次世代半導体基板の超精密加工プロセスに関する研究

熊本大学大学院 自然科学研究科 久保田 章亀



発表内容

• 研究背景

• 提案加工法(鉄触媒援用研磨法)の紹介

単結晶SiC基板の加工例

• 単結晶ダイヤモンドの加工例

研究背景

エネルギー利用効率の向上に向けて、電気エネルギーの輸送や 変換装置に用いられるパワー半導体デバイスに飛躍的な性能向上 が求められている.











エレベータ制御



産業用ロボット・モータ制御

ハイブリッド自動車

研究背景

バンドギャップがSiに比べて大きい

-高温半導体デバイス材料としての優位性

- 高い飽和電子速度と高い絶縁破壊電界強度

ー(1)デバイスの大電流・高耐圧化 (2)高周波化 (3)小型化 (4)集積化 (5)低損失化

- 高い熱伝導度

ーデバイス中で発生した熱を効率よく放出可能

表 各種機能材料の物性比較

| | Si | GaAs | 3C-SiC | 6H-SiC | 4H-SiC | GaN | Diamond |
|------------------------------|------|------|--------|--------|--------|------|---------|
| バンドギャップ(eV) | 1.11 | 1.43 | 1.5 | 2.86 | 3.09 | 3.44 | 5.5 |
| 絶縁破壊電界(MV/cm) | 0.6 | 0.6 | 1.5 | 3.2 | 3.2 | 2 | 10 |
| 移動度(cm²/Vs) 電子 | 1100 | 6000 | 750 | 370 | 800 | 900 | 2000 |
| 正孔 | 420 | 320 | 40 | 90 | 115 | 10 | 1550 |
| 飽和電子速度(10 ⁷ cm/s) | 1.0 | 1.0 | 2.5 | 2.0 | 2.0 | 2.5 | 3.0 |
| 熱伝導度(W/cmK) | 1.5 | 0.5 | 5.0 | 4.9 | 4.9 | 2.1 | 20.0 |
| 比誘電率 | 11.8 | 10.9 | 10 | 10 | 10 | 9.5 | 5.5 |

研究背景

パワーデバイス実用化への技術的課題

- 1. 結晶の大口径化技術・結晶欠陥の低減技術
- 2. 高品位エピタキシャル膜成長技術
- 3. 単結晶基板の加工技術



高硬度かつ化学的に安定なため、 次世代パワーデバイス用材料の 加工は極めて困難

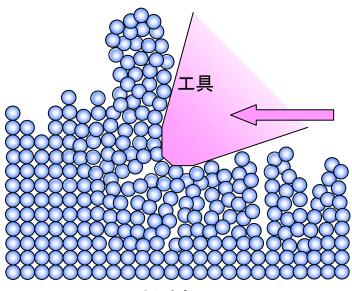


<u>加工技術の開発が技術的課題のひとつ</u>



機械加工と化学加工との違い

機械的作用による 材料欠陥の導入,運動,増殖

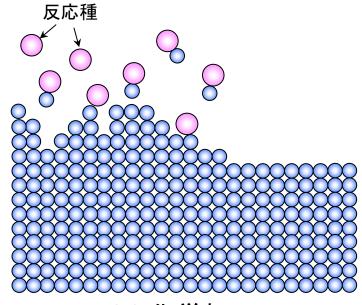


(a) 機械加工

加工能率:◎

加工精度: △~×

表面の原子が自然に除去される物理・化学現象



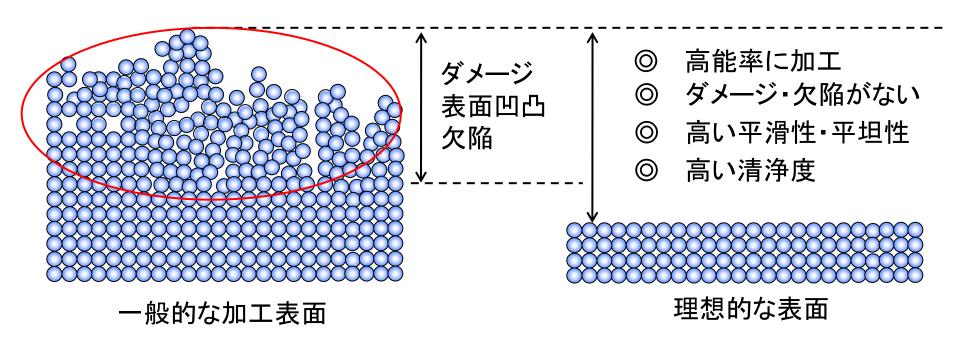
(b) 化学加工

加工能率:×

加工精度:◎



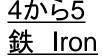
求められる加工技術の要件



機械加工のように高能率に加工でき、かつ、化学加工のように結晶構造を崩すことなく無擾乱な表面を作製できる新しい表面平坦化技術が必要

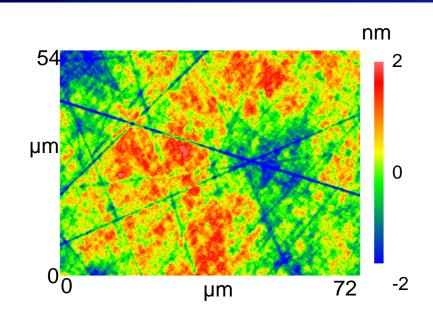
材料と硬度

| 硬度 | 修正硬度 | 標準鉱物名 | 化学組成 | 硬さ(Hk) |
|----|------|----------------------|---|----------------|
| 1 | | 滑石 タルク | $Mg_3(OH)_2(Si_4O_{10})$ | _ |
| 2 | | 石膏 | CaSO ₄ .2H ₂ O | 32 |
| 3 | | 方解石 | CaCO ₃ | 135 |
| 4 | | 蛍石 | CaF ₂ | 163 |
| 5 | | 燐灰石 | Ca ₅ F(PO ₄) ₃ | 430 |
| 6 | | 正長石 | K(AISiO ₈) | 560 |
| 7 | | 熔融石英 | SiO ₂ | _ |
| 7 | 8 | 石英 水晶 | SiO ₂ | 820 |
| 8 | 9 | 黄玉トパーズ | $Al_2(F,OH)_2(SiO_4)$ | 1340 |
| - | 10 | ザクロ石 | (Mg,Ca,Fe) ₃ (Al,Cr,Fe) ₂ (SiO ₄) | 1360 |
| - | 11 | 熔融ジルコニア 炭化タンタル | ZrO ₂ TaC | (1160) 2000 |
| 9 | 12 | 綱玉 コランダム 炭化タングステン | Al ₂ O ₃ WC | (2100) 1880 |
| - | 13 | 炭化ケイ素 | SiC | 2480 |
| - | 14 | 炭化ホウ素 | B ₄ C | 2750 |
| 10 | 15 | ダイヤモンド(金剛石) | С | 7000 |



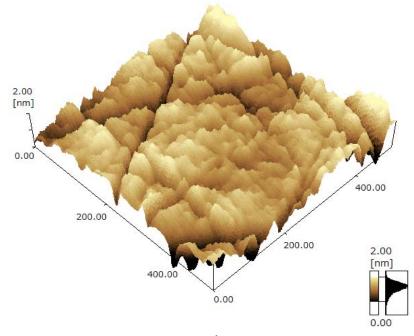


機械的作用による加工面の一例



(a) 1/4μmのダイヤモンド砥粒を 用いた加工面

Ra: 0.614 nm PV: 7.219 nm



(b) 1/4µmのダイヤモンド砥粒 を用いた加工面

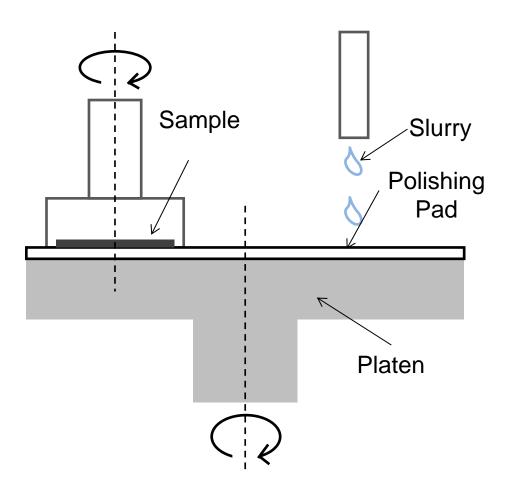
Ra: 0.340 nm PV: 3.481 nm



粒子径の小さなダイヤモンド砥粒を用いることによって, 研磨傷(スクラッチ)深さの低減や加工ダメージ導入の 抑制を図っている.



化学的機械的研磨(Chemical Mechanical Polishing: CMP)

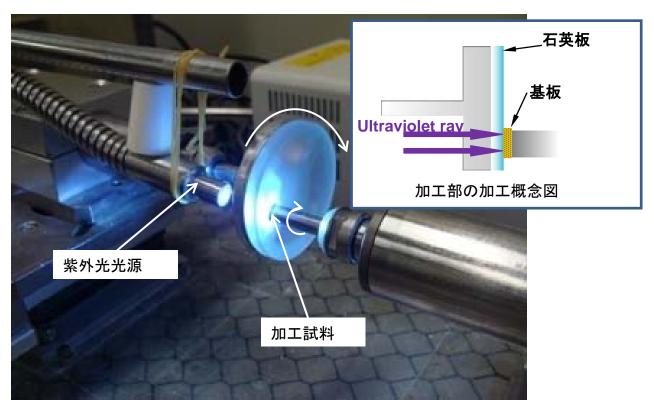


表面に削りやすい層(酸化層 あるいは水酸化物層)を化学 的に形成し、その部分を機械 的に除去する研磨方法.

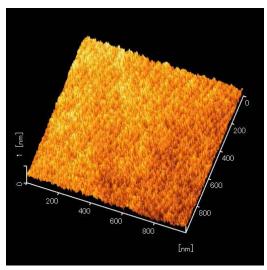
スラリーと呼ばれる化学薬品と研磨粒子(主に酸化物微粒子, 粒子径数十nm~数μm)を混合した溶液を使用.

UV(紫外光)アシスト研磨法

化学的機械的作用と光化学反応を重畳させた 高精度加工方法の可能性を検討



熊本大学:渡邉純二客員教授, 峠睦教授が開発



加工したSiC表面のAFM像



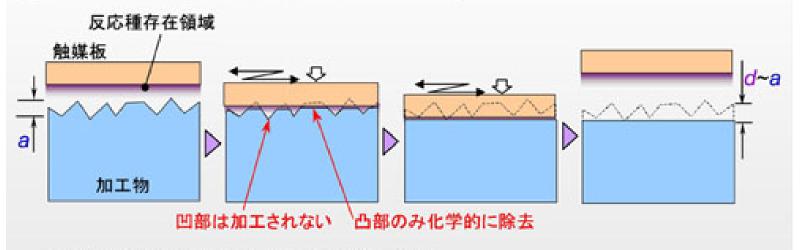
触媒基準エッチング法

触媒基準エッチング法 CAtalyst-Referred Etching (CARE)

CAREに求められる要件

- 1.基準面である触媒表面で反応種が作られる
- 2.反応種は触媒表面を離れると直ちにに失活する
- 3.触媒表面の物性は長時間変化しない

フッ酸(HF)溶液中で白金(Pt)触媒を作用させることによって加工を実現.



- ◎ 化学的な加工のため、加工面にダメージ無し
- ◎ 凸部から選択的に加工するため、高能率な平坦化が可能 (結晶欠陥や結晶面方位の影響を受けにくく、多結晶材の平坦化も可能)

大阪大学 山内和人研究室 HPより引用



活性種の酸化力について

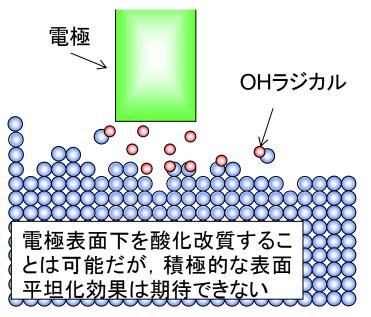
| Flourine Hydroxyl radical | 2.23 | | | | |
|------------------------------|------|-------------------|--------|------------------|------------------|
| Hvdroxyl radical | 2.06 | | | | |
| r iyal oxyi ra alcal | 2.00 | | | | |
| Atomic oxygen (singlet) | 1.78 | | | | |
| Hydrogen peroxide | 1.31 | | | | |
| Perhydroxyl radical | 1.25 | | Ö::Ö | ·Ö::Ö | ·Ö::Ö. |
| Permanganate | 1.24 | (| Oxygen | Superoxide anion | Peroxide |
| Hypobromous acid | 1.17 | | 02 | · 0 ₂ | $\cdot O_2^{-2}$ |
| Chlorine dioxide | 1.15 | H:ċ | Ö::Ö:H | ю́н | :Ö:H |
| Hypochlorous acid | 1.10 | | | 603 | |
| Hypiodous acid | 1.07 | Hydrogen Peroxide | | Hydroxyl radical | Hydroxyl ior |
| Chlorine | 1.00 | | 202 | · OH | OH ⁻ |
| Bromine | 0.80 | | | | |
| lodine | 0.54 | | | | |

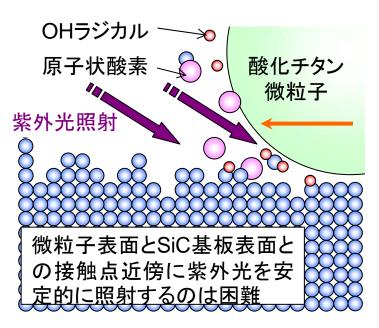


OHラジカルの発生方法

OHラジカルの発生方法

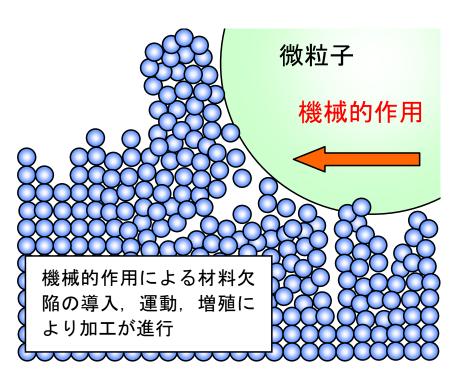
- × 超音波照射
- △ 放電プラズマ
- △ 酸化チタンを用いた光触媒反応
- 〇 促進酸化法:過酸化水素,オゾン,紫外線による反応
- フェントン反応による方法:H₂O₂+Fe²⁺→OH·+ Fe³⁺ +OH⁻







活性種(OHラジカル)の供給方法



触媒作用で生成 された反応種 化学的作用 活性な反応種と母材原 子とを化学的に作用させる

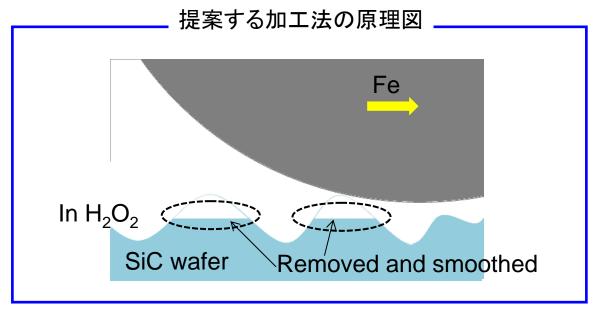
従来の機械的研磨後

提案する加工法

微粒子を媒体にしてOH・を被加工物近傍に供給し、被加工物表面の最表面を改質し、改質層を除去、エッチングすれば高能率加工ができるのでは?と考えた.



提案する加工法の加工原理

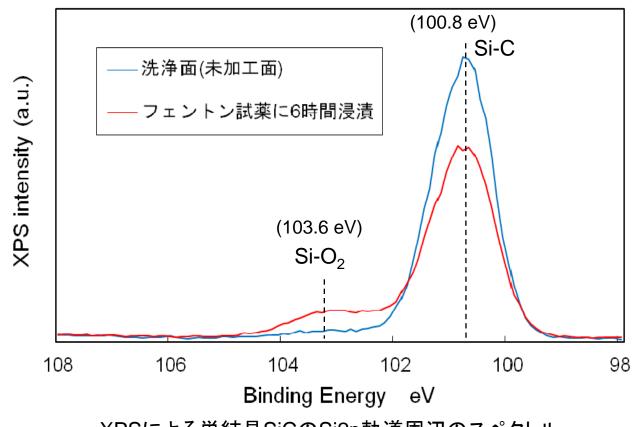


Fe²⁺+H₂O₂
$$\rightarrow$$
Fe³⁺+OH⁻+OH⁻
Fe³⁺+H₂O₂ \rightarrow Fe²⁺+OOH⁻+H⁺
SiC+4OH⁻+O₂ \rightarrow SiO₂+2H₂O+CO₂ \(\)
SiO₂+2OH⁻ \rightarrow [SiO₂(OH)₂]²⁻
(4)

OH・ EH_2O_2 中の溶存酸素によりSiC表面を酸化改質(SiOx)し、その部分を優先的に除去・溶出することによって加工を実現する.



加工原理の検証実験(XPSによる表面評価)



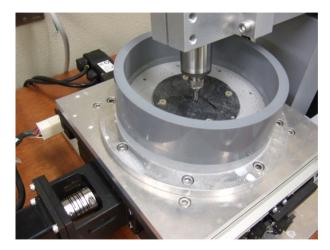
XPSによる単結晶SiCのSi2p軌道周辺のスペクトル

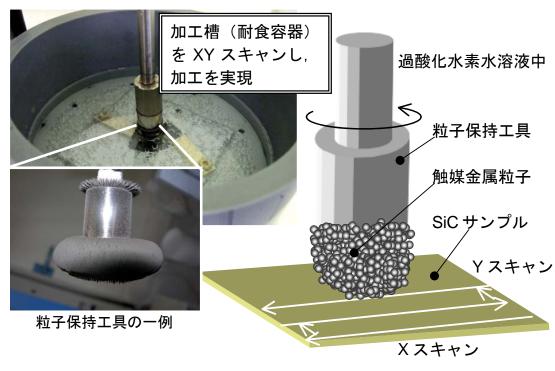


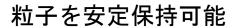
フェントン試薬($FeSO_4 + H_2O_2$)中にSiC基板を浸漬させることによって、SiC表面上に酸化物形成を確認.



磁性微粒子を用いた触媒化学加工方法







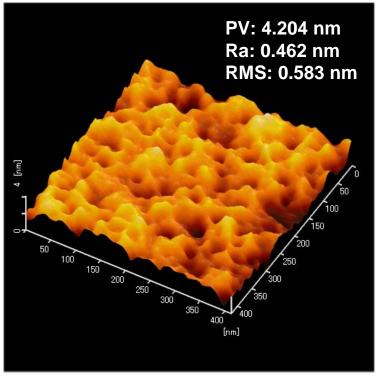
磁力制御により、鉄粒子凝集状態を制御可能 (パッドレス研磨)

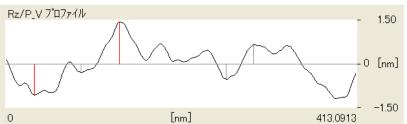
鉄粒子を磁力で保持したsmall toolを用いることにより、非球面形状等の表面創成が可能



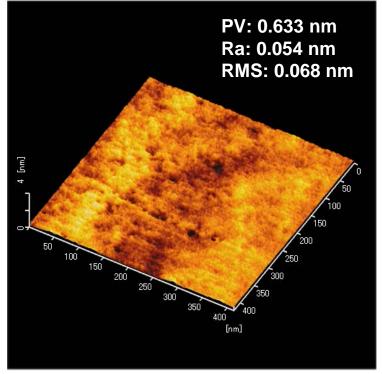
加工前後の表面凹凸の変化

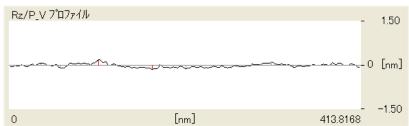
加工前





加工後





SiC基板の大口径化(新聞報道)



普及開始が15年ご 普及開始が15年ご

で、高度なシミュ り、新日鉄は市場 ろと見られてお 高温環境で製造す 産時期を探る。 動向を見ながら量 表。新日鉄はより高品質 の品質で開発を公 に発光ダイオ

じ)単結晶ウエハー 径の炭化ケイ素 (Si

イスの製造コスト

材料と見られている。 大幅に小型化でき、 スと比べ電力損失が半分 発費は約12億円。 6が径SiCウエハー Cは従来のデバイ イス体積も

た。約15億円を投じ、中を倍増させると発表し B)用負極材の生産能力ムイオン二次電池(LI 青島市)の年産能力を4島雅能都化成」(山東省 年秋に中国でリチウ ・普及のカギとなる65%

6がら一〇ウエ

日 鉄

れに開発を競っている。

この研究開発費の3分

産業技術総合開発機構の2は、新エネルギー・

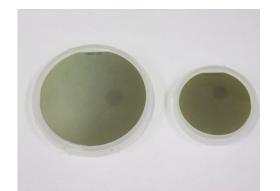
(NEDO)の課題設定

要求が強いため、従来の 動車向けの用途ではデバ ンプル出荷を始める。自 したことで実用開発の

からの助成で

径化を実現した。研究開 抑える設備機構の最適化 結晶成長条件、 よる大口径結晶の割れを 型産業技術開発費助成金

三菱化 1



3インチ・2インチのSiC基板

パワー半導体全体 (次世代含む)

10

(兆円)

(億円)

1200

1000

800

電力制弾などに使う。S

札として期待されるS-Cが早期に普及する可能性が高まる。 コスト競争力が高まる。 主流だが、富士電機やルネサスエレクトロニクスが8%(150%) 半導体のウエハーを大型化する。

が20 0

2年度にも基板材料に炭化ケイ素(S-C)を使う次世代

現在は直径3

表 俗"

直径を2倍にすれば1枚のウエハー

大口径化でコストダウンが進み、機器の省エネルギーの切り

から取れるチップ数が約4倍になり

て一般に電力損失が5 情報通信 対関に比 障壁になっている。 ら数十倍しているのが現 格がシリコン製の10倍か 採用が始まった。ただ価担つダイオードの一部で 高コストが普及への

機器や産業機器、

ş のラインを設置する方向 12年度に自社工場に合む なのウエ 産業技術総合研究所と3

20(予測) (見通し) 富士経済の資料を基に作成

間に、海外の拠点新設や度から14年度までの3年 産増強に四-12年度の 中国などアジアの で産業用ロボット

するほか、産業機械に組 やす方針。これまで同社 現地生産の採算が

がここまで続くと、

る体制を築く 判断。アジアから輸出す

製造技術を早期に確立で

ンで電流を整える役割を

C半導体の生産を始 ハー対応設備で

で調整に入った。ルネサ 杉で生産の成果を見極 スエレクトロニクスは3 12年度にも6だでの

が生産。海外では独イン すでにロー ズなどが本腰を入れ 後発の富士電機やル Cのダイオ ムや三菱電機 5

100%が)が

体国内最大手の三菱電機 6だウエハーを早期に導 ネサスは生産効率の高い 力を高める。パワー

は現在45で生産してお

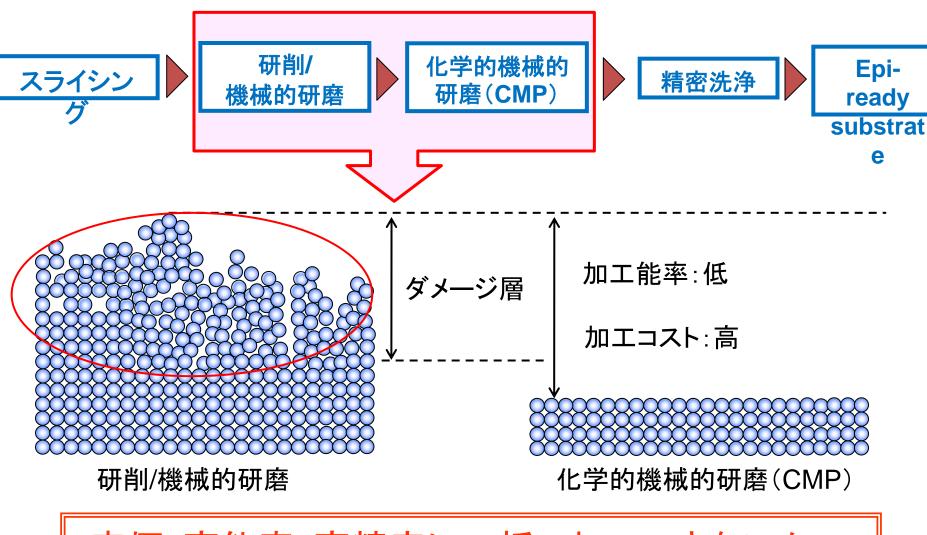
ある自動車向けの供給は とされる。需要の本命で るが依然高止まりする。 供給の構図は崩れつつあ ある状況。ウエハー る三菱電機ですら、現的内に応用製品を多数抱え 受注にはコストダウン 格は米クリー 点では生産能力に余裕が されるからだ。また自社 ると集留まりが下がると に課題があり大口径化す SーCが中長期で普及

Ż 기

対応の準備は進める。



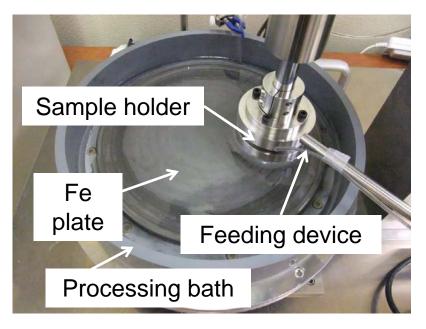
一般的なSiC基板の加工工程



安価・高能率・高精度に一括で加工できないか?



インチサイズSiC基板平坦化へ向けた装置開発



実験装置の加工部写真

| | 土な夫闕末件 | | |
|------------------|--|--|--|
| Sample | 4H-SiC (0001) on axis (As-slice substrate) | | |
| plate | Fe | | |
| Solution | H ₂ O ₂ (30%) Fe particle (3 wt%) | | |
| Supply flux | 80 ml/min | | |
| Pressure | 0.97 kg/cm ² | | |
| Revolution speed | Plate 30 rpm Sample 30 rpm | | |

主た宝騇冬件



各時間におけるSiC基板平坦化の過程



(a) Preprocessing



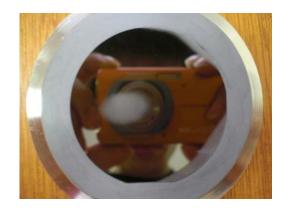
(b) Processing time:1 h



(c) Processing time:2 h



(d) Processing time:4 h



(e) Processing time:6 h



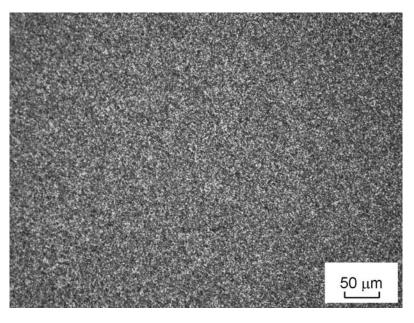
(f) Processing time:8 h



加工前のAs slice面の状態から鏡面を実現



金属顕微鏡による表面観察





加工前

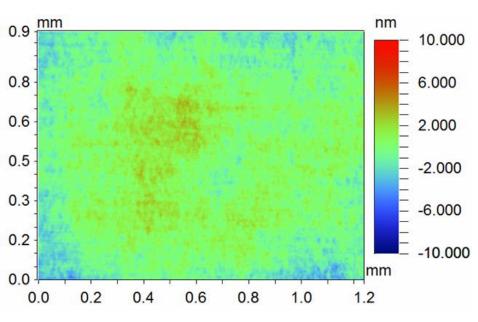
加工後

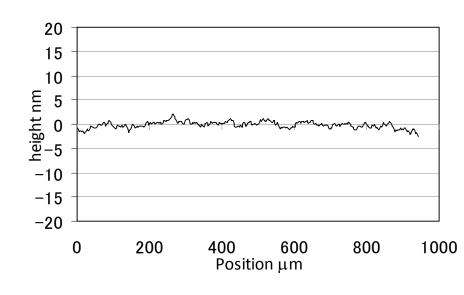


加工表面上にスクラッチが一切ないことを確認



位相シフト干渉顕微鏡による表面評価





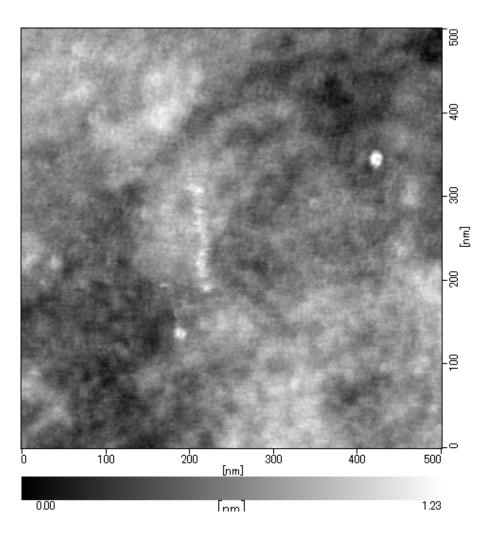
Ra: 0.89 nm, PV: 9.27 nm



良好な平坦度であることを確認



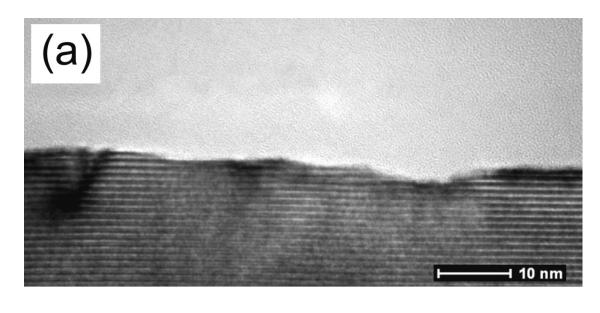
加工表面の原子間力顕微鏡像

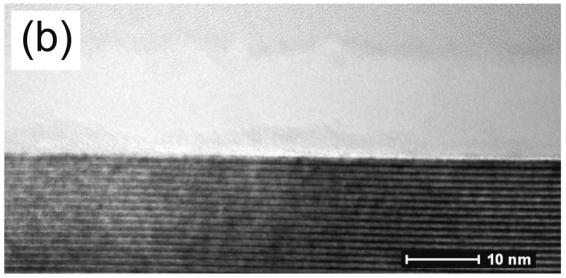


Ra: 0.160 nm, RMS: 0.195 nm, Rz: 1.71 nm

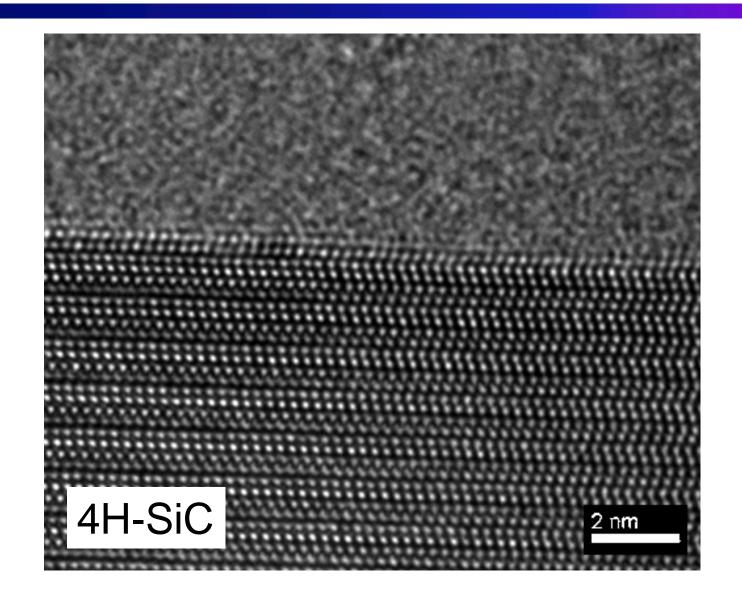


提案加工法により原子レベル平坦面を実現





原子レベルでSiC基板の平坦化を実現



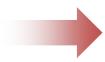


ダイヤモンドの高精度加工への試み

代表的なダイヤモンドの加工法

ダイヤモンド砥粒を用いたラッピング(スカイフ加工)

機械的・熱的破壊を通じて 材料を除去する



クラックや転位を含んだダメージ 層の形成が避けられない

• <u>レーザー加工</u>

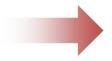
局部的に加熱し、ダイヤモンドを構成する炭素を炭酸ガス化して除去する



熱的加工であるため、表面への ダメージが大きい

- イオンビーム加工

アルゴンなどのイオンを照射 することでダイヤモンドを構 成する炭素原子を除去する



物理的加工であるため, 表面凹 凸やダメージが残る

溶液中でのダイヤモンド加工への挑戦

常温・常圧下における溶液中での触媒化学反応を利用した加工プロセスであるため、<u>高コストな真</u>空チャンバーや排気ポンプ等が一切不要.

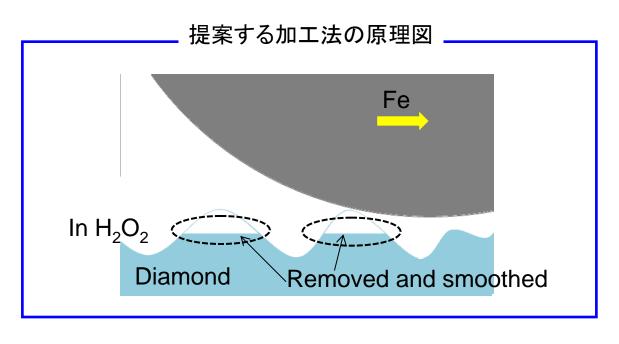


低コスト・低環境負荷型の 新しいダイヤモンド基板加工法

一見非常識とも思われる溶液環境のもとで, ダイヤモンドの高精度加工に挑戦

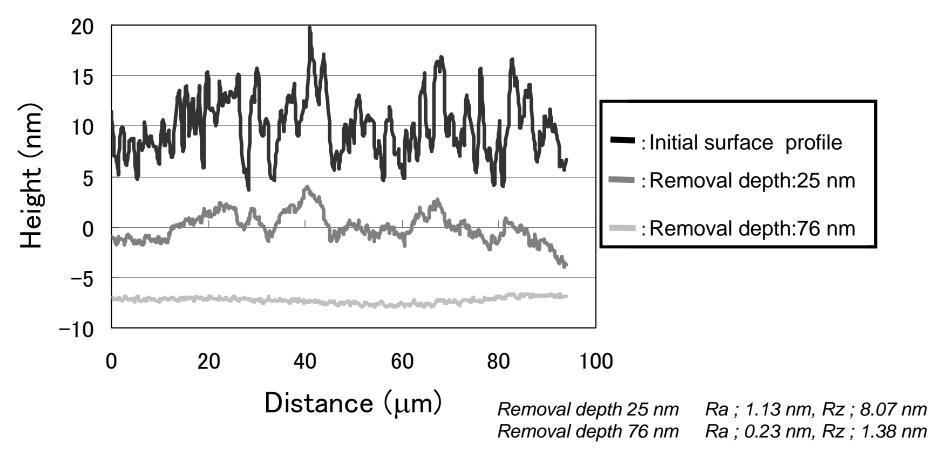


提案する加工法の加工原理





ダイヤモンド表面の加工量と表面粗さ



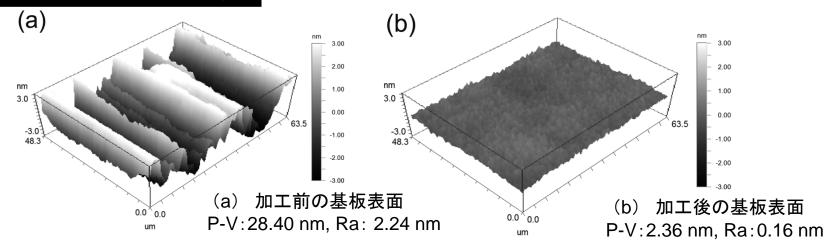


表面凸部から優先的に加工が進行

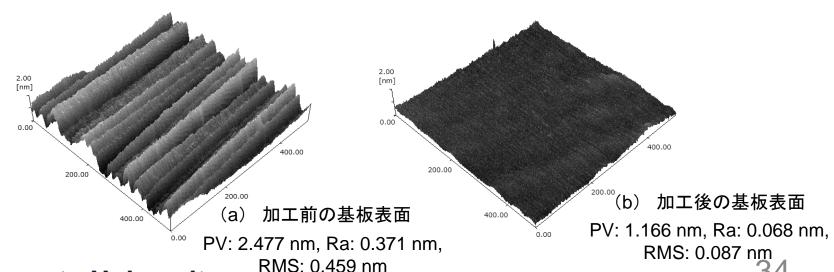


加工前後の表面凹凸の変化

位相シフト干渉顕微鏡



原子間力顕微鏡



Kumamoto University

ラマン分光測定

ラマン分光法

