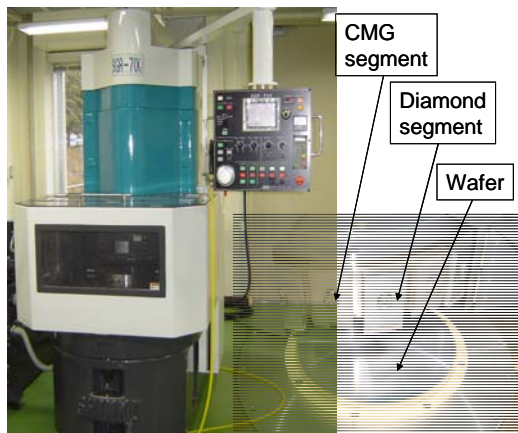
(1) 本研究では, これまで独自開発に成功した CMG(Chemo-Mechanical-Grinding)技術を応用し, 助成金交付期間内で超高速光通信用可変分散補償器のコア要素である Si エタロンを高品位かつ高精度で加工できるシステムを固定砥粒プロセスのみで構築・確立する.

3. 研究の方法

(1) 本研究では, CMG の高精度・高品位が両立できる特長を生かして, 固定砥粒による研削のみで Si エタロンが加工できるプロセスを確立する. 具体的には, a) 厚さ 300 μm まで薄片化する研削加工, b)形状精度 15nm を維持しながら defect-free なる完全表面に仕上げる CMG を 1 台の加工機上で実現できる One-stop 加工システムを開発する. その目標を実現するため, 3 年間の助成金交付期間内で, 1) マルチヘッド加工機械の開発, 2)加工工具と加工プロセスの開発と最適化, 3)計測・評価技術の開発の 3 つの課題について取り組んできた.

4. 研究成果

(1) 本研究で開発した One-stop 加工機を図 1 に示す. 従来の BG 研削盤と異なり, 本機の Infeed 送り機構および砥石のハイブリッド化を施した. 垂直方向に 0.1 $\mu\text{m}/\text{min}$ の微小定寸送り機構に, 主軸の負荷 (あるいは回転数) が設定値に保つよう送り速度に自動制御を加えた. それにより, 定圧送りが必要とする CMG 加工が, 定寸送りを要するダイヤモンド研削と共に 1 台の機械上で実現した.



(a) Grinding machine (b) Hybrid wheel
図 1 開発した One-stop 加工システムおよびダイヤモンド+CMG ハイブリッド砥石

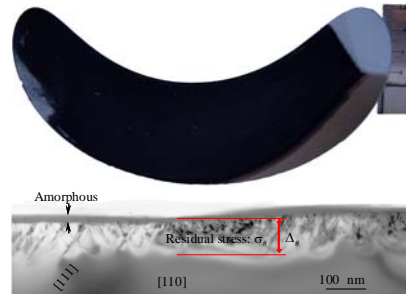


図2 薄片化Siウエハと加工変質層

(2) さらに砥石を取り付け方法について新たに考案した. セグメント状のダイヤモンド砥石と CMG 砥石を交互に配置し, 上下 10mm 範囲内に高精度で clamp/unclamp 可能な機構を内蔵させた. 粗研削時にはダイヤモンド砥石, また仕上げ (ストレスリリーフ) 時には CMG 砥石を選択的にセットすることが可能になった. これにより粗加工から仕上げまで砥石およびウエハを脱着する必要がなくなり, one-stop 加工ができると同時に, 加工基準が変わらないため, 平坦度, 厚さなどの形状精度が保証されることとなった.

(3) 従来の BG 加工では, ウエハ厚さが 100 μm 以下になると, 図 2 に示すようにウエハ表面の加工変質に残留する内部応力により, ウエハに大きなそりが生じ, 高精度の薄片加工が困難である. 本研究ではまず, 図 3 のような 3D モデルを構築し, 砥粒の運動軌跡について解析を行った. このモデルにより

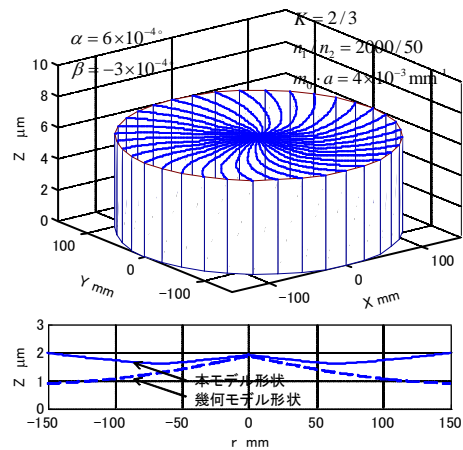


図3 チルト角 α, β の最適化

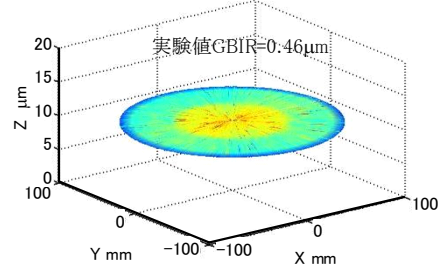


図 4 最適化後の実験結果

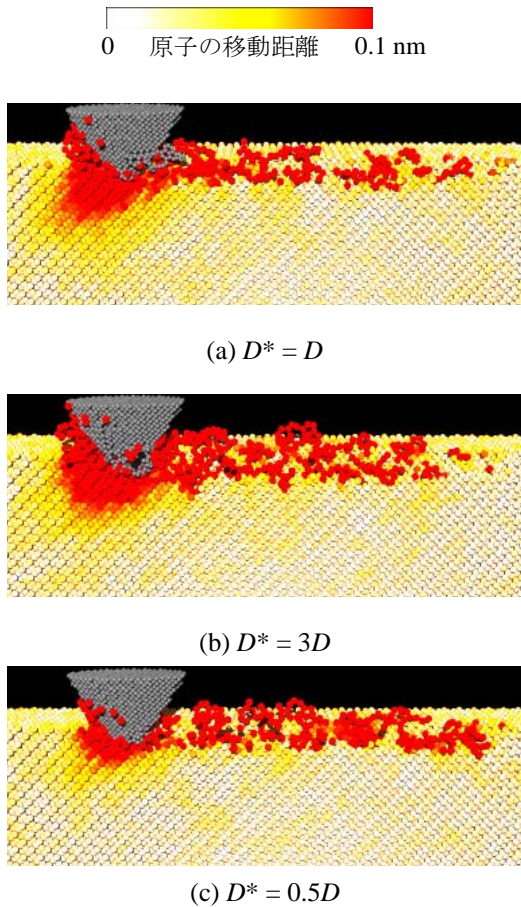


図5 分子動力学(MD)シミュレーション

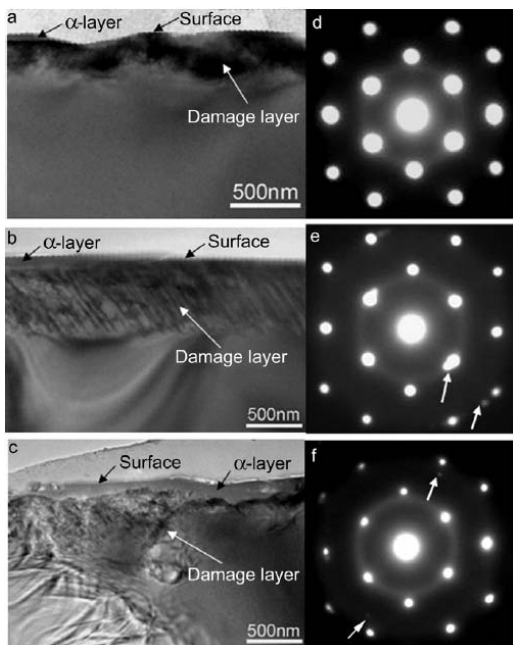


図6 断面 TEM 像と SAED パターン

軌跡密度および加工系のループ剛性がウエハの形状精度に与える影響を解明し、高精度形状創成の最適アライメントを導き出した。

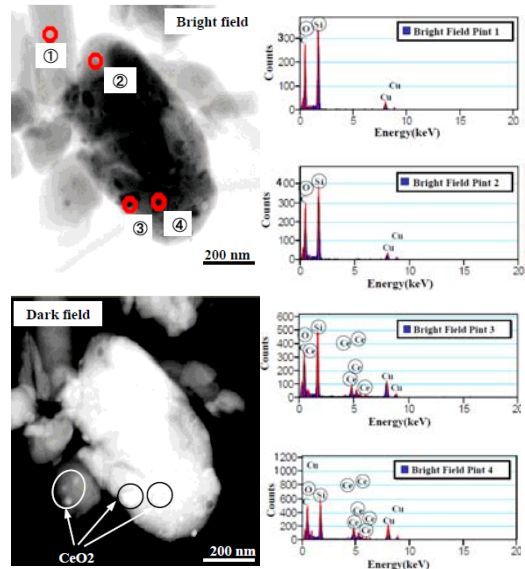


図7 CMG 切りくずの成分分析

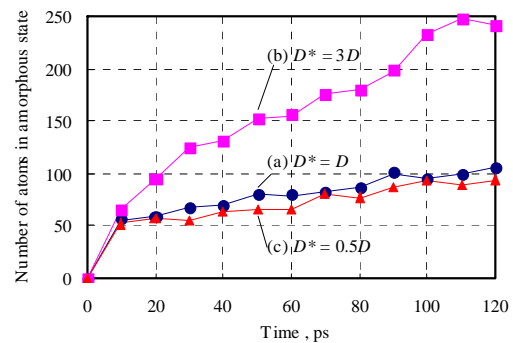


図8 α -Si に関する MD シミュレーション

その結果、図4に示す $GBIR < 0.5\mu m$ の形状精度が得られた。

(4) CMG は、固定砥粒による運動転写型の研削加工でありながら、化学・機械の相互作用により加工変質層が全くない表面創成が可能融合加工である。その除去メカニズムを解明するために、本研究では図5に示す MD の手法を駆使して、加工条件下での Si 結晶構造の変化を可視化した。同時に実際に加工した Si ウエハの断面を図6のように観察・解析し、Si 単結晶の転位、アモルファス化、再結晶の熱・力学条件を解明した。

(5) 一方、化学的作用については、CMG 加工で形成された切りくずを解析し(図7)、その組成から、CMG 加工中におけるセリア砥粒と Si の固相反応が Ce^{4+} から Ce^{3+} への還元反応であることを解明した。また加工表面には、Ce-O-Si のアモルファスが生成されていることが明らかになった。このことは、図8の MD 結果より裏付けられている。

(6) これらの研究結果に基づき、セリア砥粒を主成分とした CMG 砥石を開発した。その外観および成分をそれぞれ図9および表1に示す。その後の実験により砥石の組織、添加

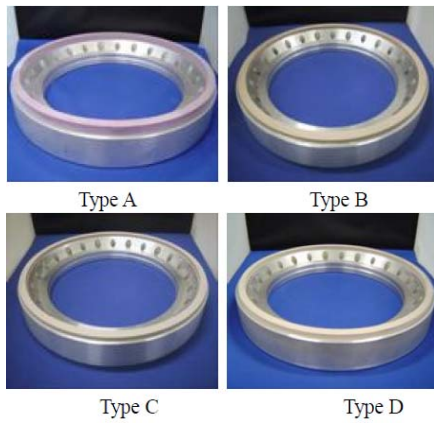


図 9 開発した CMG 砥石

表 1 CMG 砥石の仕様

CMG wheels	Ceria contents	Bonding agent	Additive	Density (g/cm ³)	Hardness (HRL)
Type A	Low	Midd.	Na ₂ CO ₃	3.84	107.88
Type B	Low	High	N/A	3.64	↓
Type C	Midd.	Midd.	N/A	4.25	
Type D	High	Low	N/A	4.86	

剤ならびに結合度が再度調整された。また加工能率および完全表面創成の観点から加工条件を最適化した。図 10 には、8 インチの Si ウエハを厚さ 15 μ m~60 μ m まで薄片化した時の写真である。厚さが 50 μ m 以下になると、背後の LED が次第に透かして見える様子がわかる。

(7) Si 単結晶のほかに、ガラス・エタロンの素材である石英ガラスに対しても加工実験が成功した。

(8) 最後に、Si ウエハの形状を計測するため、図 11 に示す On-machine 計測システムを開発した。レーザ干渉原理に基づき Si 内部の通過光路によりウエハの厚さを高精度で算出した。1つのプローブでウエハの平坦度および厚さの机上計測が可能であることが特長である。測定結果をアライメント設定にフィードバックして形状の補正ができる。

(9) off-line の計測では、計測データを処理するため第 2 世代 Wavelet によるデジタルフィルタを設計し、高精度計測時に問題となる不確定さに対して有効なアルゴリズムを開発した。またこの Wavelet 変換により得た知見が、ノイズやそれによるバイアス除去だけでなく、加工面の傷の除去・検査にも効果的である。今企業と共同研究を進めているところである。

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 17 件)

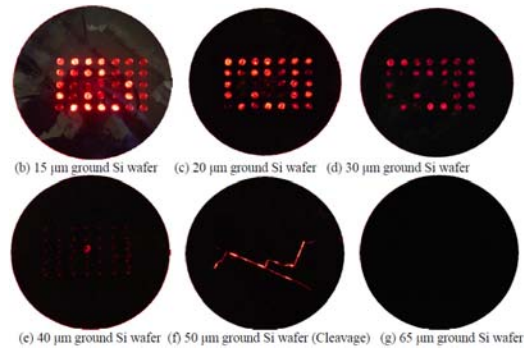


図 10 薄片化した 8" Si ウエハ



図 11 On-machine 計測システム

- ① J. Shimizu, L. Zhou and T. Yamamoto, Molecular Dynamics Simulation of Chemical Reaction Assisted Grinding of Silicon Wafer by Controlling Interatomic Potential Parameters, J. of Computational and Theoretical Nanoscience, 査読有, Vol.7, No.10, 2010, 1-6.
- ② 周立波, 光田孝仁, 清水淳, 田業氷, 山本武幸, Siウエハインフィード研削における切削軌跡密度と機械剛性の影響 (第2報: 実験的考察), 砥粒加工学会誌, 査読有, Vol.45, No.2, 2010, 92-96.
- ③ 周立波, 光田孝仁, 清水淳, 田業氷, 山本武幸, Siウエハインフィード研削における切削軌跡密度と機械剛性の影響 (第1報: モデルと解析), 砥粒加工学会誌, 査読有, Vol.45, No.1, 2010, 45-49.
- ④ 清水淳, 周立波, 山本武幸, ポテンシャルパラメータ制御によるシリコンウエハ化学作用援用研削の分子動力学シミュレーション, 砥粒加工学会誌, 査読有, Vol.45, No.1, 2010, 41-44.
- ⑤ L. ZHOU, T. SHIINA, Z.J. QIU, J. SHIMIZU, T. YAMAMOTO and Y. TASHIRO, Research on Chemo-Mechanical-Grinding of Large Size Quartz Glass Substrate, Precision Engineering, 査読有, Vol.33, 2009, 499-504.
- ⑥ S. Kamiya, H. Iwase, K. Kishita, L. Zhou and H. Eda and Y. Yoshida, Study on reaction

- mechanism of Si and pure CeO₂ for chemical-mechanical-grinding process, J. of Vacuum Science and Technology B, 査読有, Vol.27, No.3, 2009, 1496-1502.
- ⑦ Y.B. Tian, L. Zhou, J. Shimizu, T. Tashiro, R.K. Kang, Elimination of surface scratch/texture on the surface of single crystal Si substrate in chemo-mechanical grinding (CMG) process, J. of App. Surface Science, 査読有, Vol.255, No.7, 2009, 4205-4211.
- ⑧ J. Sasaki, T. Tsuruga, B. Soltani.H, T. Mitsuta, Y.B. Tian, J. Shimizu, L. Zhou, H. Eda, Y. Tashiro, H. Iwase and S. Kamiya, Study on Improvement of Material Removal Rate in Chemo-mechanical Grinding (CMG) of Si Wafer, Key Engineering Materials, 査読有, Vols.389-390, 2009, 13-17.
- ⑨ D.M. Guo, Y.B. Tian, R.K. Kang, L. Zhou and M.K. Lei, Material Removal Mechanism of Chemo-mechanical Grinding (CMG) of Si Wafer by Using Soft Abrasive Grinding Wheel, Key Engineering Materials, 査読有, Vol. 389-390, 2009, 459-464.
- ⑩ H. Huang, Y.Q. Wu, Y. Wang, J. Zou and L. Zhou, Subsurface Structures of Monocrystalline Silicon Generated by Nanogrinding, Key Engineering Materials, 査読有, Vols.389-390, 2009, pp.465-468.
- ⑪ 清水 淳, 周 立波, 山本武幸, 津村貴史, 岡部秀光, 江田 弘, 微小引っかけによるシリコンウエハ研削現象の解析, 砥粒加工学会誌, 査読有, Vol.52, No.10, 2008, 601-606.
- ⑫ Jun Shimizu, Hiroshi Eda, Libo Zhou, Hidemitsu Okabe, Molecular Dynamics Simulation of Adhesion Effect on Material Removal and Tool Wear in Diamond Grinding of Silicon Wafer, Tribology Online, 査読有, Vol.3, No.5, 2008, 248-253.
- ⑬ Jun Shimizu, Libo Zhou, Hiroshi Eda: Molecular Dynamics Simulation of Effect of Grinding Wheel Stiffness on Nanogrinding Process, Int'l J. of Abrasive Technology, 査読有, Vol.1, No.3/4, 2008, 316-326.
- ⑭ H. Huang, B.L. Wang, Y. Wang, J. Zou and L. Zhou, Characteristics of Silicon Substrates Fabricated using Nanogrinding and CMG, Materials Science and Engineering A, 査読有, Vol.479, 2008, 373-379.
- ⑮ Y. Wang, J. Zou, H. Huang, L. Zhou, B.L. Wang and Y.Q. Wu: Formation Mechanism of Nanocrystalline High-Pressure Phases in Silicon during Nanogrinding, Nanotechnology, 査読有, Vol.18, 465705, 2007, 1-5.
- ⑯ L. Zhou, B. S. Hosseini, T. Tsuruga, J. Shimizu, H. Eda, S. Kamiya, H. Iwase and Y. Tashiro: Fabrication and evaluation for extremely thin Si wafer, Int. J. Abrasive Technology, 査読有, Vol.1, No.1, 2007, 94-105.
- ⑰ J. Shimizu, Libo Zhou, Hiroshi Eda: Molecular Dynamics Simulation of Nano Grinding - Influence of Tool Stiffness -, Int. J. Manufacturing Science & Technology, 査読有, Vol.9, No.1, 2007, 69-75.
- [学会発表] (計 12 件)
- ① H. SATO, Y.B. TIAN, J. SHIMIZU and L. ZHOU: Study on ultra-precision machining process of silicon-based etalon, - Effects of diamond grinding on breakage of ultra-thin etalon -, Proceedings of Asian Symposium for Precision Engineering and Nanotechnology 2009, 査読有, Nov.11-13, Kitakyushu/Japan,
- ② L. Zhou, T. Mitsuta, J. Shimizu and T. Tajima: Modeling and Analysis of Effects of Machine Tool Stiffness and Cutting Path Density on Infeed Surface Grinding of Silicon Wafer, Advanced Materials Research, 査読有, Vol.76/78, 2009, Sept. 26-29, Gold Coast/Australia, 445-450.
- ③ Y.B. Tian, L. Zhou, J. Shimizu, H. Sato and R.K. Kang: A Novel Single Step Thinning Process for Extremely Thin Si Wafers, Advanced Materials Research, 査読有, Vol76/78, 2009, Sept. 26-29, Gold Coast/Australia, 434-439.
- ④ H. Takahashi, Y.B. Tian, J. Sasaki, J. Shimizu, L. Zhou, Y. Tashiro, H. Iwase, S. Kamiya: Effects of Sodium Carbonate and Ceria Concentration on Chemo-Mechanical Grinding of Single Crystal Si Wafer, Advanced Materials Research, 査読有, Vol76/78, 2009, Sept. 26-29, Gold Coast/Australia, 428-433.
- ⑤ J. Shimizu, L. Zhou and T. Yamamoto: Molecular Dynamics Simulation of Chemo-Mechanical Grinding by Controlling Interatomic Potential Parameters to Imitate Chemical Reaction, Advanced Materials Research, 査読有, Vol76/78, 2009; Sept. 26-29, Gold Coast/Australia, 82-86.
- ⑥ S. Kamiya, H. Iwase, K. Kishita, L. Zhou, H. Eda and Y. Yoshida: Study on Reaction Mechanism of Si and pure CeO₂ for CMG Process, The 1st International Conference on Nanomanufacturing, 査読有, July 14-16, 2008, Singapore, 1-6.

- ⑦ T. Shina, L. Zhou, Z.J Qiu, T. Yamamoto, J. Shimizu, H. Eda: Research on CMG of large size silica glass substrate, Proceeding of LEM21, 査読有, Nov. 6-9, 2007, Fukuoka/Japan, 65-68.
- ⑧ Y. Tashiro, M. Kenmochi, B. Soitani, T. Tsuruga, L. Zhou, J. Shimizu and H. Eda: Development of High Performance Wheels for Chemo-Mechanical-Grinding, Proceeding of LEM21, 査読有, Nov. 6-9, 2007, Fukuoka/Japan, 69-72.
- ⑨ J. SHIMIZU, T. TSUMURA, Y. SUEHISA, L. ZHOU, H. EDA: Study on Nanomachining Process of Si Wafer using an Atomic Force Microscope, Proceeding of LEM21, 査読有, Nov. 6-9, 2007, Fukuoka/Japan, 153-156.
- ⑩ J. Shimizu, H. Okabe, T. Tsumura, Y. Suehisa, L. Zhou and H. EDA: Simulation and Experimental Study on Nanoscracthig of Silicon Wafer, Proceedings of Int'l Conference on Tribology in Manufacturing Process (ICTMP) 2007, 査読有, Sept. 24-26, 2007, Yokohama/Japan, 307-310
- ⑪ T. Mitsuta, B. Soltani, T. Tsuruga, J. Sasaki, L. Zhou, J. Shimizu and H. Eda: Development of On-machine 3D Measuring System for Large Size Si Wafer Thinning Process, Advances in Abrasive technology X, Proceedings of ISAAT2007, 査読有, Sept. 26-28, 2007, Detroit/USA, 75-81.
- ⑫ T. Tsuruga, B. Soltani, J. Sasaki, T. Mitsuta, J. Shimizu, L. Zhou and H. Eda: Study on Thinning Process of Large Size Si wafer, Advances in Abrasive technology X, Proceedings of ISAAT2007, 査読有, Sept. 26-28, 2007, Detroit/USA, 67-73.

[産業財産権]

○取得状況 (計 1 件)

名称：工作物表面加工方法
 発明者：神谷純生，岩瀬久雄，長池哲也，江田弘，周立波
 権利者：トヨタ自動車 (株)
 種類：特許
 番号：第 4283088
 取得年月日：2009 年 3 月 27 日
 国内外の別：国内

[その他]

ホームページ等

<http://info.ibaraki.ac.jp/scripts/websearch/index.htm>

6. 研究組織

(1)研究代表者

周 立波 (ZHOU LIBO)
 茨城大学・工学部・教授
 研究者番号：90235705

(2)研究分担者

清水 淳 (SHIMIZU JUN)
 茨城大学・工学部・准教授
 研究者番号：40292479
 尾鷲 裕隆 (OJIMA HIROTAKA)
 茨城大学・工学部・講師
 研究者番号：90375361
 山本 武幸 (YAMAMOTO TAKEYUKI)
 茨城大学・工学部・技術専門職員

(3)連携研究者

神谷 純生 (KAMIYA SUMIO)
 トヨタ自動車・第 2 機能材料部・担当部長
 岩瀬 久雄 (IWASE HISAO)
 トヨタ自動車・第 2 材料技術部
 山下 輝樹 (YAMASHITA TERUKI)
 トヨタ自動車・第 2 材料技術部
 田代 芳章 (TASHIRO YOSHIKI)
 東京ダイヤモンド工具製作所・技術部
 田 業水 (TIAN YEBIN)
 茨城大学・VBL・非常勤研究員
 HAN HUANG
 The University of Queensland・A/Prof.