

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 6 日現在

機関番号：12101

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2015～2016

課題番号：15K13840

研究課題名(和文)物理特性を能動的に利用した機能材料高品位加工技術の探索

研究課題名(英文) Feasibility study on effective use of material's physical properties in machining of functional crystal

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

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000円

研究成果の概要(和文)：強誘電体は、強い焦電性(温度変化による分極)及び圧電性(応力による分極)を併せ持つため、携帯電話用SAWフィルタなどへの応用が期待される一方、加工時の高い圧力と温度に晒され、結晶の対称性が破れ極めて脆く割れ易い難加工材料である。本研究は、まず、温度変化によりLiTaO₃の硬度が20%、破壊靱性が45%ほど低下することを押込実験で解明した。圧電・焦電効果による内部応力が研削中LTウエハの作用力の8～9割を占め、ウエハを破壊する主因であることを理論的な推定した。最後に、研削液の温度制御、電解質添加による表面電荷の中和二つの方策を考案し、LTウエハを100um以下に薄く研削しその有効性を検証した。

研究成果の概要(英文)：Single crystal LiTaO₃ (LT) is multi-functional, exhibits extraordinary piezo-/pyro-electricity, and expected to be utilized in sensors and SAW filters. Due to these physical properties, the LT single crystal is polarized and followed by structure phase transition when the temperature varies. The LT wafer is subjected to not only the external mechanical stress, but also the internal stresses which are resulted from polarization during grinding. The indentation results show the LT crystal degrades 20% in its hardness and 45% in toughness when temperature varied. Theoretical estimation on three stress components induced by the mechanical effect, the electronic effect and thermal effect in LT wafer during grinding suggest that the internal stress account for 80% of the total stress on the wafer, and stand out as the major fact for fracture. Temperature control and electrolyte utilization are proposed to suppress the internal stress, and successfully to grind wafer as thin as 100um.

研究分野：精密工学

キーワード：強誘電体 圧電効果 焦電効果 物理特性 自発分極 内部応力 機械強度

1. 研究開始当初の背景

強誘電体は、自発分極する特性から大きな誘電率、強い焦電性及び圧電性などの優れた機能を示す。従来からペロブスカイト型のチタン酸バリウムなどセラミックスコンデンサや PZT セラミックストランスデューサなど様々な応用研究が進められてきた。最近では **Fig.1** に示す性能がより優れた単結晶の LiTaO_3 や LiNbO_3 ウエハが無線通信用 SAW フィルタや医療用 $\mu\text{-TAS}$ に用いられるようになった。特に携帯電話に内蔵する SAW フィルタは、広帯域のマルチバンドに対応するため、厚さ $100\mu\text{m}$ のウエハ薄片化技術が求められている。

一方、分極は単位格子レベルでの結晶対称性の破れに起源するため、**Fig.2** に示すような結晶異方性が必ず伴う。この微視的分極の集合からなる巨視的分極(分域)を介して、機械的-電氣的-光学的-熱的な物理量が結びつけられる。このような無機強誘電材料の機械的特性として極めて脆いのが特徴である。

半導体材料である Si ウエハと比較しても機械的、熱的衝撃で割れが生じやすく、研削や切削による機械加工が極めて困難である。その一因として、後述するように加工中における材料の圧電・焦電効果に因る可能性が高いが、その関連の研究や報告が十分になされていないのが現状である。

2. 研究の目的

自発分極を有する強誘電体材料である LiTaO_3 (LT) 単結晶は、極めて脆い機械特性に加えて、圧電効果や焦電効果を併せ持ち、加工時の応力状態や熱変動によって発生する材料内部電界によるクラックや割れ等が、**Fig.3** に示す研削加工プロセスの大きな問題になっている。本研究は、加工中の割れの一因である圧電効果と焦電効果の影響を調査し、それらを抑制、除去、さらに能動的に利用する方法を探索し、強誘電体の高品位加工の基盤技術を開発する。

3. 研究の方法

本研究では、次に示す3つの方法を用いて、課題に取り組んだ。

- (1) マイクロナノインデンテーションの手法を使って、圧電・焦電効果が材料の強度などの機械特性に与える影響を実験的に調査する。
- (2) 上述結果に基づいて、研削加工における強誘電材料が受ける外部応力および圧電・焦電効果による内部応力を理論的に推定し、クラックや割れに対する影響について考察する。
- (3) 圧電・焦電効果を抑制、除去、さらに有効利用の方法を探索し、実際の強誘電体ウエハの研削においてその有効性を検証する。

4. 研究成果

Fig.3 (b) に示すように研削加工中に LT ウ



Fig.1 LiTaO_3 crystal and wafer

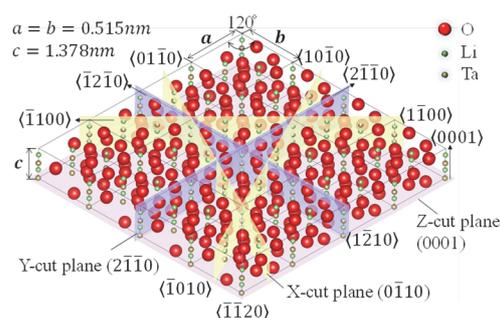


Fig.2 LT crystal structure

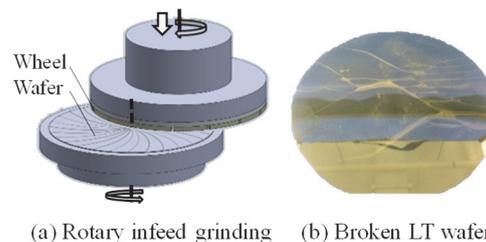


Fig.3 Wafer grinding and problem encountered

エハにしばしば割れが生じるが、その発生メカニズムがわかっていない。これまで主に被削材である LT ウエハの機械特性から考察してきたが、実験結果に対する説明が十分にできていない。強誘電体は常温で自発分極しているが、研削過程では被削材が常に高い圧力と温度に晒されている。その温度変化(焦電効果)および圧力変化(圧電効果)により、内部の分極状態が大きく変化し、研削中のウエハの機械的強度に影響を与えると思われる。

本研究は、まず LT ウエハの圧電効果と焦電効果を含む被削材の物理特性に着目し、これらの特性がウエハの機械的特性に与える影響を解明するため、強誘電体結晶 LT と半導体単結晶である Si を用いて、異なる温度プロファイル下でマイクロナノインデンテーション実験を行い、得られた結果について比較、検討した。

材料の機械的特性として、研削加工に関連する硬さ及び破壊靱性を評価した。**Fig.4** に示すようにマイクロナノインデンテーション装置 (Shimadzu DUH-W201) に、Berkovich ダイヤモンド圧子を取り付け、ヒーターと熱電対

からなる加熱ステージにポリッシングした厚さ 300 μm の LT ウエハと厚さ 500 μm の Si ウエハを置き、その表面に押し込み実験を行った。得られた圧痕の面積およびき裂の長さから硬度および破壊靱性値を評価した。

Table 1 に示すように、5mN から 35mN まで複数通り荷重を与えて、恒温 ($T = 23, 127^\circ\text{C}$) と昇温 ($dT/dt = 1.3^\circ\text{C/s}$) または降温 ($dT/dt = -1.16^\circ\text{C/s}$) の温度プロファイル下で押し込み実験を行った。昇温 (降温) 押し込み実験時には **Fig.5** に示すように温度上昇 (下降) の過程で負荷と除荷サイクルを完了させている。次に、圧痕を SEM で高倍率観察をし、その投影面積及び圧痕亀裂長さを評価した。

Fig.6 は、LT に荷重 30mN を負荷した場合の圧痕観察の代表例を示す。恒温 ($dT/dt = 0$) 条件では、低温 ($T = 23^\circ\text{C}$) に比べて高温 ($T = 127^\circ\text{C}$) 時の圧痕面積が大きくなり、LT 材料の硬さの低下を示唆している。また降温時 ($dT/dt = -1.16^\circ\text{C/s}$) に比べて、昇温時 ($dT/dt = 1.3^\circ\text{C/s}$) 時に得られた圧痕の投影面積およびき裂の長さが共に大きくなっている。これは、昇温時に LT 材料の硬度および破壊靱性値が低下することを示している。

異なる温度プロファイルで得られた LT 材料の硬度および亀裂長さ (破壊靱性値相当) をそれぞれ **Fig.7** および **Fig.8** にまとめた。このようにいずれの温度プロファイルにおいても荷重の増加と共に LT の硬度低下が見られた。一方、恒温条件に比べて昇温および降温条件では、LT の硬度が 20%強低下していることを特に強調すべきである。また、**Fig.8** に示すようにいずれの温度プロファイルにおいても荷重の増加と共に亀裂の長さがほぼ線形的に増加している。ところが、恒温条件に比べて昇温および降温条件では、LT の破壊靱性値が 45%ほど大きく低下していることがわかる。

一方、半導体単結晶 Si へ押し込み実験では、温度プロファイルが変わっても投影面積および亀裂長さはほとんど変化しなかった。したがって、このような温度プロファイルによる材料の機械的強度の低下は、LT の焦電性由来した特有現象と考えられる。即ち温度変化により、LT 内部分極に変化が生じ、材料の内部に大きな応力が発生したことを示唆している。そのため、外部からわずかの押し込み荷重を受けると亀裂が発生・増殖することになる。圧電および焦電性を示さない半導体単結晶 Si は、今回の実験で用いた $T < 200^\circ\text{C}$ の温度プロファイルにおいては、材料の機械的強度がほとんど変化しなかったと考えられる。

次に、研削加工における LT ウエハが受ける外部応力および圧電・焦電効果による内部応力を理論的に推定し、ウエハ破壊の主因を考察した。ウエハの研削では、**Fig.9** に示すように砥石が工作物を除去する時に研削抵抗と研削熱が発生する。研削抵抗は機械的な応力を発生すると同時に、圧電効果により LT ウエハを分極させる。一方、研削熱によってウエハの温度が上昇し、焦電効果による分極が同

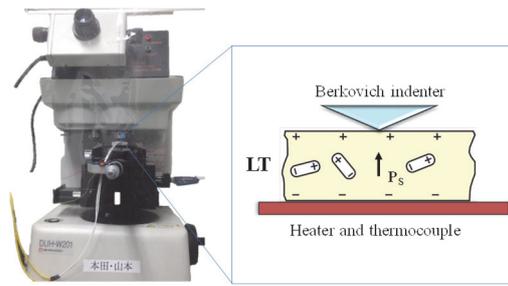


Fig.4 Micro/Nano indentation instruments

Table 1 Indentation conditions

Load range [mN]	5 ~ 35						
Load accuracy [μN]	± 19.6						
Applied load [mN]	5	10	15	20	25	30	35
Loading rate [mN/s]	0.36	0.72	1.45	1.45	3.37	4.5	6.75
Temperature variation [$^\circ\text{C/s}$]	$\frac{dT}{dt} = 0$ ($T=23, 127^\circ\text{C}$); $\frac{dT}{dt} = 1.3$; $\frac{dT}{dt} = -1.16$						
Iteration	5 times for each specified load						
Indenter type	Berkovich						
Samples	polished LT(300 μm), Si (500 μm)						

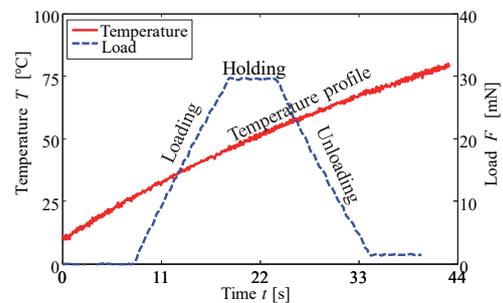


Fig.5 Temperature profile and load cycle

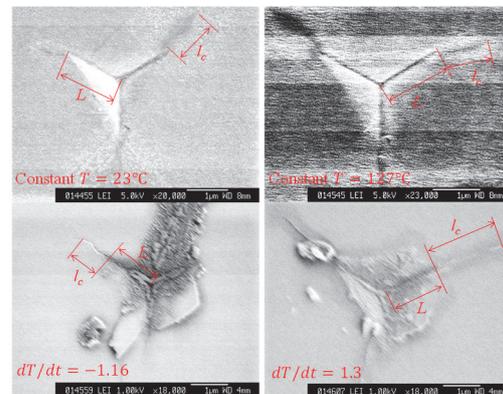


Fig.6 Indented impression of LT at 30mN

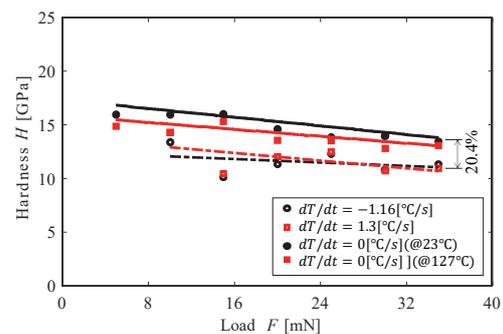


Fig.7 Reduction in hardness

時に発生する。したがって、研削時に LT ウエハは外部応力として機械的応力 σ_1 および内部応力として電氣的応力 σ_2 と熱的応力 σ_3 を同時に受けていると考えられる。

まず、機械場の応力は以下のように求めることができる。

$$\sigma_1 = \frac{F_n}{A} = \mu \frac{F_t}{A} = \frac{\mu}{2\pi} \cdot \frac{1}{w \cdot r_2} \cdot \frac{P_w}{r_1 n_1} \quad (1)$$

ここで、 μ は二分力比、 F_n は研削抵抗法線分力、 F_t 接線分力、 A は砥石とウエハの接触面積、 r_1 は砥石半径、 r_2 は LT ウエハの半径、 n_1 は砥石の回転速度、 w は砥石幅、 P_w は消費動力である。消費動力 P_w が温度変化 ΔT をもたらすため、動力と温度の関係 $P_w = \frac{c}{2\pi R_w T_1} \cdot \frac{r_2 \Delta T}{n_1}$ より、 σ_1 と ΔT の関係式を次のように導き出すことができる。

$$\sigma_1 = \mu \cdot \frac{c_w M_w}{R_w} \cdot \frac{1}{w r_1 r_2} \cdot \frac{n_2}{n_1} \cdot \Delta T \quad (2)$$

ここで c_w は LT の比熱、 M_w はウエハの質量、 R_w は研削熱流入の割合、 n_2 はウエハの回転速度である。(2)式に示すように、 ΔT に比例して σ_1 が線形増加し、温度の上昇による機械的応力評価が可能であることを示唆している。

一方、研削熱による LT ウエハが発生する分極量は $\Delta P_s = \rho \Delta T$ である。その焦電係数は次のように定義される。

$$\rho = \left(\frac{\partial P_s}{\partial T} \right)_\sigma = \left(\frac{\partial P_s}{\partial T} \right)_N + \left(\frac{\partial P_s}{\partial \sigma} \right)_N \cdot \left(\frac{\partial \sigma}{\partial N} \right)_T \cdot \left(\frac{\partial N}{\partial T} \right)_\sigma \quad (3)$$

第 1 項は primary 焦電係数を、第 2 項は secondary 焦電係数を表す。また、primary 焦電係数により発生した電場の強さは $\Delta E \cong \rho_p \Delta T / \epsilon$ であり、圧電効果により、歪み S と外部電場 ΔE の関係は $S = d \Delta E$ になる。したがって、電氣的応力 σ_2 は以下のように求めることができる。

$$\sigma_2 = \frac{1}{s_E} S = \frac{d}{s_E} \Delta E \cong \frac{d \rho_p}{s_E \epsilon} \Delta T \quad (4)$$

ここで s_E は弾性コンプライアンス定数、 d は圧電定数、 ϵ は誘電率である。また、secondary 焦電係数は $\rho_s = \left(\frac{\partial P_s}{\partial \sigma} \right)_N \cdot \left(\frac{\partial \sigma}{\partial N} \right)_T \cdot \left(\frac{\partial N}{\partial T} \right)_\sigma \cong \frac{d \cdot \alpha}{s_E}$ である。したがって、応力 σ_3 は次の式に示す。

$$\sigma_3 = \frac{\rho_s}{d} \Delta T = \frac{\alpha}{s_E} \Delta T \quad (5)$$

ここで、 α は熱膨張係数である。(5)式は、secondary 焦電係数が熱応力と等価であることを示している。

上述の式に従って研削における LT ウエハが受ける機械場、電気場及び熱場で発生した応力を定量的に推定し、温度変化 ΔT の関数として示す。Fig.10 には $\langle 0001 \rangle$ 方向、Fig.11 には $\langle 0\bar{1}10 \rangle$ 方向における 3 つの応力成分とその総合応力 $\sigma = \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3$ を示した。 $\langle 0001 \rangle$ 方向に沿って Z-Cut 面に作用する応力のうち、圧電・焦電効果に寄進する応力成分 $\sigma_2 + \sigma_3$ が全体応力 σ の 80%に達する。また $\langle 0\bar{1}10 \rangle$ 方向において焦電効果による熱応力 σ_3 が総合応力の 90%を占めている。このように LT の研削において研削抵抗による外部応力そのものより、圧電・焦

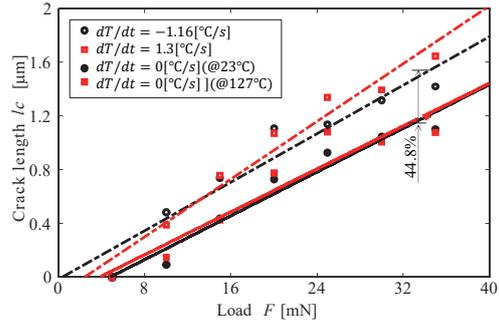


Fig.8 Reduction in toughness

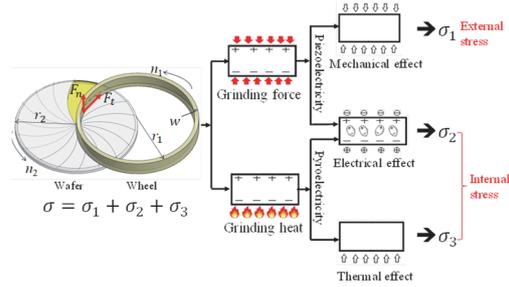


Fig.9 Stress component in grinding process

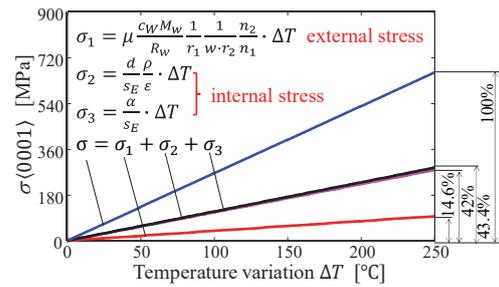


Fig.10 Estimated stress components at $\langle 0001 \rangle$

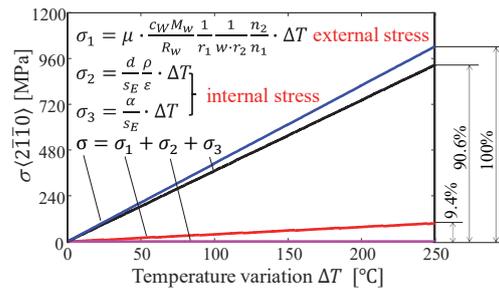


Fig.11 Estimated stress components at $\langle 0\bar{1}10 \rangle$

電効果による内部応力が大きく、研削中 LT が割れる主因である。さらに、結晶方位 $\langle 0\bar{1}10 \rangle$ に沿って亀裂が発生しやすいと示唆している。

最後に、圧電・焦電効果による内部応力を抑制するため、①研削液の温度制御、②電解質添加により発生した表面電荷の中和の二つの方策を考案し、ダイヤモンド砥石を用いて LT ウエハの研削を行い、その有効性を検証した。

Fig.12 には実験に用いたロータリ型インブリード研削盤を示し、また研削条件は Table 2

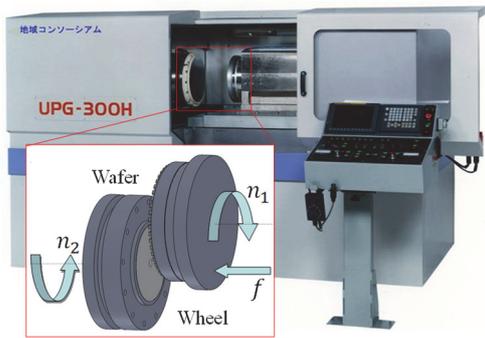


Fig.12 Grinding machine
Table 2 Grinding conditions

Grinding wheel	SD3000C160V (Heart type)
Wheel speed n_1 [rpm]	1000
Wafer type	4 inch LiTaO ₃ wafer
Workpiece speed n_2 [rpm]	50
Feed rate f [$\mu\text{m}/\text{min}$]	2
Solution	CH ₃ COOH
Concentration [vol%]	0 ~ 5
Cool temperature T [$^{\circ}\text{C}$]	5 ~ 35
Substrate	Glass

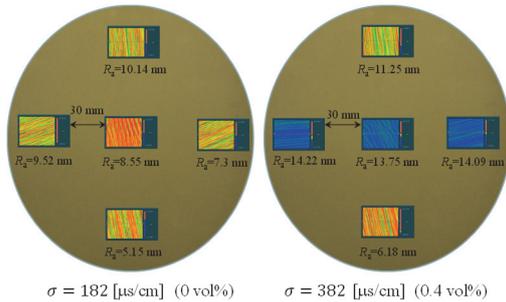


Fig.13 Ground wafers

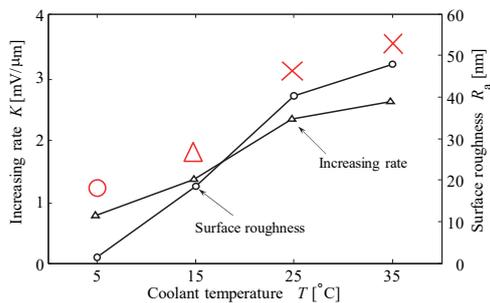


Fig. 14 Effect of temperature control

に示した. 研削温度を $T = 5\sim 35^{\circ}\text{C}$ 間に $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$ の精度で制御した. また, 研削液に酢酸(CH_3COOH)を $0\sim 5\text{vol}\%$ 添加し, 研削液の電気伝導率を $180\sim 450[\mu\text{S}/\text{cm}]$ に変化させた.

研削過程では, 研削抵抗および研削熱源として砥石主軸スピンドルの消費動力をモニターし, その変化率 (W/min or $\text{mV}/\mu\text{m}$) を評価パラメータとした. そして研削後のウエハ表

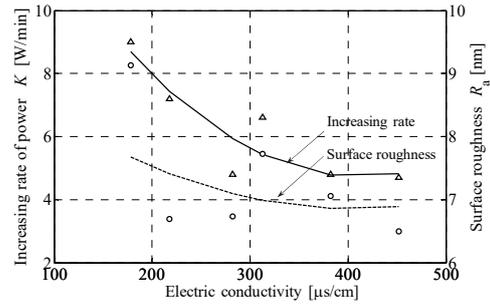


Fig.15 Effect of electrolyte

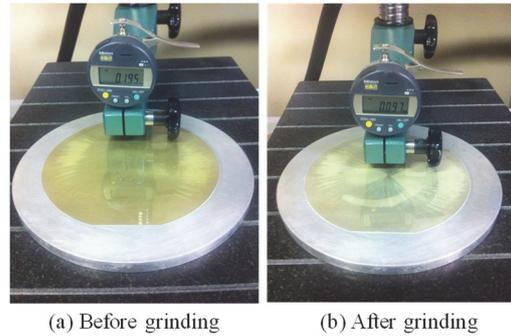


Fig.16 LT wafer thinned less $100\mu\text{m}$

面観察を行なった. その一例を Fig.13 に示す. まずウエハに破損, 亀裂の有無を観察し, 研削性能を定性的に評価した. 次にウエハを 3D 表面計測(NewView-200)し, その粗さを定量的に評価した.

Fig.14 には, 研削液に水道水を用いたときその温度による砥石主軸の動力の増加率およびウエハの仕上げ面粗さの変化を示す. また, 図中の“ \times ”は割れ, “ Δ ”は亀裂, “ \circ ”は無損傷を表している. このように研削液の温度が低くなるにつれて, 研削動力の増加率および仕上げ面粗さがともに低くなり, ウエハの破損が抑制されていることがわかる. これは, 温度制御により LT の焦電効果が抑えられていると考えられる.

次に, 室温で研削液に酢酸を添加して, 電気伝導率を変えたときに研削動力の増加率および仕上げ面粗さを Fig.15 に示す. 研削液の電気伝導度が増加すると, 研削動力の増加率および仕上げ面粗さがともに低くなることが明らかである. このように研削液の電気伝導度が上がると, 研削中に LT ウエハの分極により発生した表面電荷が研削液を通して中和され, LT ウエハ内部応力が緩和されたためと推察される.

最後に, 研削液に温度制御と電解質の添加の両方を施し, $100\mu\text{m}$ 以下に薄片化した 4 インチ LT ベアウエハを実例(Fig.16)に, 本研究の着眼点と考案手法の妥当性を示す.

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 5 件)

- ① 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 J. of Advanced Manufacturing Tech., 1-8(2016). DOI: 10.1007/s00170-016-9836-1. 査読有
- ② Wei Hang, Libo Zhou, Kehua Zhang, Jun Shimizu, Julong Yuan; Study on grinding of LiTaO₃ wafer using effective cooling and electrolyte solution, Precision Engineering, Vol.44, 4(2016), pp.62-69. DOI: 10.1016/j.precisioneng.2015.10.001. 査読有
- ③ 尾鷲 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, Vol.82 No.2(2016), pp.186-191. DOI: <http://doi.org/10.2493/jjspe.82.186>. 査読有
- ④ 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 一第 3 報: 砥石に含まれる塩基の作用の解明と砥石物性値の最適化による CMG の確立 一, 精密工学会誌, Vol.81, 10(2015), pp.957-962. DOI: <http://doi.org/10.2493/jjspe.81.957>. 査読有
- ⑤ Yutaro EBINA, Tomoya YOSHIMATSU, Libo ZHOU, Jun SHIMIZU, Tepei ONUKI and HirotaKa OJIMA: Process study on large-size silicon wafer grinding by using a small-diameter wheel, Journal of Advanced Mechanical Design, Systems, and Manufacturing (Bulletin of the JSME), Vol.9, 5(2015), pp.1-11. (DOI: <http://doi.org/10.1299/jamdsm.2015jamdsm0007>). 査読有
- ⑥ Effects of ultrasonic vibration on abrasive pellet working life for Si wafer using ultrasonic assisted fixed abrasive chemical mechanical polishing(UF-CMP), The 8th Int'l Conf. on Leading Edge Manufacturing in 21st Century (LEM21), (2015), Oct.18-22, Kyoto/Japan, Proc. of 8th Int'l Conf. on LEM21. 5 pages. 査読有
- ⑦ Ke Wu, Naoki Yamazaki, Libo Zhou, Jun Shimizu, Tepei Onuki, HirotaKa Ojima: Study on the Effects of Chemical Agents and Environment on Material Removal Rate in Sapphire Polishing, The 8th Int'l Conf. on Leading Edge Manufacturing in 21st Century (LEM21), (2015), Oct.18-22, Kyoto/Japan, Proc. of 8th Int'l Conf. on LEM21. 5 pages. 査読有
- ⑧ Ke Wu, Naoki Yamazaki, Yutaro Ebina, Libo Zhou, Jun Shimizu, Tepei Onuki, HirotaKa Ojima, Takashi Fujiwara: Study on Sapphire Wafer Grinding by Chromium Oxide (Cr₂O₃) Wheel, Applied Mechanics and Materials, Vol. 1136, (2015), Oct.5-7, Jeju/Korea, pp.311-316. (DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.1136.311). 査読有
- ⑨ Tepei Onuki, Yutaro Ebina, HirotaKa Ojima, Jun Shimizu, Libo Zhou: Wide range and accurate measurement of wafer thickness gauge using optical spectral analyzer, Applied Mechanics and Materials, Vol. 1136, (2015), Oct.5-7, Jeju/Korea, pp.581-585. (DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM. 1136.581). 査読有

[その他]

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

[学会発表] (計 13 件)

- ① Wentong LU, Libo ZHOU, Jun SHIMIZU, Tepei ONUKI, HirotaKa OJIMA, Takeyuki YAMAMOTO: Stress analysis of LT wafer during grinding process, (2016), Hamamatsu/Japan, Nov. 14-16, Proc. of 16th Int'l Conference on Precision Engineering (ICPE2016). 2 pages. 査読有
- ② Tepei ONUKI, Yuki NEMOTO, HirotaKa OJIMA, Jun SHIMIZU, Libo ZHOU: Error characteristics analyses in optical wafer-thickness measurements, (2016), Hamamatsu/Japan, Nov. 14-16, Proc. of 16th Int'l Conference on Precision Engineering (ICPE2016). 2 pages. 査読有.
- ③ Libo Zhou, Yutaro Ebina, Ke Wu, Jun Shimizu, Tepei Onuki, HirotaKa Ojima: Theoretical analysis on effects of grain size variation, (2016), Stockholm/Sweden, Oct. 2-5, Proc. of the 19th Int'l Symposium on Advances in Abrasive Technology (ISAAT2016), pp.124-129. 査読有
- ④ 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 Int'l Conf. on Leading Edge Manufacturing in 21st Century (LEM21), (2015), Oct.18-22, Kyoto/Japan, Proc. of 8th Int'l Conf. on LEM21. 5 pages. 査読有
- ⑤ Ke Wu, Naoki Yamazaki, Libo Zhou, Jun Shimizu, Tepei Onuki, HirotaKa Ojima: Study on the Effects of Chemical Agents and Environment on Material Removal Rate in Sapphire Polishing, The 8th Int'l Conf. on Leading Edge Manufacturing in 21st Century (LEM21), (2015), Oct.18-22, Kyoto/Japan, Proc. of 8th Int'l Conf. on LEM21. 5 pages. 査読有
- ⑥ Ke Wu, Naoki Yamazaki, Yutaro Ebina, Libo Zhou, Jun Shimizu, Tepei Onuki, HirotaKa Ojima, Takashi Fujiwara: Study on Sapphire Wafer Grinding by Chromium Oxide (Cr₂O₃) Wheel, Applied Mechanics and Materials, Vol. 1136, (2015), Oct.5-7, Jeju/Korea, pp.311-316. (DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.1136.311). 査読有
- ⑦ Tepei Onuki, Yutaro Ebina, HirotaKa Ojima, Jun Shimizu, Libo Zhou: Wide range and accurate measurement of wafer thickness gauge using optical spectral analyzer, Applied Mechanics and Materials, Vol. 1136, (2015), Oct.5-7, Jeju/Korea, pp.581-585. (DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM. 1136.581). 査読有

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・教授
研究者番号 : 40292479

小貫 哲平 (ONUKEI, Tepei)
茨城大学・工学部・准教授
研究者番号 : 70400447

尾鷲 裕隆 (OJIMA, HirotaKa)
茨城大学・工学部・准教授
研究者番号 : 90375361

(3)研究協力者

山本 武幸 (YAMAMOTO, Takeyuki)
陸 文通 (LU Wentong)