

平成26年度採択
戦略的基盤技術高度化・連携支援事業
戦略的基盤技術高度化支援事業

「パワーデバイス用 SiC ウエハの高速高精度製作を可能とする
融合研磨技術の実用化開発」

研究開発成果等報告書

平成29年 5月

担当局 中国経済産業局
補助事業者 公益財団法人ひろしま産業振興機構

目 次

第1章 研究開発の概要

1-1	研究開発の背景・研究目的及び目標	P1
1-1-1	研究開発の背景	P1
1-1-2	研究開発の目的及び目標	P3
1-2	研究体制	P5
1-3	成果概要	P5
1-4	当該研究開発の連絡窓口	P6

第2章 本論

2-1	新研磨技術グラインドラップの装置開発	P7
2-1-1	グラインドラップ定速送り研磨装置の開発	P7
2-1-2	グラインドラップ定速送り装置による加工実験	P8
2-1-3	グラインドラップ定圧研磨装置の試作開発	P8
2-2	新研磨技術グラインドラップの砥石・スラリー開発	P10
2-2-1	砥石性能検査研磨装置と砥石製造装置の開発試作	P10
2-2-2	超仕上げ工程砥石により研磨した SiC ウエハの評価	P12
2-2-3	グラインドラップによる SiC ウエハの研磨コスト	P13
2-3	新研磨技術グラインドラップを導入した SiC ウエハ生産技術の確立	P14
2-3-1	砥石の弾性評価	P14
2-3-2	砥石の粘弾性評価	P15
2-3-3	研削時のクーラント温度による仕上げ面粗さの変化	P18
2-3-4	SiC ウエハ研磨プロセスの検討	P19
2-4	新研磨技術グラインドラップ装置・砥石の事業化戦略	P21

第3章	全体総括	P23
-----	------	-----

第1章 研究開発の概要

1-1 研究開発の背景・研究目的及び目標

1-1-1 研究開発の背景

SiC（炭化ケイ素）は、低損失に大電力を制御できるパワーデバイスの材料である。そのため、SiC はこれからの省エネ型社会を構築していくための必須アイテムと考えられている。昨今ちょうど、SiC によるパワーデバイスが、東京メトロ銀座線やJR山手線の車両に採用されるなど実用化が開始されたところで、今後はハイブリッド自動車や電気自動車、再生可能エネルギー機器（ソーラー、風力）、変電所を始め、家電製品のモーターや電源の中に SiC パワーデバイスが導入され、電力変換の高効率化が推進されていくと考えられ、世界のパワーエレクトロニクス需要は、現在の 6 兆円から 2030 年に 20 兆円へと成長すると予測される。

このように、SiC パワーデバイスは、これからの社会に必要とされ、間違いなく普及していくアイテムであるが、当初の市場予測に比べて、普及が遅れている。これは、SiC パワーデバイスの価格が市場に受け入れられる程度にまで下がっていないことによる。デバイス作製プロセスは、既存の Si デバイス用装置を流用、改造することで対応できることから、デバイス作製プロセスにおける生産性は Si デバイスと変わらず、SiC と Si のデバイスの価格差は大きく生じない。両者の価格差は、主にウエハコストで生まれる。200mm φ Si ウエハ価格が 2,000 円程度に対して、2 インチ（50mm）φ SiC ウエハの価格は 40,000 円台で、単位面積あたりで SiC ウエハは 320 倍 Si ウエハより高い。それは、SiC が切削工具にも使用されるほど硬く、加工しづらいためであり、ウエハ加工に時間がかかり、生産性が上がらないことから、ウエハ価格は高いままとなっている。

現在、市場から SiC ウエハの生産に、革新が強く求められており、2015 年 5 月 20 日にトヨタ自動車が開催した SiC パワー半導体開発に関する説明会では、SiC パワーデバイスの量産車への搭載には SiC ウエハのコスト削減が最優先課題と発表され、ウエハやプロセス装置の周辺技術開発を加速させたいという意向が伝えられた。

SiC ウエハは図 1 のプロセスで加工される。Si 同様に巨大結晶を育成し、円柱状のインゴットに成形して、ワイヤーソーで切断しウエハ形状に加工する。この後の工程からが研磨工程となる。従来プロセスでは、研削工程でワイヤーソーでの切断面の平坦化、切断ダメージの除去を行って、次のラップ工程で研削工程のダメージ除去と面粗度の向上を行っていく。最後に CMP（ケミカルメカニカルポリッシュ）で、デバイス作製が可能となる原子オーダーの平坦度へと追い込まれる。



図 1 従来 SiC ウエハ加工プロセス

SiC ウエハは、他の半導体ウエハと同様に、切断、研削、ラップ、CMP の異なる加工手法を組み合わせた一連の加工プロセスを通して製造される。しかしながら、これら切断、研磨の業界は特殊な縦割り文化の業界で、各加工分野がおのこの独立に技術開発を進める状況があり、一連のウエハ加工のプロセスは、装置ユーザーであるウエハメーカーが、装置を導入して、自らプロセス最適化を行い、ウエハ作製を行っている。このような業界であったため、各加工分野が技術交流することはなかった。

従来研削は、一定送り速度で砥石を試料に当て、削る技術である。試料が削れない場合には、粗い番手の砥石を採用することで対処するのが研削業界の定石であった。そのため、研削は早く削れるが面粗度が悪くなるものであった。研削砥石の開発も粗削り工程用に早く削れる砥石に注力されてきた。一方、従来ラップ加工はスラリーを供給しながら、平面定盤に試料を押し当てて研磨を行う。スラリーは遊離砥粒を含んだ液体で、定盤の回転速度を上げるとスラリーが定盤外周辺部へと飛び散ることから、ゆっくと 50rpm 程度で回転させるのが限界とされ、ラップ加工は面粗度は高いが加工速度が遅くなる傾向があった。

(株)サンエスと(株)フェムテックは、研削（グランド）と研磨（ラップ加工）の融合技術であるグランドラップを考案し、砥石ホイールを 1,000rpm で高速回転させて、高速高精度加工することを実現した。

グラインドラップは図 2 に示すように、粗仕上げ、仕上げ、超仕上げの工程で研磨を行う。

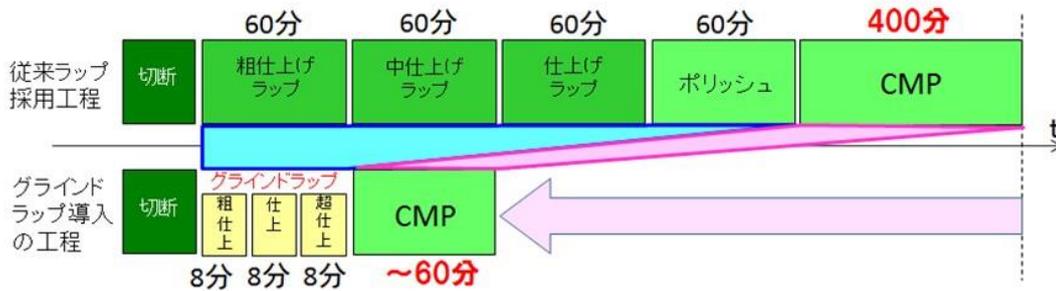


図2 グラインドラップ技術による SiC ウエハ研磨時間の短縮

粗仕上げ、仕上げ工程は、面粗度よりも加工レートを重視する工程であるので、回転軸の送り機構を定速送りとして強制的に加工を進めていく。定速送りの装置では、回転軸の振れ精度がウエハ平坦度やウエハダメージに効いてくる。後に続く仕上げ、超仕上げ工程での必要研磨量を増やさないために、粗仕上げ工程で、できるだけ平坦度を高く、ダメージを少なくしておくことが要求される。

超仕上げの工程では、定圧送り機構を採用する。そのため、低ダメージで加工ができる。この点も従来研削装置に比べて、グラインドラップが優れている点と言える。

1-1-2 研究開発の目的及び目標

ウエハ加工の最終工程である CMP の工程の前は、一般に高速ではあるが一枚一枚加工する研削技術か複数枚処理できるが加工速度が遅いラップ加工技術がある。川下企業ニーズである SiC ウエハの生産性向上とウエハ加工コスト削減に対応するため、本研究開発において我々は、研削（グラインド）加工とラップ加工を融合させた新研磨技術グラインドラップで、難加工材 SiC ウエハを高速高精度かつ複数枚同時に処理し、生産効率を飛躍的に向上させる装置の実現及び生産技術の確立を行い、現状想定から生産性 2 倍、加工コスト半分を達成する。

本研究開発では、3つの開発項目を設けた。これら3つの開発項目において、平成26年度から3年間の各年度、以下の目標を掲げた。

① 新研磨技術グラインドラップの装置開発

初年度目標

- ・ SiC ウエハ 6 インチ 10 枚バッチ式処理のグラインドラップ定速送り型単軸装置の設計・製造

第二年度目標

- ・ グラインドラップ定速送り型単軸装置で、回転体の振れ精度の $5\mu\text{m}$ 以内実現

第三年度目標

- ・ グラインドラップ定速送り型装置の試作及び性能確認とウエハ加工工程の構築

② 新研磨技術グラインドラップの砥石・スラリー開発

初年度目標

- ・ 超仕上げ工程で、平均面粗さ $Ra=5\text{nm}$ 、加工レート $2\mu\text{m}/\text{min}$ の実現

第二年度目標

- ・ 超仕上げ工程で、平均面粗さ $Ra=1\sim 5\text{nm}$ 、加工レート $0.5\sim 2\mu\text{m}/\text{min}$ 以上の実現

第三年度目標

- ・ 4 インチ SiC ウエハ換算で、研磨コスト 4,000 円/枚の達成

③ 新研磨技術グラインドラップを導入した SiC ウエハ生産技術の確立

初年度目標

- ・ 粘弾性評価装置の整備と超仕上げ工程研磨後ウエハの評価方法の確立

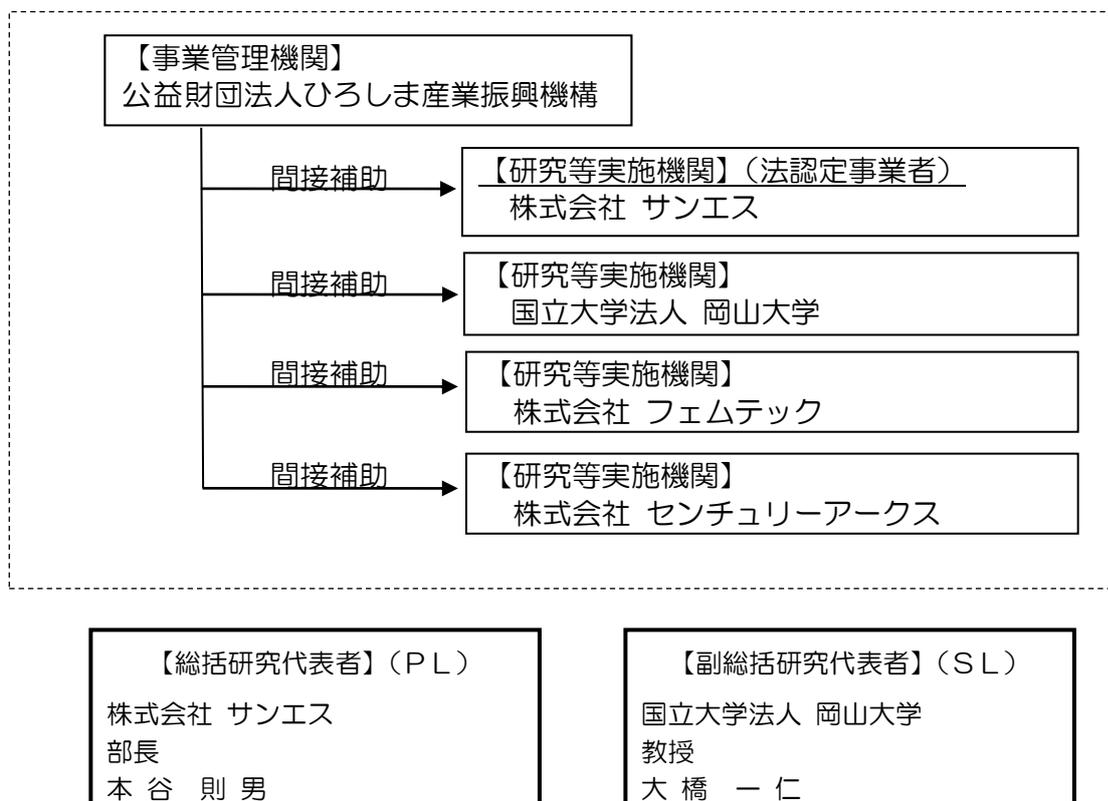
第二年度目標

- ・ 平均面粗さ $Ra=1\text{nm}$ を実現する砥石開発方針の明確化とグラインドラップ研磨メカニズムの構築

第三年度目標

- ・ SiC ウエハ研磨の各工程を8分で完了するプロセスの確立

1-2 研究体制



1-3 成果概要

本研究開発で設けた3つの研究開発項目について、各年度の成果を示す。

① 新研磨技術グラインドラップの装置開発

初年度成果

- ・ SiC ウエハ研磨用のグラインドラップ定速送り研磨装置を開発
- ・ 本研磨装置のウエハセットテーブル面振れ精度 $\pm 2\mu\text{m}$ 以下の実現

第二年度成果

- ・ 開発定速送り研磨装置での加工で、4インチ SiC ウエハの平面度 $2\mu\text{m}$ 以下を達成

第三年度成果

- ・ 開発定速送り研磨装置で、粗仕上げ（平均面粗さ $R_a=30\text{nm}$ ）、仕上げ（平均面粗さ $R_a=5\text{nm}$ ）の工程を構築

② 新研磨技術グラインドラップの砥石・スラリー開発

初年度成果

- ・ 砥石性能検査研磨装置と砥石製造装置を開発試作

第二年度成果

- ・ グラインドラップによる SiC ウエハ研磨の超仕上げ工程加工が、断面 TEM 観察から検出限界以下の低ダメージで実施できていることを確認

第三年度成果

- ・ グラインドラップによる SiC ウエハ研磨の超仕上げ工程加工で、平均面粗さ Ra=0.56nm、最大段差 PV=7.94nm を達成
- ・ 4インチ SiC ウエハ 1枚あたりの研磨コストが、4,000円以下で実施できる目処を立てた

③ 新研磨技術グラインドラップを導入した SiC ウエハ生産技術の確立

初年度成果

- ・ ダイナミック超微小硬度計の導入により砥石表面の弾性評価体制の整備

第二年度成果

- ・ SiC ウエハ研磨用砥石の粘弾性評価により、既存砥石に比べ開発砥石の応力緩和 $\tan \delta$ が格段に大きいことを確認

第三年度成果

- ・ 砥石の粘弾性が、研磨後ウエハの面粗さに及ぼす影響の理論的解釈を実施
- ・ 4インチ SiC ウエハを研磨する3工程を各8分で完了するプロセスを構築

1-4 当該研究開発の連絡窓口

(公財) ひろしま産業振興機構 研究開発支援センター

参事 神田 敏和

電話：(082)240-7712 FAX：(082)242-7709

E-mail：t-kanda@hiwave.or.jp

第2章 本論

2-1 新研磨技術グラインドラップの装置開発

2-1-1 グラインドラップ定速送り研磨装置の開発

従来研削（グランド）と従来ラップの融合技術であるグラインドラップで、粗仕上げと仕上げの2工程の加工を行なう定速送り装置の試作機開発を行った。

グラインドラップの特徴であるスラリー研削が実施できるように、スラリー供給を行いながら、研削できる機構を導入した。

ワークテーブルは、6インチウエハが5枚セットできる。テーブル径は $\phi 540\text{mm}$ とした。回転系の振れ精度を向上させる必要から、スピンドル軸のモーターはビルトインモーターで採用し、スピンドル背面ホールド方式で固定し、砥石径での回転体の振れが、 $\pm 2\mu\text{m}$ 以下の精度で作製できたことを確認した。

当初目標で、6インチウエハ10枚バッチ装置の開発を計画していたが、スピンドルメーカーとの協議の過程で、製作実現性を保証できないとの判断があり、今回は5枚バッチの $\phi 540\text{mm}$ で製作した。製作後の振れ精度確認において、 $\pm 1.1\mu\text{m}$ の精度で組み上がっていることが確認でき、10枚バッチのテーブルで必要とされる精度で、装置製造ができることの確認はできた。

試作開発した装置の写真が以下である。



(a) 全体像



(b) 操作モニター/ウエハテーブル部

図3 試作開発した定速送り装置の写真

2-1-2 グラインドラップ定速送り装置による加工実験

4インチ SiC ウエハの研磨プロセス構築のため、定速送り装置で、粗仕上げ工程と仕上げ工程のプロセス検討を行なった。

ウエハ加工精度の目標一覧を表1に示す。

A)	平面度	2 μ m以下
B)	面粗さ	粗仕上げ工程 Ra=30nm、仕上げ工程 Ra=5nm
C)	最大段差	仕上げ工程 PV=100nm以下
D)	加工レート	粗仕上げ工程 30 μ m/min.、仕上げ工程 4 μ m/min.
E)	除去率	粗仕上げ工程 90%以上、仕上げ工程 80%以上

表1 ウエハ加工精度の目標一覧

続けて、ウエハ研削を行い、評価した結果を表2に示す。

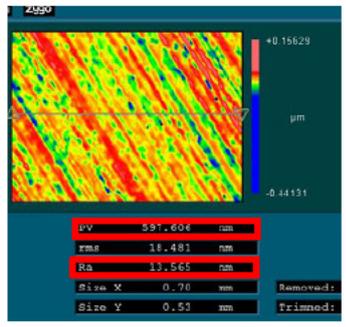
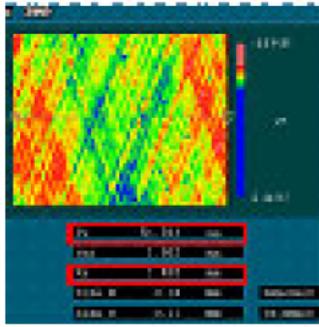
評価項目	#1500	#6000
平面度	2 μ m	2 μ m
平均面粗さ (Ra)	20~30nm	1.5~4nm
最大段差 (PV)	400~600nm	50~80nm
加工レート	30 μ m/min.	3 μ m/min.
除去率	90%	70%
Zygo NewView 画像		

表2 定速送り装置での研削実験結果

この研削結果から、4インチ SiC ウエハ研磨工程で、粗仕上げ工程に#1500の砥石、仕上げ工程に#6000の砥石を用いた工程で加工することで、超仕上げ工程に引き継ぐことができることを確認できた。

2-1-3 グラインドラップ定圧研磨装置の試作開発

超仕上げ工程は、続くポリッシュ工程やCMP（ケミカルメカニカルポリッシュ）工程の加工レートが非常に遅いため、ウエハ表面のキズやダメージを極力少なく加工することが求められるため、研削軸を定圧でウエハに押し当てる機構をもつ装置を使用した。

超仕上げ工程の定圧研削を行なった装置が、図4の装置である。



図4 グラインドラップ定圧研磨装置

操作ソフトの改良を行い、これまで我々が開発してきた加工プロセスの流れを、加工レシピの設定により、自動での実施が可能となった。

図5に、定圧研削の操作画面とレシピ画面を示す。



(a) 操作画面



(b) レシピ画面

図5 定圧研削の操作画面とレシピ画面

超仕上げ工程の加工時は、タッチパネル上での加工開始の指示により、指定したウエハの上的位置まで速やかに砥石を移動させ、その後ウエハとの接触までの距離を、指定した速度でゆっくりとウエハにダメージがないように砥石が移動する。研削が始まり、加工時間またはウエハ厚さ測定機構での研削量のどちらかが完了した時に、スパークアウトの動作に移り、砥石がウエハから離れて、研削が終了する。

2-2 新研磨技術グラインドラップの砥石・スラリー開発

2-2-1 砥石性能検査研磨装置と砥石製造装置の開発試作

SiC ウエハ研磨超仕上げ工程の砥石を開発していくための実験を、通常のウエハ研磨を行う研磨装置を使用して行なうと、砥石を直径 450mm の台金に多数設置して、実験を行なうことになり、大量の砥石や大型装置を動作させるための環境整備の費用、またそれらを準備するために多くの時間が費やされてしまう。効率的に砥石開発を行っていくために、小型の研磨装置を設計し、本事業の中で砥石性能検査研磨装置として開発試作した。図6が砥石性能検査研磨装置の写真である。



図6 砥石性能検査研磨装置の写真

また、超仕上げ工程砥石の品質向上と生産技術向上のために、図7の砥石製造装置の開発試作を行った。砥石製造装置は、砥石材料である固定砥粒やボンド材を加熱・混練・押出する加熱混練押出装置部と、使用する砥石形状に砥石材料を成形する成形装置部からなる。

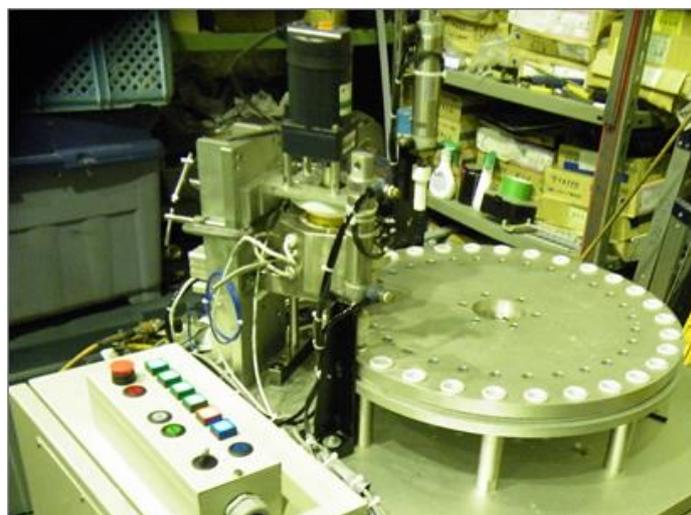


図7 砥石製造装置の写真

2-2-2 超仕上げ工程砥石により研磨した SiC ウエハの評価

これまでに我々は、SiC ウエハと同様の硬脆性材料であるサファイアウエハを、グラインドドラップ技術で Ra=7nm の面粗度まで高精度に高速研磨できる目処をつけ、本事業を開始した。一般研磨工程でラップ工程の次の工程にあたる CMP（ケミカルメカニカルポリッシュ）加工が、SiC ウエハでは、サファイアウエハよりも極めて遅いことが課題になっている。そこで、CMP 前にできるだけ面粗さを上げておくことが求められ、Ra=1nm 以下の面粗さの実現を、ユーザーは強く求めている。そこで、我々は CMP の前の工程に当たる超仕上げ工程の開発に取り組んだ。

超仕上げ工程の砥石には、固定砥粒に 3 μ m 多結晶ダイヤモンドパウダーを用いたものを使用した。研削中の砥石の目詰まりを防止する目的で、この砥石にはくみ粉を含有させた。

Zygo NewView での面粗さ測定では、700 μ m \times 525 μ m の領域で平均面粗さ Ra=0.79nm、最大段差 PV=12.74nm と、良好な研削面が得られた。この面粗さの結果は、我々が目標としている Ra<1nm、最大段差が Ra の 20 倍以内の範囲に収まる評価であった。

また、図8の 141 μ m \times 105 μ m の領域での面粗さ測定では、平均面粗さ Ra=0.56nm、最大段差 PV=7.94nm の研削面も確認された。

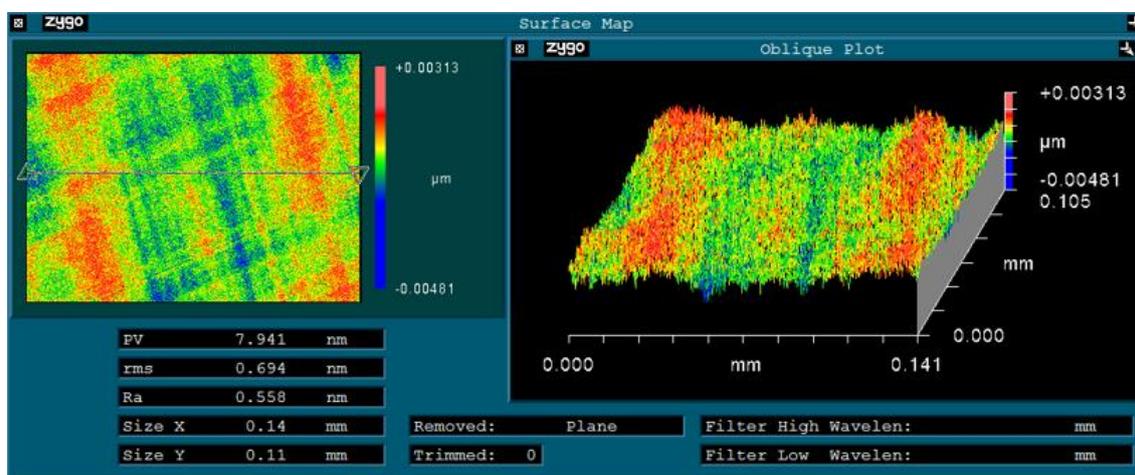


図8 3 μ m 砥石定圧研削した SiC ウエハの 141 μ m \times 105 μ m 領域の面粗さ測定結果
加工レートは、現状 0.1~0.2 μ m/min.に留まっているが、添加剤や製造プロセスの新たな発見により、まだ砥石性能の向上がステップ的に起こる期待が十分にある。引き続き、加工レート向上の課題に、取り組んでいく予定である。

さらに、加工ダメージの評価を行うために、断面 TEM 観察を行なった。断面 TEM 観察では、まず研磨した SiC ウエハの表面を FIB（Focused Ion Beam）により加工し、観察

する断面形状を作製する。断面像を観察する前に、 g ベクトル= (11-20) の回折像を観察して、観察する方位の精密な調整を行なった。観察された断面イメージが図9である。

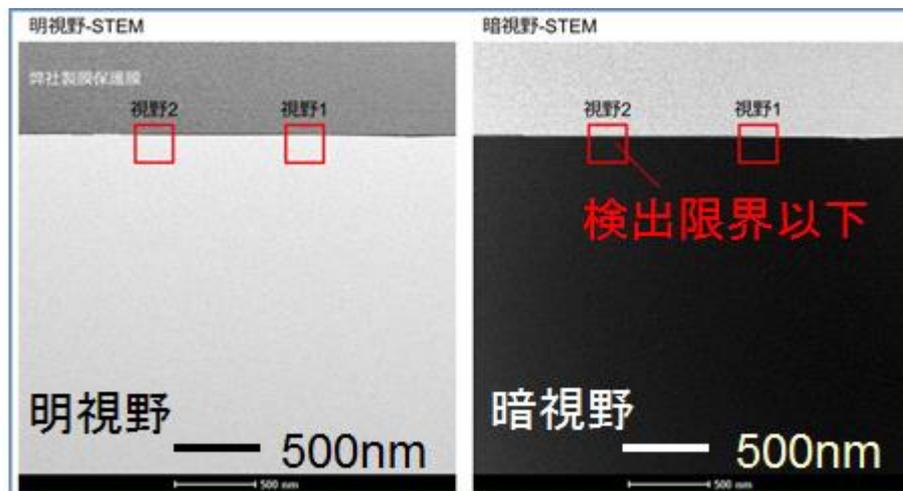


図9 超仕上げ工程後のウエハ表面の加工ダメージ層観察

加工ダメージを見逃さないように、観察は明視野と暗視野の両方で行なった。観察した領域では、ウエハ表面に加工ダメージ層は観察されず、検出限界以下の加工ダメージ層の厚さで、我々の超仕上げ加工が低ダメージで行なえていることが分かった。

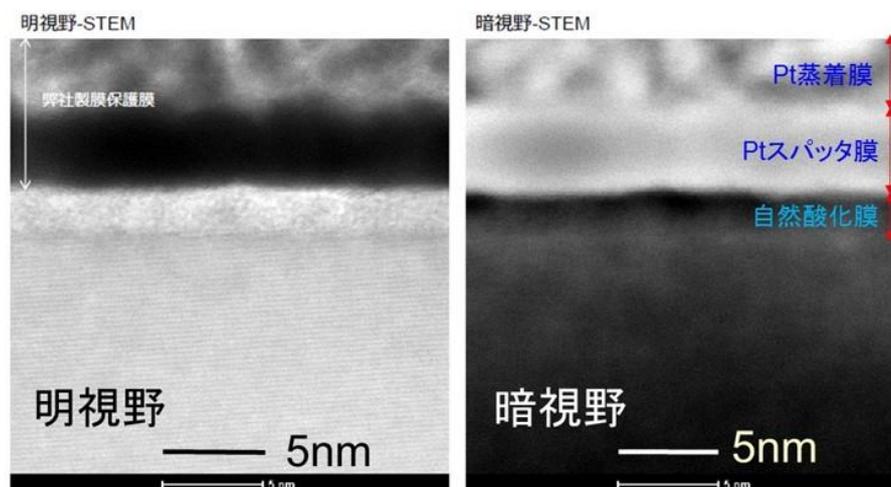


図10 超仕上げ工程後のウエハ表面の加工ダメージ層観察（拡大）

図10の拡大図の明視野像では、ウエハ表面まで結晶格子の規則的な縞模様が観測できるほど、加工ダメージが少なく研磨できている様子が見られる。

他社が加工して観察した断面 TEM 像を見てみると、 $Ra=1nm$ の平均面粗さがでていいるウエハで、平均 180nm、局所的に 300nm の加工ダメージ層が観測されており、我々の超仕上げ加工が低ダメージであることは、大きな特長であると言える。

2-2-3 グラインドラップによる SiC ウエハの研磨コスト

開発した研磨工程で、SiC ウエハの研磨コストの試算を行った。研磨工程は、粗仕上げ、仕上げ、超仕上げの3工程で、その後に CMP を行う工程とした。

研磨コストは、消耗品費、装置費、人件費の3つに分けて試算した。

消耗品費は、各工程の取りしろ（削り量）から、その工程の砥石磨耗量が決まり、砥石価格と砥石磨耗量からコストが出る。

装置費は、装置価格とウエハ生産枚数から、一枚あたりのコストが出る。このとき、1日あたりの生産枚数は100枚として計算した。

人件費は、各工程に1人と検査、保全、管理の3人を加え7人でウエハ研磨にあたるとしてコストの試算を行なった。

コスト試算の結果を図11に示す。

合計額は、3,153円+CMPコストと電気代、水道代となり、目標のSiCウエハ1枚あたりの研磨コスト5,000円の達成に目処が付いた。

消耗品費	粗仕上げ	仕上げ	超仕上げ	CMP
取しろ	100×2 μm	10×2 μm	1.5×2 μm	
砥石磨耗率	10%	20%	30%	
研削枚数	500枚	2000枚	11111枚	
砥石価格	50万円	50万円	25万円	
砥石コスト/枚	1,000円	250円	23円	A
合計	1,273+A 円/枚			※砥石高さ10mm
装置費	粗仕上げ	仕上げ	超仕上げ	CMP
装置価格	3000万円	3000万円	3000万円	3000万円
ウエハ生産数/年	3万枚			※1日100枚生産(10枚/1時間)
装置耐用年数	4年	4年	4年	4年
装置コスト/枚	250円	250円	250円	250円
合計	1,000 円/枚			
人件費	粗仕上げ	仕上げ	超仕上げ	CMP
担当人数	1	1	1	1+3(検査、保全、管理)
人件費/年	480万円	480万円	480万円	480万円
人件費コスト/枚	160円	160円	160円	160+240円
合計	880 円/枚			

総合計：(3,153+A)円+電気代+水道代

図11 グラインドラップによる SiC ウエハの研磨コスト試算

2-3 新研磨技術グラインドラップを導入した SiC ウエハ生産技術の確立

2-3-1 砥石の弾性評価

ウエハの鏡面研磨においては、研磨時に作用する砥石表面における砥粒切れ刃の加工抵抗に対する挙動が研磨結果に大きく影響を及ぼす。そこで、ダイナミック超微小硬度計（株島津製作所 DUH-211S）を用いて、砥石表面の砥粒の弾性について実験的に検討した。

図12に評価に使用した超微小硬度計の装置全体図を示す。実験では、砥石表面に微小圧子による負荷を与え、圧子の押し込み深さの変化過程から砥石材料の弾性的挙動の把握を試みた。図13に図12の赤丸で示した測定サンプルの取付け部分の拡大図を示す。本装置では、倍率50倍の対物レンズを用いて、砥石表面におけるダイヤモンド砥粒を目掛けて圧子の押し込み試験を実施した。主な圧子押し込み試験の条件は、表3に示すとおりである。

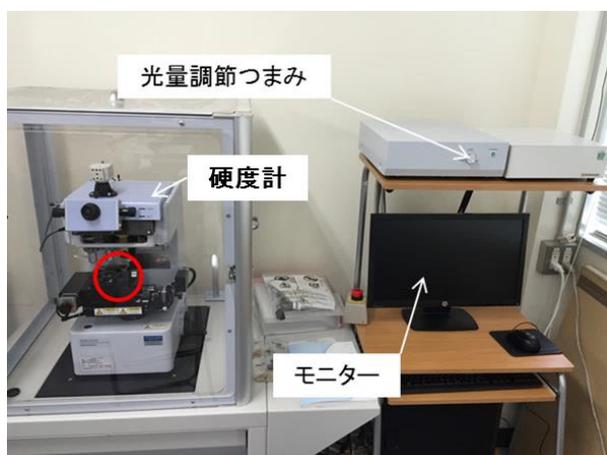


図12 硬度計装置図



図13 サンプル取り付け部

装置	島津製作所 ダイナミック超微小硬度計 DUH-211
試験モード	負荷-除去試験
試験力	50(mN)
最少試験力	0.20(mN)
負荷速度	2.0(6.6620[mN/sec])
負荷保持時間	600(sec)
除荷保持時間	0(sec)
実施回数	100(回)
対物レンズ	50倍
圧子ポアソン比	0.07
評価砥石サンプル	①単結晶 1 μ m 砥粒 ②単結晶 4~8 μ m 砥粒 ③多結晶 1 μ m 砥粒 ④多結晶 9 μ m 砥粒

表3 主な圧子押し込み試験条件

図14に極小圧子押し込み試験の結果による砥石サンプルの種類とそれらに対する押し込み深さ(以下 d_v)の関係を示す。なお、この d_v の値は、測定箇所の平均値を示している。図14から単結晶 $1\mu\text{m}$ 砥粒の d_v 以外は値がほとんど同じであることがわかるが、単結晶 $1\mu\text{m}$ と他の砥石との差も $0.1\mu\text{m}$ 以下であることから、押し込み深さは砥粒径にほとんど依存しないと考えられる。つまり、砥石の硬度は砥粒径によらずほぼ一定と考えられる。

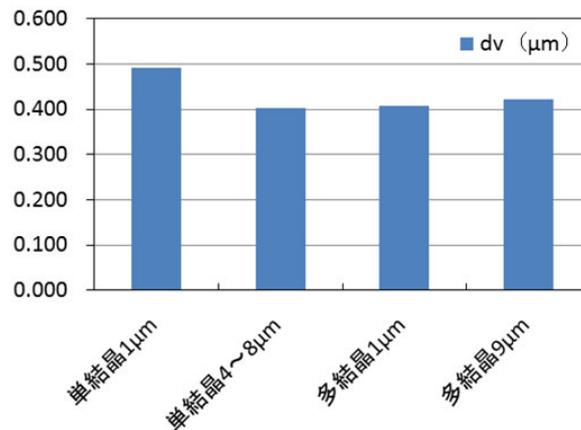


図14 砥石サンプルの圧子押し込み深さの変化

2-3-2 砥石の粘弾性評価

本研究では、より高精度、高能率な加工を行うために、加工に影響を及ぼすさまざまな因子の中から、砥石の粘弾性に注目した。図15に示すように、研磨砥石の性能は、砥石切れ刃の材料特性とそれを支持するボンド剤の材料特性に大きく支配される。既存砥石として多用されているビトリファイドボンドやレジノイドボンドは、砥粒切れ刃の支持剛性によって評価されるのが通説であり、個々の砥粒がボンドのパネで支持される弾性モデルとして取り扱われる。したがって、ビトリファイド砥石に比べて、レジノイド砥石が研削面粗さの低減に有利なのは、レジノイドボンド砥石切れ刃支持剛性がビトリファイドボンドに比べて小さいことに起因すると結論付けられている。しかし、本研究では、単結晶 SiC ウエハの研磨加工において、既存のボンド剤の砥石では限界にあると考え、新たな高分子をボンド剤とする砥石を開発し、従来のウエハ加工プロセスのラッピングを上回る加工効率と加工精度を目指した。

本研究では、対象とする砥石の性能をこれまでに例のない粘弾性の観点から実験的に検討した。粘弾性評価を行うにあたって、三点曲げ試験装置 DMS6100 及び、ねじり試験装置シオメータ AR2000 を使用した。

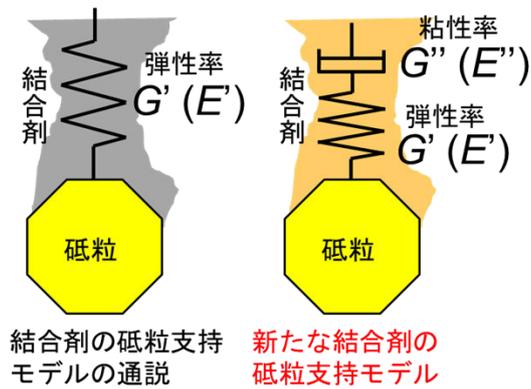


図15 結合剤の砥粒支持モデル

図16に、砥石サンプルのねじり試験による粘弾性評価に用いたレオメータ AR2000（TAインスツルメント製、岡山県工業技術センター所有）を示す。なお、図17に図16で示した赤い丸で示す砥石サンプル取付け部分の拡大図を示す。試験は、図17に示す固定チャック間に砥石サンプルをクランプし、チャンバ内の温度環境を低温から徐々に昇温しながら周期的に微細な振り振動を与え、その際のねじり角と荷重の動的変化を検出することによって、砥石の粘弾性を評価する。チャック間距離は 20mm に設定した。主なねじり試験条件は表4に示すとおりである。



図16 ねじり試験装置

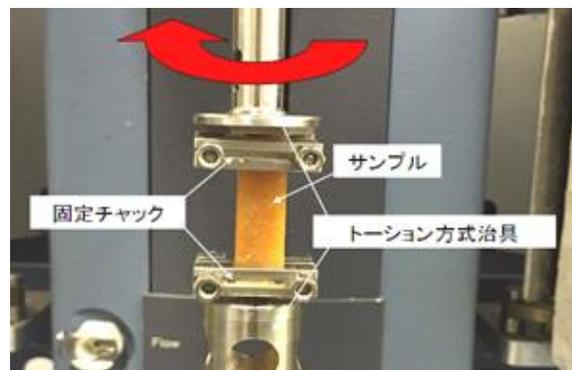


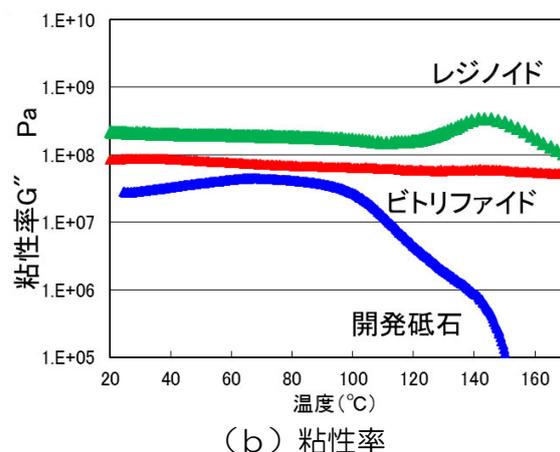
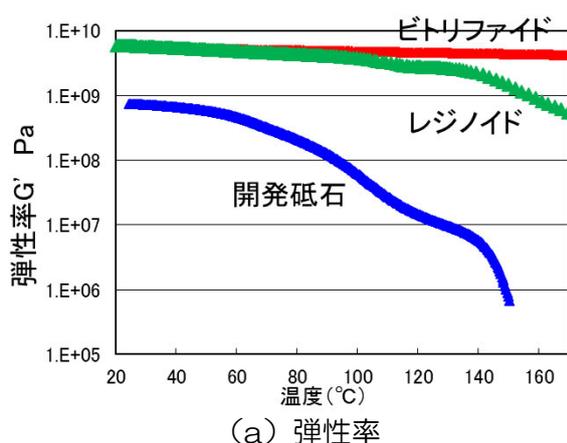
図17 ねじり試験装置サンプル取り付け部

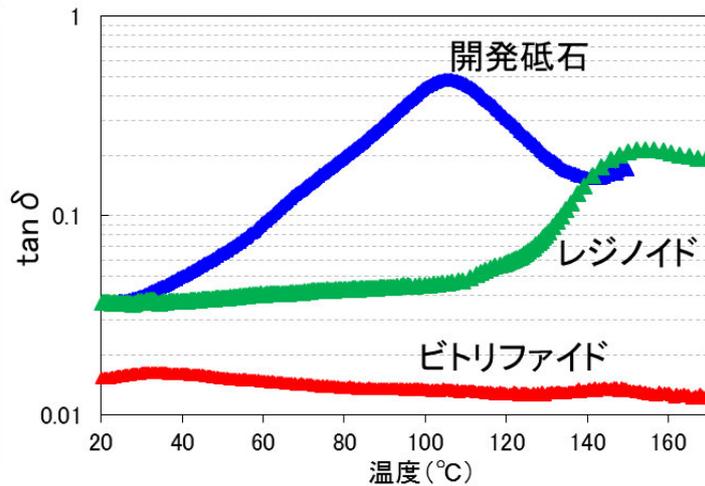
装置	レオメータ AR2000
軸方向試験力	0.3N
周波数	1Hz
ひずみ	0.03%
測定温度	20°C~170°C
昇温速度	3°C/min
サンプルサイズ	3 x10 x 30~35mm
評価砥石サンプル	①ダイヤモンド砥粒径 0.25μm ②ダイヤモンド砥粒径 3μm ③ダイヤモンド砥粒径 9μm

	④樹脂：PP=10：1 ⑤PPのみ
--	----------------------

表4 ねじり試験条件

図18に既存のビトリファイド(SD4000JV)、レジノイド(SD4000HB)と試作ダイヤモンド砥石のねじり試験による粘弾性評価結果を示す。いずれの砥石も、含まれるダイヤモンド砥粒の粒径は約 $3\mu\text{m}$ である。図18に示すように、試作ダイヤモンド砥石の弾性率 G' はビトリファイド、レジノイド砥石に比べて、 $1/10$ 以下であり、温度が 40°C 以上で急激に小さくなり約 150°C で融解状態となり、研削抵抗の作用による砥粒の変位は、既存のボンド剤を用いた砥石よりも更に大きいものと考えられる。次に、粘性率 G'' は、レジノイド、ビトリファイド、試作ダイヤモンド砥石の順に大きい。粘性率 G'' と弾性率 G' の比である $\tan\delta$ は損失正接（振動吸収係数）であり、外力による衝撃が加わった場合のエネルギー損失の割合を示すものである。約 120°C 以上では $\tan\delta$ が急激に大きくなり、更に衝撃エネルギーの吸収が進むことで、ビトリファイド砥石に比べて研削面の粗さ低減に効果のあることが推測できる。さらに、試作ダイヤモンド砥石では、室温から温度が高くなるに従って $\tan\delta$ は徐々に大きくなり、およそ 100°C で約 0.5 となり最大になる。その $\tan\delta$ の値は、レジノイド砥石の最大値の約 2.5 倍、ビトリファイド砥石に比べると 30 倍余りに及ぶ。このことから、試作ダイヤモンド砥石は、SiCウエハの研磨において、砥粒切れ刃がウエハから受ける加工抵抗の衝撃成分をやわらげ、他の既存砥石に比べて仕上げ面粗さの低減に有利であることが推測される。





(c) 損失正接 (振動吸収係数)

図 32 砥石のボンド剤による粘弾性への影響

2-3-3 研削時のクーラント温度による仕上げ面粗さの変化

図 33 の青線のように砥石の粘弾性 $\tan \delta$ の温度変化に対して、緑色実線のように、研磨した SiC ウエハの平均面粗さ R_a が加工液温度で変化する実験結果を得た。そこで研磨時の砥石温度を測定した場合には、緑色点線のようなカーブが描かれると想定をし、我々の開発砥石が良好な面粗さを実現している理由説明を進めた。

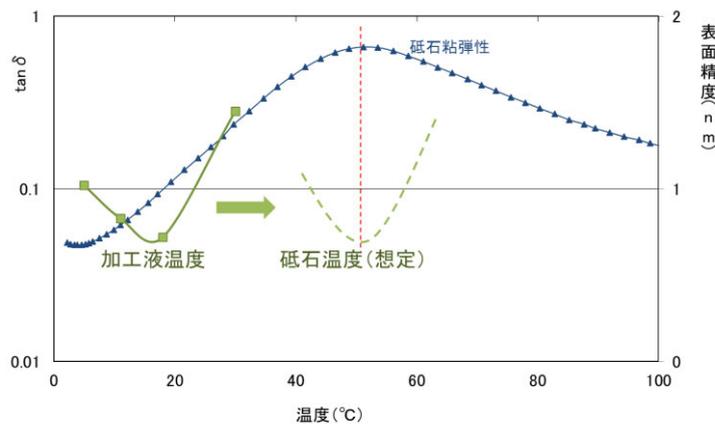


図 33 研磨後ウエハの表面精度と砥石粘弾性の温度変化を推定

クーラント温度が 30°C の時、表面粗 R_a さが約 1.5 nm であるが、その他の水温条件では表面粗さ R_a が約 1.0 nm 以下であり、クーラント温度が 18°C の場合に表面粗さが最小となる。これまで、弾性率の高い普通砥石による研削理論では、弾性率が低いほど研削抵抗の作用により砥粒切れ刃の先端高さが揃いやすく、研削面粗さの低減に有利とされてきた。しかし、このことを前提とすると、図 33 の表面粗さの変化を説明することが不可能である。したがって、砥石の弾性に対する粘性が大きくなると作用する研削抵抗によるエネルギーの緩

和の生じることが考えられ、研削するときウエハへのダメージを抑制する作用が増すものと考えられるため、水温の変化より砥石表面の $\tan \delta$ が変化することによって加工されたウエハの表面粗さへ影響を与えるものと考えた。

2-3-4 SiC ウエハ研磨プロセスの検討

SiC ウエハの研磨プロセスは、SiC インゴットがワイヤーソーでスライスされた、荒れた面を平面出しする工程から始まる。この平面出しの粗仕上げ工程と次の仕上げ工程は、削り代が大きいので、加工レートが重要視される。そこで、この2つの工程には定速送り型装置での研削が適していると考え、定速研削での使用に最適な砥石の検討を行なった。

スライス後の荒れた面であっても、#1500の砥石で、 $30 \mu\text{m}/\text{min}$ 程度のレートで加工でき、平均面粗さが $R_a=30\text{nm}$ 程度まで良好に仕上がることが分かった。

#1500 砥石の研削で良好な面粗さに仕上がるため、次の工程では当初予定していた#3000 よりも高番手の砥石が使用可能となり、#6000 の砥石を選定し、加工レートが $3 \mu\text{m}/\text{min}$ あることを確認した。

超仕上げ工程では、次の CMP 工程の加工量を最小限に抑えることが求められる。つまり、平均面粗さを $R_a=1\text{nm}$ 以下にしながら、加工ダメージ層をできるだけ少なく仕上げることが求められる。そこで、我々はこの超仕上げ工程の研削装置に、定圧送り装置を採用し、砥石には応力緩和の大きい特性をもつ樹脂をボンド材とする砥石を開発し、研磨実験で性能確認を行った。まだ加工能力について把握しきれていない部分があり、加工するウエハの平面度によって、加工レートが遅くなる場合もある。

一方、面粗さについては、超仕上げ工程で平均面粗さ $R_a=0.7\text{nm}$ 以下で、最大段差 PV も R_a の 20 倍に収まるレベルまでウエハ表面を仕上げることが可能となった。

そこで図 34 のように、コロイダルシリカの CMP 工程前までを、3つの工程で各工程 8 分で加工するプロセスを、SiC ウエハの研磨プロセスとして提案する。

このプロセスは、現状の我々が技術検討した知見を元にしたものであり、我々が実施していない CMP 工程と開発した多結晶ダイヤモンド $3 \mu\text{m}$ 砥石の定圧研削による超仕上げ工程との間の受け渡しの条件を最適化することで、削り代の分担量を最短で削ることができるようになり、より早い加工プロセスにできると考えている。



工程	粗仕上げ	仕上げ	超仕上げ	CMP
Ra	<30nm	<3 nm	<0.7nm	<0.4nm
削り代	100μm	10μm	2μm	3 μm

図34 グラインドラップ技術を採用した SiC ウェハ研磨プロセス

2-4 新研磨技術グラインドラップ装置・砥石の事業化戦略

これまで SiC ウエハ研磨の川下ニーズを汲み取りながら、開発を進めてきた。これからも、川下企業の方に評価や試用をお願いし、使用実績を積んで事業化していく計画である。

また、本事業の中で得られた成果を学会発表していき、研究開発した砥石や定圧送り装置の有用性について、川下企業の方々にご理解頂く活動も行なっていく予定である。

2016年11月16日に、金沢工業大学 KIT 虎ノ門大学院で開催された公益社団法人砥粒加工学会 研磨の基礎科学とイノベーション化専門委員会（KENMA 研究会）で「研削・ラップ融合技術グラインドラップの開発」という題目で、本事業の成果を発表し、たくさんの方に興味を持って頂けた。

また、2017年3月13日～15日に開催の公益社団法人精密工学会の2017年度春季大会でも、成果発表を行った。

図35に研究レベルとウエハメーカーでの SiC ウエハ加工プロセスの例を示す。ラッププロセスでは、スライス後、ラップ工程3工程を3日間かけて実施し、2日間かけてコロイダルシリカによる CMP を実施している。このように時間をかけながら多数枚同時に加工するプロセスをあるウエハメーカーは採用しているそうである。研究レベルで検討されている研削プロセスを見ると、#8000 で研削したあと、高速 CMP が1工程入り、コロイダルシリカによる CMP でウエハ加工の仕上げを行なっている。高速 CMP の目的は、#8000 の研削後に残る加工ダメージ層を取り除くことである。ただし、高速 CMP では面粗さがウエハ製品レベルにまで到達しないため、最後にコロイダルシリカによる CMP が必要になる。高速 CMP では強酸の過マンガン酸カリウムスラリーを使用するので、ウエハメーカーによっては、設備の強酸へ対応や廃液処理にコストがかかるため、高速 CMP の工程を敬遠する所もある。

我々が開発した砥石と定圧研削による超仕上げ工程は、平均面粗さで Ra=0.7nm 程度まで、低ダメージで加工することができる。また、研削液は水であり、強酸を使用するプロセスではないので、高速 CMP に代替するプロセスとして、川下企業へ提案できると考えている。

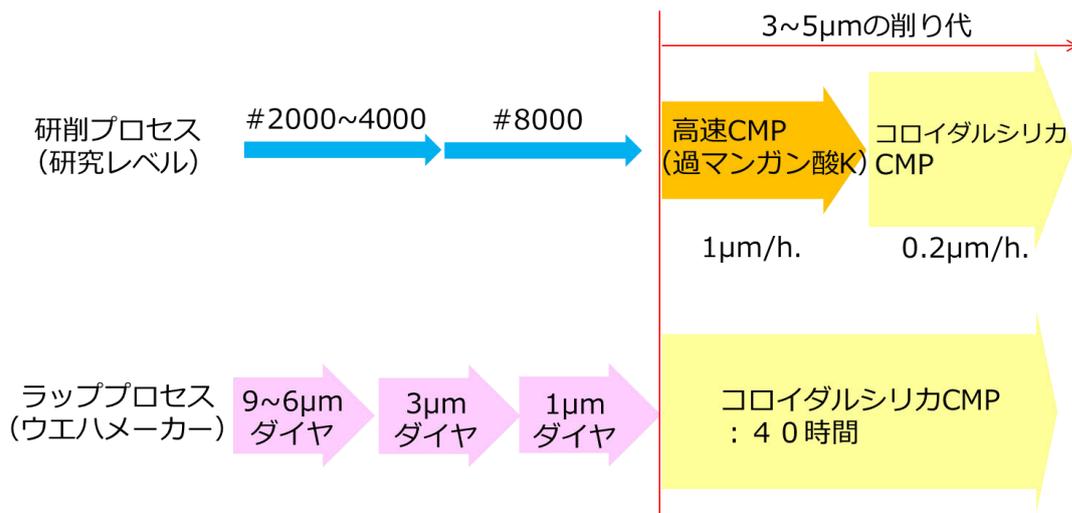


図35 研究レベルとウエハメーカーでの SiC ウエハ加工プロセス

第3章 全体総括

昨今、エネルギーの安定確保と気候変動問題への対応が、我々の暮らす社会にとって、喫緊の課題となっている。大電力を低損失で制御できる SiC パワーデバイスの普及が、電力の高効率化・省エネ型社会の構築・展開のために、急がれるところであるが、なかなか進んでいない。その理由の1つとして、材料として使われる SiC ウエハの価格が下がらないことが挙げられている。

この課題解決は、我々の川下企業のニーズであることから、我々は本事業で SiC ウエハの生産性向上とウエハコストの削減に取り組んだ。

我々が提案した研磨技術グラインドラップは、従来ラップ技術と従来研削技術の融合研磨技術で、本事業において、想定どおりに低ダメージかつ、良好な面粗さで SiC ウエハを加工できる技術であることを証明した。グラインドラップは、砥石を使用した研削でありながら、断面 TEM 観察で図 9 のように加工ダメージ層を検出限界以下に低減でき、図 8 のように、平均面粗さ $Ra=0.649nm$ 、最大段差 $PV=6.514nm$ に仕上げる性能を持つ。

この性能を実現できたのは、装置の研削軸を定圧送り型にしたことと、樹脂を材料とした砥石の性能に因るところが大きいと考える。定圧研削は、ウエハが削れた分だけ砥石がフィードされていくので、無理にウエハを押し込まない。

砥石の粘弾性がウエハの面精度を上げるという経験則を、我々は持っていたので、通常は砥石について、砥粒を弾性体の結合剤が支持するモデルで考えられるところを、我々の砥石では、砥粒を粘性と弾性を併せ持つ材料が支持しているモデルで考えることが適当であると提案し、砥石の評価と改良を進めるための知見蓄積を行なった。

砥石の粘弾性評価の結果、図 32 (c) のように、我々の開発砥石は、他メーカーが製造するピトリファイド砥石やレジン砥石に比べて、応力緩和 $\tan \delta$ が大きいことが分かり、他の砥石よりも加工時の衝撃を砥石が吸収する能力が高いことが分かった。

また、図 33 の青線のように砥石の粘弾性 $\tan \delta$ の温度変化に対して、緑色実線のように、研磨した SiC ウエハの平均面粗さ Ra が加工液温度で変化する実験結果を得た。このことから研磨時の砥石温度を測定した場合には、緑色点線のようなカーブが描かれると想定をし、我々の開発砥石が良好な面粗さを実現している理由解明を進めた。

砥石開発では、面粗さの向上と加工レートの向上という一見相反する性能を同時に実現することが求められた。それぞれの性能に対して効果のある添加剤候補の列挙はできるが、実際には複数種の添加剤が混ざりにくく砥石に製作することが困難であった。そのような中、

添加剤を混ぜりやすくする材料の発見があった。この発見のおかげで、面粗さの向上と加工レートの向上の両立ができるようになり、砥石の性能向上の可能性を大きく広げ、その後、砥石のカケ・ワレ対策に酢酸セルロールなどの材料も使用できるようになった。

これら開発の成果として、我々は「2-3-4 SiC ウエハ研磨プロセスの検討」で示した図34の工程を、コスト 4,000 円/枚の SiC ウエハ加工プロセスとして提案する。

さらに、我々が開発した超仕上げ工程が、研削液が水であり、 $Ra=0.7\text{nm}$ 以下を低ダメージで実現できることから、SiC ウエハの最終工程であるコロイダルシリカによる CMP の前に採用されている強酸の過マンガン酸カリウムによる高速 CMP に代替できるプロセスであると考え、これら本事業での成果を川下企業に向けて提案し、SiC ウエハの生産性向上とコスト低減に寄与していきたいと考えている。