

平成23年度第3次補正予算戦略的基盤技術高度化支援事業

「難加工パワーデバイス用SiCウエハの平坦化及び

低コスト加工プロセス開発」

研究開発成果等報告書

平成24年12月

委託者 近畿経済産業局

委託先 一般財団法人 ファインセラミックスセンター

<b>1. 研究開発の概要</b> .....	<b>1</b>
1.1. 研究開発の背景・研究目的および目標 .....	1
1.1.1. 研究開発の背景・目的 .....	1
1.1.2. 研究目標 .....	1
1.1.3. 実施内容 .....	2
1.2. 研究体制 .....	6
1.2.1. 研究組織 .....	6
1.2.2. 管理体制 .....	6
1.2.3. 研究員氏名 .....	7
1.3. 成果概要 .....	8
1.4. 当該研究開発の連絡窓口 .....	9
<b>2. 機械研磨技術の開発</b> .....	<b>10</b>
2.1. 平坦化技術の開発.....	10
2.1.1. 機械研磨技術の開発.....	10
2.1.2. 機械研磨品質の評価.....	12
2.1.3. 機械研磨安定性の向上 .....	16
2.1.4. 技術の適用範囲の確認 .....	17
2.2. 切断技術の開発 .....	17
2.2.1. 切断技術の選定.....	17
2.2.2. 研削技術の選定と高度化 .....	17
2.2.3. 切断・研削による転位・ダメージ発生の評価 .....	18
<b>3. プロジェクトの管理・運営</b> .....	<b>21</b>
3.1. 進捗管理・物品管理 .....	21
3.2. 研究開発委員会の開催 .....	21
<b>4. 全体総括</b> .....	<b>22</b>
4.1. 複数年の研究開発成果 .....	22
4.1.1. 機械研磨技術の開発.....	22
4.1.1.1. 平坦化技術の開発.....	22
4.1.1.2. 機械研磨品質の評価 .....	22
4.1.1.3. 機械研磨の安定性の向上 .....	23
4.1.1.4. 技術の適用範囲の確認.....	23
4.1.2. 切断技術の開発.....	23

4.1.2.1. 切断技術の選定 .....	23
4.1.2.2. 研削技術の選定と高度化 .....	23
4.1.2.3. 切断・研削による転位・ダメージ発生の評価 .....	24
4.2. 研究開発後の課題・事業化展開 .....	24
<b>5. 外部発表等 .....</b>	<b>26</b>

## 1. 研究開発の概要

### 1.1. 研究開発の背景・研究目的および目標

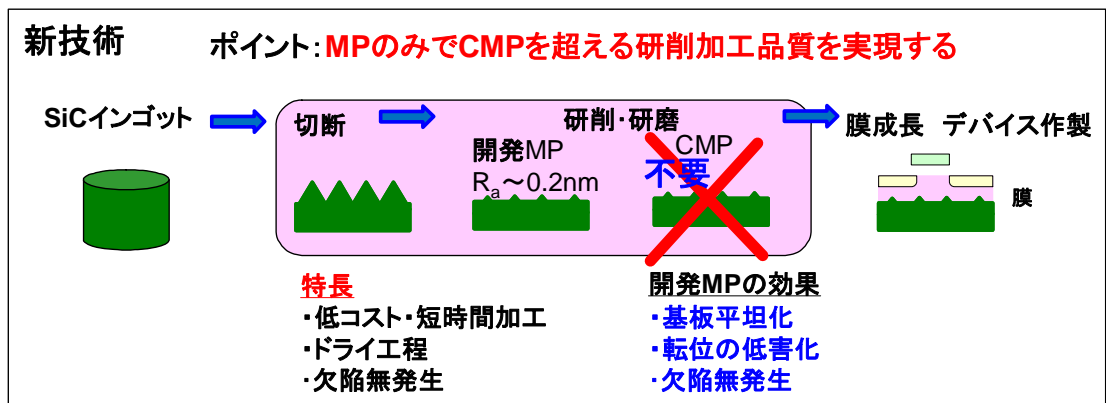
#### 1.1.1. 研究開発の背景・目的

環境負荷の少ないハイブリッドおよび電気自動車の普及とともに SiC パワーデバイスの実用化が希求されている。これは電力変換時の損失が少なく、また高温安定動作・高耐圧・高速動作といった SiC 特有の物性からシステムの小型化・軽量化・低消費電力化が実現されるためである。しかし、高い SiC ウエハ価格と歩留まり低下の起因となる欠陥の含有が SiC パワーデバイスの本格搭載を阻害している。高硬度材料である SiC ウエハへの加工コストはウエハ価格の数十%を占めており、また加工における欠陥発生は制御されていない。本開発では低コストかつ欠陥発生を抑制した独自のウエハの切削加工技術を開発し、SiC パワーデバイス（技術戦略マップ エネルギー分野①50 1502A）のハイブリッドおよび電気自動車（技術戦略マップ エネルギー分野①12 2104S,2121S,2124S）搭載を加速することを目的とする。

#### 1.1.2. 研究目標

ハイブリッドおよび電気自動車の市場拡大とともに SiC パワーデバイスのニーズが高まっているが、ウエハの高価格と欠陥密度が障壁である。本提案ではコストを押し上げる化学機械研磨なしで、加工に伴う欠陥発生を抑えた研削加工技術の開発を目標とする。SiC ウエハ加工の切断・機械研磨の各工程における欠陥発生の閾値を見出し、欠陥発生を抑制した工程確立と同時に高硬度 SiC の平坦表面を得る機械研磨法を開発する。

ダイヤモンドの次に硬く脆い SiC は難加工材料であり、SiC インゴットからウエハに加工する工程は Si や GaAs ウエハ加工に比べ複雑かつ格段の困難が伴う。化学機械研磨はウエハ表面粗さが機械研磨(MP)に比べ約 1 桁小さく、デバイス性能を著しく損なう基底面転位という転位を貫通刃状転位という比較的害の少ない転位に変換する効果があるため SiC のウエハ加工において必須工程とされている。しかし本工程はウエハ価格の 1-3 割と高コストかつ加工時間が長い、研磨に使用した廃液による環境負荷が無視できないなど解決すべき課題がある。また、市販ウエハの大部分を占める n 型高濃度ウエハの欠陥分布を簡易に評価する方法がなかったため加工工程中に発生する欠陥の制御はなされていなかった。機械研磨のみで十分な表面平坦性を有し、転位変換効率が高く、転位発生を伴わないウエハ加工法の開発とその品質実証によって、化学機械研磨は不要となり低コスト化と高品質化が実現される。従って、化学機械研磨なしで、表面平坦性および転位の低害化(転位変換)効率が化学機械研磨品と同等以上でかつ切削加工中に欠陥を発生しない切削加工技術を世界に先駆けて開発し、事業化することを目標とする。



加工技術の最終目標値（平成 24 年 12 月末）

- ・  $R_a$  0.2nm 以下
- ・ 転位変換率 90%以上
- ・ ウェハ加工による転位発生 化学機械研磨ウェハの半分以下
- ・ TTV  $2\mu\text{m}$  (2 インチウェハ) 以下
- ・ 加工コスト 40%削減

上記最終目標達成に向けて、表面の平坦性および転位変換に寄与の大きな機械研磨技術の開発（①機械研磨(MP)技術開発）と、欠陥の発生や仕上げ加工時間の短縮に効く切断・切削技術の開発（②切断技術開発）の 2 つのサブテーマについて研究を進める。

### 1.1.3. 実施内容

本年度目標達成のため、以下の研究開発を実施する。

#### ①機械研磨技術の開発(株式会社アクト、一般財団法人ファインセラミックスセンター)

本サブテーマでは  $R_a < 0.2\text{nm}$ 、転位の変換効率 90%以上、機械研磨による転位の発生が従来化学機械研磨の半分以下の機械研磨技術開発を目標とする。研磨技術の開発を(株)アクトが担当し、研磨品質の評価を(財)ファインセラミックスセンターが担当する。機械研磨の品質は砥粒・パッド・荷重・回転速度に依存して決まる。従って各項目について以下の方針で研磨条件の検討を行う。

##### ①-1 平坦化技術の開発

ウェハ表面の平坦化に最も重要なパラメータは砥粒の選定である。特に、砥粒の材質・サイズ（平均粒径と分散）・形状（丸形・角形）について検討を進め、平坦性の確保が容易な砥粒を選択する。市販品で不足な場合は検討結果から適切な砥粒を設計する。並行して機械研磨の最適な荷重・回転速度の検討を行う。特に本項目は欠陥発生に深く寄与するため、①-2 で実施する荷重・回転速度のパラ

メータと欠陥発生の閾値の関係のフィードバックを受けながら欠陥発生の抑制と加工時間の短縮を両立させる条件を見出す。

#### ・アドバイザーの評価

機械研磨で  $Ra < 0.2\text{nm}$  が達成できた時点でアドバイザーにサンプル供給し平坦性や転位変換効果の評価評価を受け機械研磨技術の課題を明確化し解決を図る。

### ①-2 機械研磨品質の評価

系統的に機械研磨時の各パラメータ（荷重・回転速度・砥粒）を変化させた試料を用意し、新たに開発したエッチピット法・電子線誘起電流法・ラマン散乱法・蛍光顕微鏡法などを駆使して転位発生閾値を同定し、①-1における転位の発生しない平坦化技術の開発の指針としてフィードバックする。

また、①-1で開発した平坦化技術の品質を確認するため、平坦化処理したウエハ上に膜を成長し、その膜の平坦性の評価、転位の変換効率を同定し化学機械研磨との品質の差異を明らかにする。

### ①-3 機械研磨の安定性の向上

機械研磨の安定性および加工時間を決めているのはパッド（バフ）の材質・毛足長さ・密度である。まず、市販品ベースで条件を検討して適切なパラメータを抽出後、パッドを設計し実際に加工の安定性および加工時間の短縮に係る効果を確認する。

### ①-4 技術の適用範囲の確認

SiCの市販ウエハにはオフ角・ウエハ供給メーカ・結晶製造方法など仕様にばらつきがある。開発した平坦化技術の適用範囲を明確にしておくことは事業化に向けて重要な課題となる。そこで入手可能なウエハのオフ角、ウエハ供給メーカ毎に本技術を適用し、平坦性が確保できる範囲を確認する。また、実際にエピ膜を成長させて転位の変換およびエピ膜の平坦性を調べ品質の確保できる範囲を同定する。

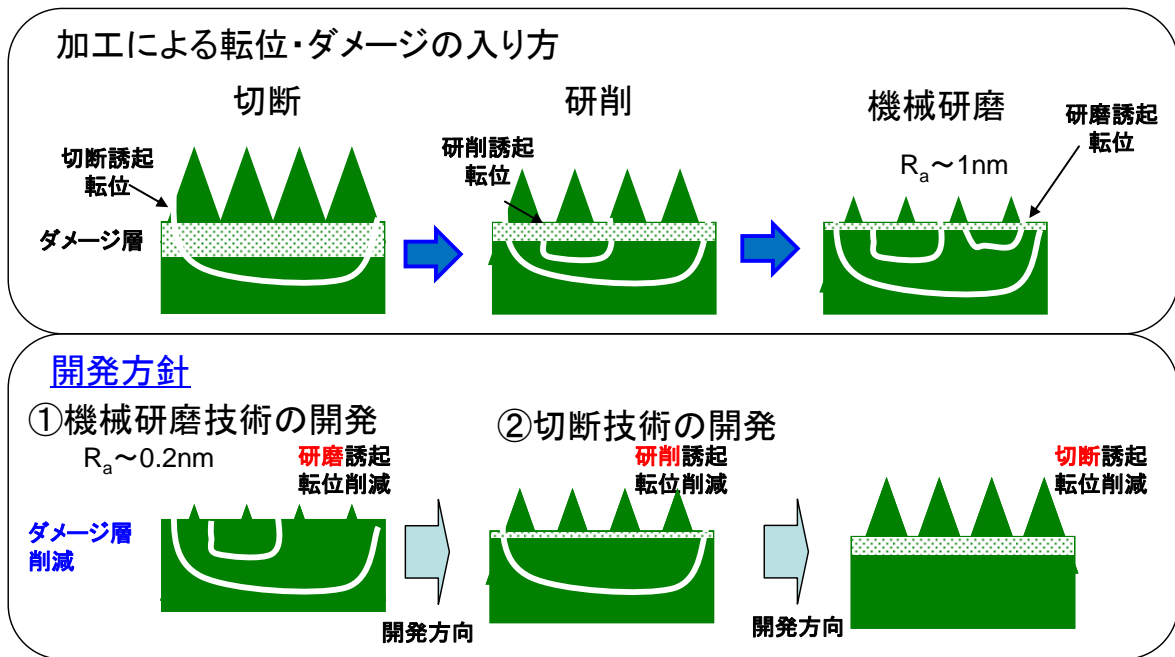
#### ・サンプル出荷による評価

アドバイザー以外の川下企業へもサンプルを供給し評価を受け課題を明確化し解決をはかる。

## ②切断技術の開発（株式会社アクト、一般財団法人ファインセラミックスセンター）

表面平坦化工程の加工時間短縮および転位の発生抑制は、平坦化工程の開発だけでは達成が難しい。これは、SiCの研削工程における平坦化の度合いによって後工程となる平坦化の加工時間が決まること、また研削工程の方が平坦化工程よりも導入されるダメージが大きく発生する転位量が大きいと考えられることによる。また切削時に導入されるウエハのダメージ層厚は歩留まりに寄与する。従っ

て、高品質かつ低コストの機械研磨技術を実現するには切削加工技術の開発も必須となる。



## ②-1 切断技術の選定 (株式会社 アクト)

高硬度材の切断技術として遊離砥粒法と放電加工法を抽出し、加工時間（実工程・後工程）・歩留まりの観点から、切断速度・ダメージ層厚・表面粗さの評価を行い適切な切断技術を選定する。

## ②-2 研削技術の選定と高度化 (株式会社 アクト)

研削技術としてラップ・平研・グライディング等の中から適切なものを机上検討で抽出する。抽出した手法で実際に、研削を実施し1で開発した平坦化手法での平坦化にかかる時間、転位発生、TTV（ウエハ厚みのばらつき）を評価し適切な研削技術を抽出する。その後、抽出した技術の各種パラメータの最適化を行い研削技術の高度化を図る。

## ②-3 切断・研削による転位・ダメージ発生の評価 (一般財団法人ファインセラミックスセンター)

ダメージ層が薄く、転位の発生が少なく、加工時間が短い切断・研削技術の開発が本技術開発の鍵となる。これを実現するためには、切断・研削による転位発生閾値の同定および切断によって発生するダメージ層厚を決めているパラメータを抽出することが必要となる。これにより、転位発生閾値の範囲内でダメージ層が薄く、加工時間の短い条件を選ぶことが可能となり、品質とコストの両立が図られる。実際にはパラメータを系統的に振った切断・研削後のサンプルを用意し転位発生閾値をみいだす。同様に、切断パラメータとダメージ層厚の関係を求め適切な切断パラメータを決定する。

- ・切断技術の検討

SiC の切断技術の候補として遊離砥粒と放電加工の 2 つを比較し、加工時間・転位発生・ダメージ層厚の観点から適切な切断技術を選択する。転位発生およびダメージ層厚の評価はエッチピット法、ラマン散乱、電子線誘起電流法、収束電子線回折等などで行う。

- ・研削技術の検討

切断後、機械研磨に移行できる段階にするにはラップ、研削、グライディング等がある。本工程が転位発生に最も寄与するため、加工条件と転位発生の関係を精密に調べ適切な条件を見出す。

### ③プロジェクトの管理・運営（一般財団法人ファインセラミックスセンター）

#### ③-1 進捗管理・物品管理

各研究において研究開発が計画通りに進められるように進捗状況を把握するとともに、再委託先の連携等の調整を図る。新規機械装置の発注、導入を行うことにより、研究開発が円滑に進むよう調整するとともに、導入機械装置の管理を行う。

#### ③-2 研究開発委員会の開催

研究開発が円滑に進むように研究開発委員会を一般財団法人ファインセラミックスセンターにて開催する。

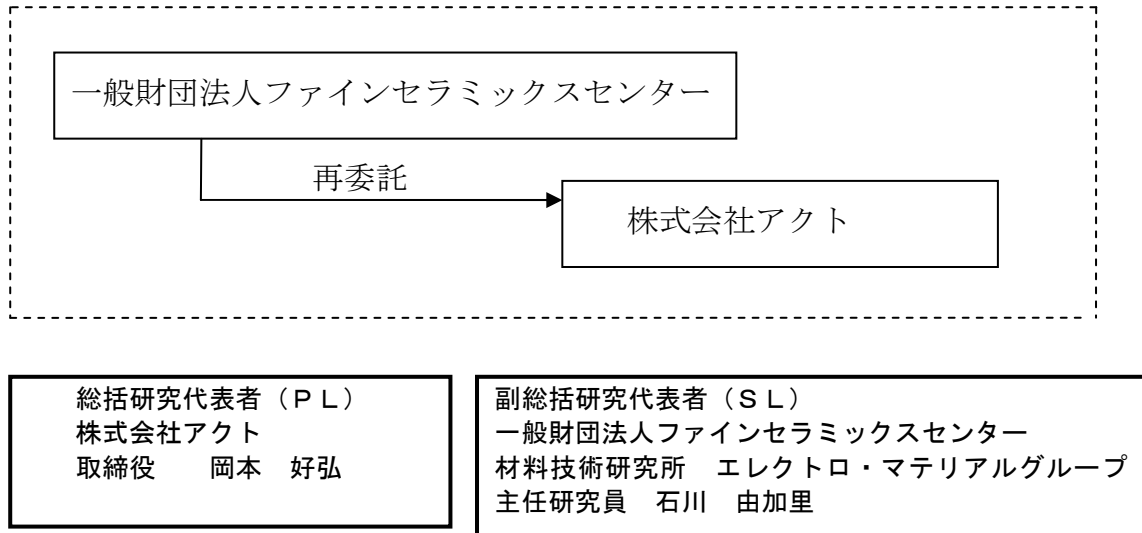
#### ③-3 報告書作成

各機関での成果報告に基づいて、成果報告書のとりまとめを行う。



## 1.2. 研究体制

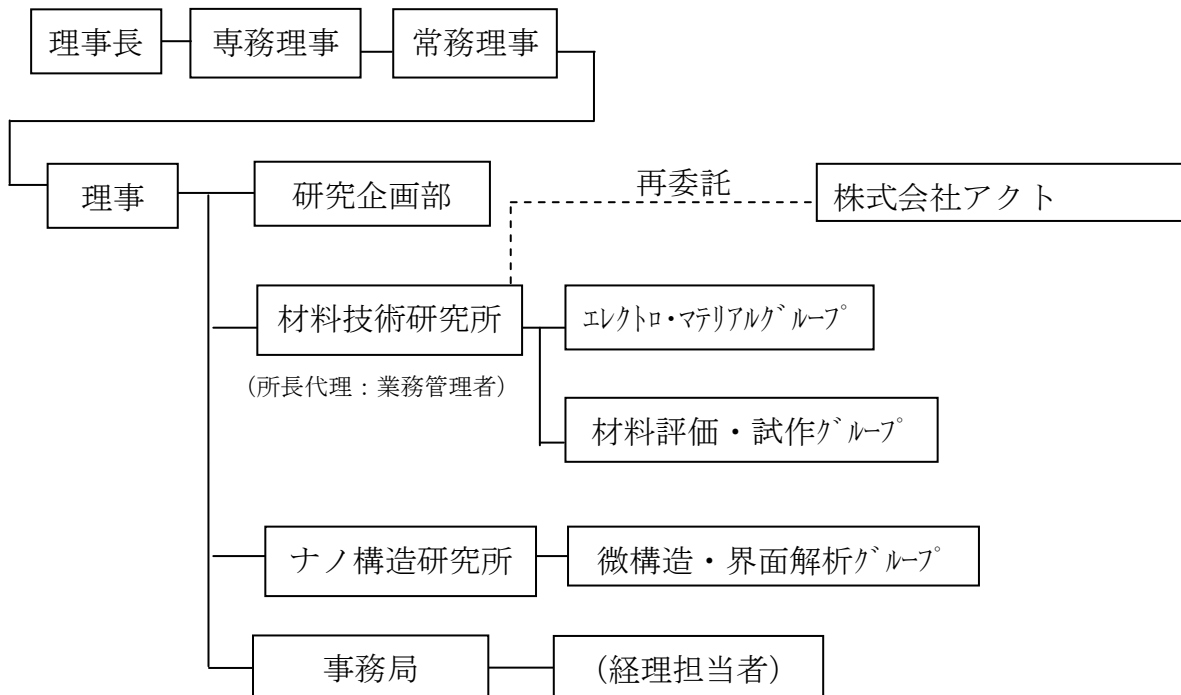
### 1.2.1. 研究組織



### 1.2.2. 管理体制

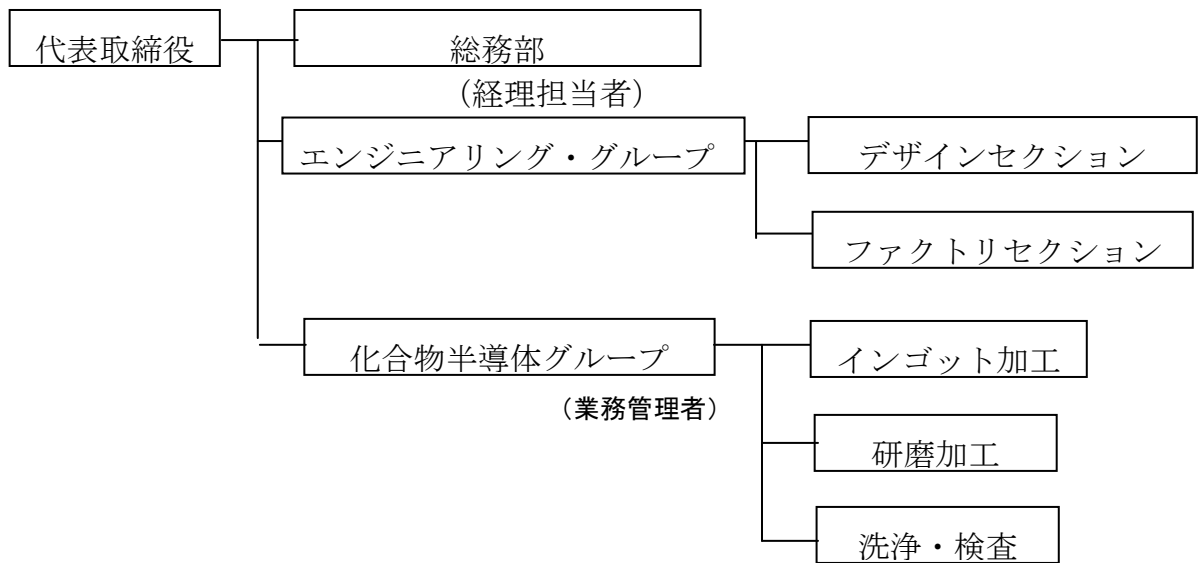
#### ①事業管理機関

[一般財団法人ファインセラミックスセンター]



#### ②(再委託先)

[株式会社アクト]



### 1.2.3. 研究員氏名

【事業管理機関】一般財団法人ファインセラミックスセンター

#### ①管理員

氏名	所属・役職	実施内容(番号)
山本 義明	研究企画部 課長	③-1,2,3
石川 由加里	材料技術研究所 エレクトロ・マテリアルグループ 主任研究員	③-2,3

#### ②研究員

氏名	所属・役職	実施内容(番号)
石川 由加里 (再)	材料技術研究所 エレクトロ・マテリアルグループ 主任研究員	①-2, ②-3
永野 孝幸	材料技術研究所 エレクトロ・マテリアルグループ 上級研究員	①-2, ②-3
姚 永昭	材料技術研究所 エレクトロ・マテリアルグループ 上級研究員補	①-2, ②-3
佐藤 功二	材料技術研究所 エレクトロ・マテリアルグループ 上級技師補	①-2, ②-3
菅原 義弘	ナノ構造研究所 微構造・界面解析グループ 上級研究員	①-2, ②-3
早川 一幸	材料技術研究所 材料評価・試作グループ 技師	①-2, ②-3

【再委託先】

## 株式会社アクト

氏名	所属・役職	実施内容(番号)
岡本 好弘	取締役 化合物半導体グループ	①-1,3,4 ②-1,2
林 紀孝	化合物半導体グループ・インゴット加工	①-1,3, ②-1,2
木村 章人	化合物半導体グループ・研磨	①-1,3,4
井上 弘隆	化合物半導体グループ・研磨	①-1,3, ②-1,2
秋田 大輔	化合物半導体グループ・洗浄検査	①-1,3,4 ②-1,2

### 1.3. 成果概要

機械研磨のみで化学機械研磨並の研磨品質を得ることのできる機械研磨技術の開発を行った。目的を達成する為に機械研磨技術で以下の目標値を立てた。各目標値と達成した値を表にまとめた。Ra 以外は目標値をクリアした。Ra の目標値の妥当性について検討した結果、今回達成した Ra0.37nm でもエピ成長前処理のガスエッチング後の表面形状は化学機械研磨と同等であることがわかったうえ、研究開発委員会におけるアドバイザーから過剰目標との指摘を受けたため、今回の達成値で十分であると判断した。

表 1-1 最終目標値と達成値

項目	目標値	達成値
Ra	0.2nm 以下	0.37nm
転位変換率	90%以上	98%
ウエハ加工による転位発生	化学機械研磨ウエハの半分以下	最大シェアメーカー化学機械研磨ウエハの 30%以下
TTV(2 インチウエハ)	2 $\mu$ m	2 $\mu$ m (研削では 1 $\mu$ m)
加工コスト	40%削減	66%削減

また、目標値達成や研究計画設定時からの時勢の変化による事業化に向けた新たな課題が明確になった。以下に課題項目を記す。

- ・ 大口径ウエハでの TTV 低減化
- ・ 研磨量の削減
- ・ ステップバンチングの抑制

- ・ ポリッシュレス加工

#### 1.4. 当該研究開発の連絡窓口

事業管理者

一般財団法人 ファインセラミックスセンター

研究企画部 課長 山本 義明

Tel: 052-889-1666 (内線 312)

Fax: 052-871-3599

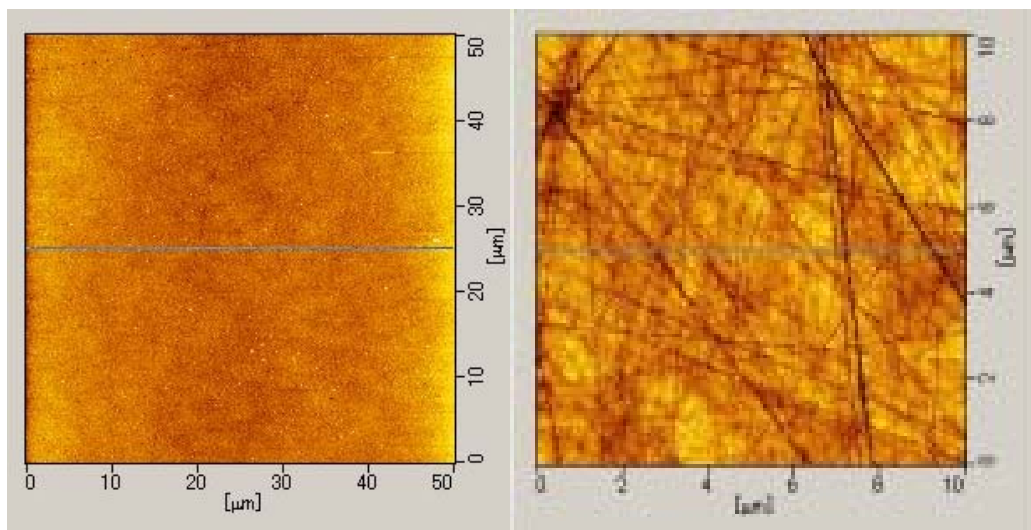
E-mail: [yamamoto@jfcc.or.jp](mailto:yamamoto@jfcc.or.jp)

## 2. 機械研磨技術の開発

### 2.1. 平坦化技術の開発

#### 2.1.1. 機械研磨技術の開発

平坦性の高い機械研磨の開発を従来機を用いて行った。研磨砥粒・研磨荷重・テーブルスピードの各パラメータについて表面粗さとの相関検討を行い適切な研磨条件を見出した。従来の機械研磨の表面粗さは  $Ra=1.1nm$  であったが適切な研磨条件で得られた表面粗さは  $Ra=0.37nm$  である(図 2-1)。開発した機械研磨の品質(表面に導入される加工起因欠陥の密度・深さ)については、2.1.2 で記述するが、導入欠陥密度がシェアの最も大きなメーカーの化学機械研磨の 30%以下、深さは  $0.4\mu m$  以下に納まった。



Ra 0.37nm

Ra 1.1nm

開発研磨

従来研磨

図 2-1 開発機械研磨で得られた表面平坦性

大口径、多枚葉研磨に対応すべく導入した片面研磨機でも、開発した機械研磨品質を再現するために、荷重、テーブル回転数、加工距離等の条件検討を行った。その結果、加工距離が重要なパラメータであることがわかり、テーブル回転数とプレート回転数のパラメータを開発した機械研磨条件を再現する様に設定すると新たに導入した片面研磨機でも開発した機械研磨品質が得られることが分かった。

図 2-2 に示す様にテーブルとプレートはそれぞれ独自に回転する。強制回転駆動による研磨機の相対速度は下記の計算式で表記される。

$$V_w(R_w, \theta_w) = \sqrt{\omega_T^2 d^2 + 2(\omega_T - \omega_w)\omega_T \cdot d \cdot R_w \cdot \cos\theta_w + (\omega_T - \omega_w)^2 R_w^2}$$

研磨プレートが 1 回転する間の相対速度の変化と規定時間加工した場合の走行距離を求めると、図 2-3 の様なグラフとなる。同様に、従来機で開発した機械研磨における相対速度を求めた。導入機でも同じ相対速度変化を得られる様、適切な加工条件パラメータを計算から求め、得られたパラメータを用いて実際に研磨を行った。その結果、従来の研磨条件と同じ研磨量・表面粗さを得ることができた。これによって、大口径対応、多枚葉研磨によるコスト削減が可能となった。

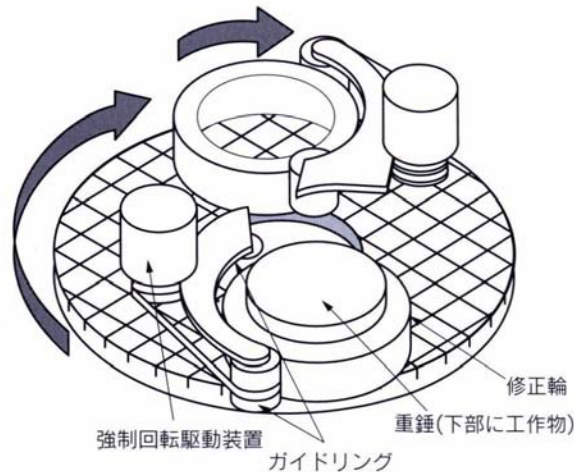


図 2-2 研磨概略図（研磨加工の理論と計算方法 日刊工業新聞より抜粋 式も同じ）

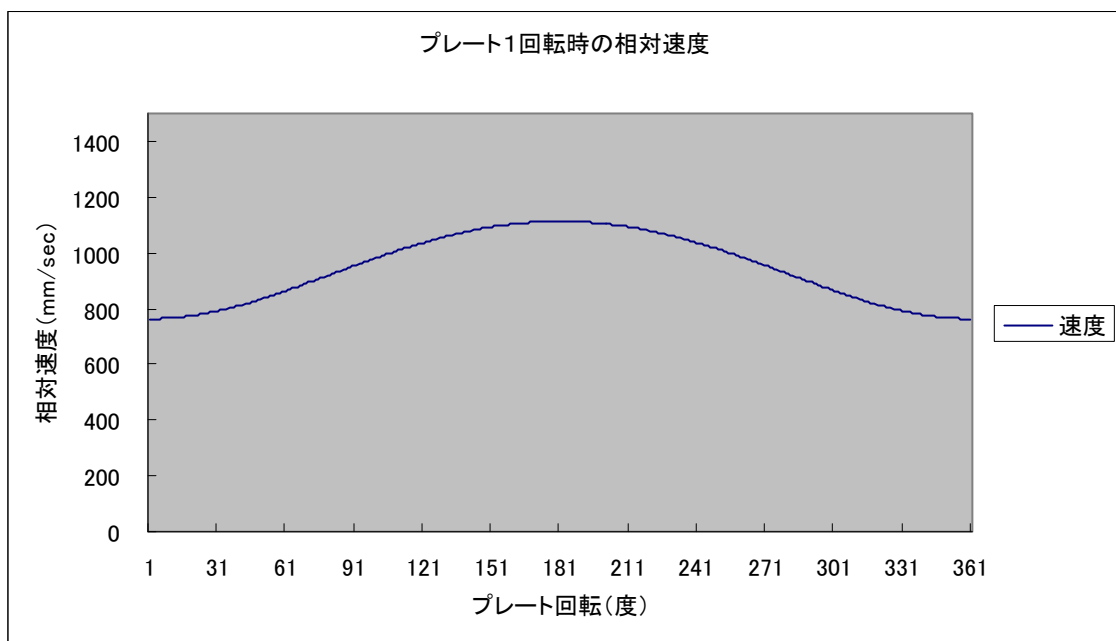


図 2-3 新型機の相対速度の変化（メーカーデフォルト値）

続けて、目標である 40%のコスト低減のため機械研磨時間の短縮(半減)化を図った。事前プロセスの分からないウエハの場合、切断・研削等で導入された深い欠陥を除去するために 20 $\mu$ m 程度の機械研磨を要する。上記で開発した機械研磨は研磨ダメージ導入を避けるため加工速度を抑制した弱研磨である程度の加工時間を要する(図 2-4)。一般的に、機械加工で導入される研磨ダメージ深さは切断・研削に比べれば浅いので、切断・研削で導入された欠陥を加工速度の

大きな研磨で除去し、最後に今回開発した機械研磨を施せば機械研磨ダメージを除去することができ、トータルの機械加工時間を短縮することが可能である。そこで加工速度の大きな研磨条件検討を行った。荷重・テーブル速度・揺動について条件検討を行い、研磨速度を従来の 2 倍程度にした(強研磨)。

この高速機械研磨(強研磨)と開発機械研磨(弱研磨)と組み合わせ研磨時間が従来の半分となる研磨を行った。組み合わせのパターンは、高速機械研磨から開発機械研磨へ急激な移行(図 2-5)、高速機械研磨から開発機械研磨へなめらかな移行等、数種類の検討を行い、適切な加工パターンを抽出した。

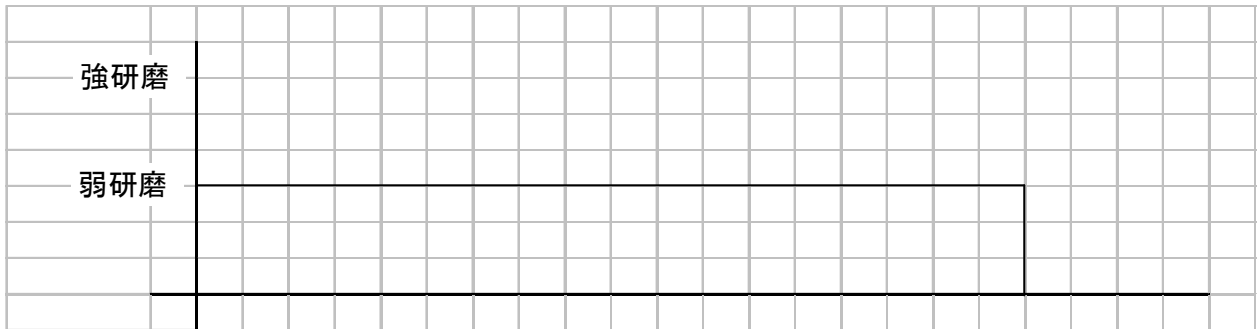


図 2-4 従来研磨レシピ

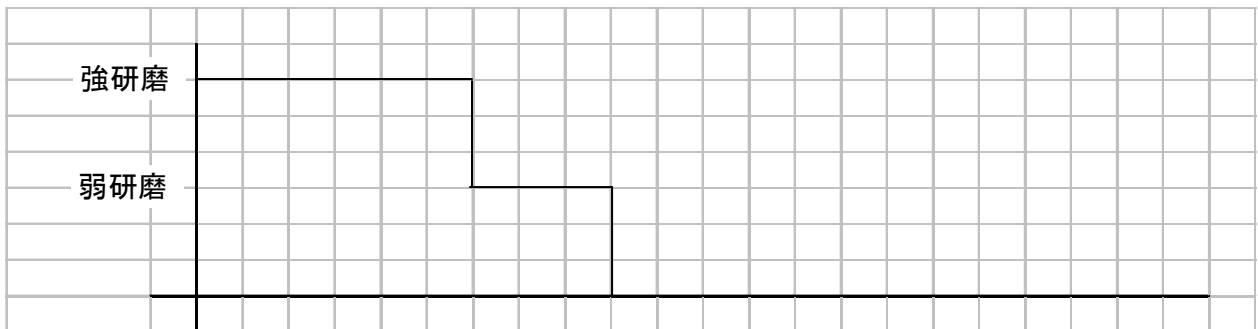


図 2-5 2段階連続研磨レシピ

以上の検討により、目標値である転位変換率 90%以上、切断・研削等の機械加工によって導入された欠陥量が最大シェアを占めるメーカーの化学機械研磨の半分以下という高い研磨品質を保持しながら、機械研磨による加工時間を従来の半分にした。機械加工時間の半減に加えて機械研磨のみで化学機械研磨と同等な表面形状・加工品質を得たことによる化学機械研磨工程の不要化により、加工コストは 66%削減され、目標値の 40%を上回った。多枚葉研磨による加工効率の向上を加えると加工コストはさらに低減される。

サンプル出荷へ向けてサンプル出荷に関する募集資料の配布を SiC 研究会で行った。

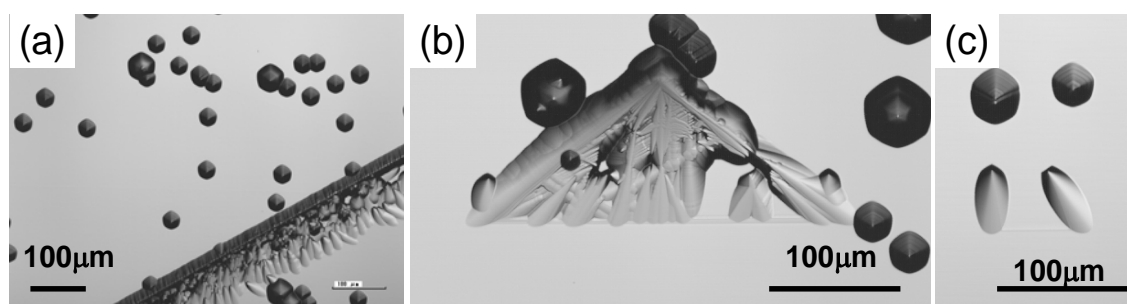
## 2.1.2. 機械研磨品質の評価

表 2-1 に機械研磨品質を比較するのに用いた試料を記す。ウエハを H<sub>2</sub> ガスエッチング(エッチング量 0.1~0.7μm)後にエピ成長を行いエピ膜に形成された欠陥を KOH エッチングで顕在化した。ガスエッチング量の増加に伴って減少する欠陥を表面にのみある欠陥、

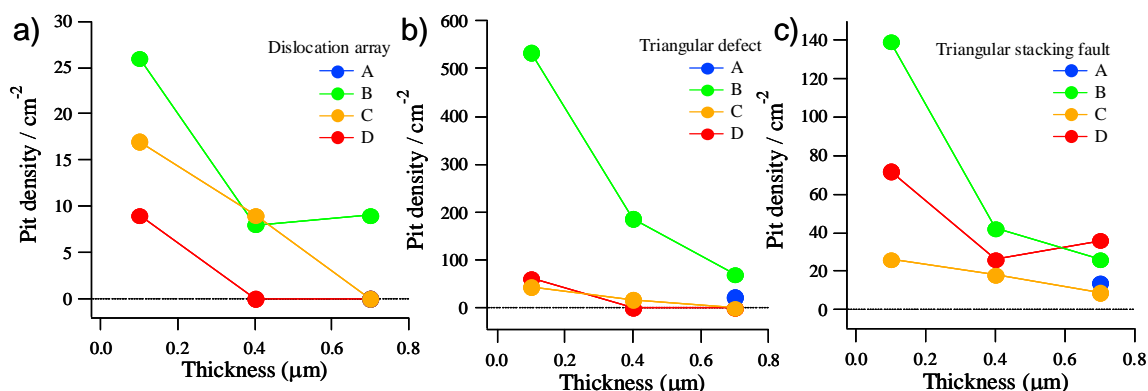
すなわち機械加工で導入された欠陥と判断し、ウエハ表面に導入された機械加工起因欠陥がエピ膜に伝搬することで形成される欠陥の種類を明らかにした。潜傷、三角欠陥、三角積層欠陥の3種である(図 2-6 上)。潜傷は従来から良く知られており砥粒がウエハ表面に形成した傷である。三角欠陥はエッチングしなくても観察することのできる数百 $\mu\text{m}$  となる大きな三角形の欠陥で CVD 装置内のゴミが原因とされてきた。三角積層欠陥は基底面転位がエピ成長によって拡張するものであるが一部は機械加工起因である。エピ成長前のウエハの  $\text{H}_2$  ガスエッチング量と機械加工起因欠陥の発生密度をグラフ化した(図 2-6 下)。0.1 $\mu\text{m}$  エッチング時の欠陥密度を機械加工導入欠陥密度、欠陥密度が  $0\text{cm}^{-2}$  となる深さを欠陥の分布深さと定義した。その結果、本研究開発の機械研磨(●)は、表面の潜傷・三角欠陥の密度が低く、深さ分布も浅いことが分かった。

表 2-1 研磨品質比較試料リスト

Sample name	Manufacturer	Polish	Etch pit density ( $\text{cm}^{-2}$ )
A	A	MP	9.9e3
B	B	CMP	3.2e4
C	C	MP	3.1e3
D	D	MP by Act	8.2e4



エピ膜に出現するTSD, TED, BPD以外の欠陥



エピ膜に出現する上記欠陥密度のエピ前の基板表面 $\text{H}_2$ エッチング量依存性

図 2-6 浅い欠陥の種類と密度の  $\text{H}_2$  ガスエッチング量依存性



開発した機械研磨の加工品質を市販の化学機械研磨加工ウエハと比較した（表 2-2）。加工導入欠陥の密度や分布深さの観点から評価すると化学機械研磨より開発した機械研磨の方が機械加工導入欠陥の密度が低く、分布も浅く優れていた。加工導入欠陥（潜傷・三角積層欠陥・三角積層欠陥）の密度は 3 種類ともシェアの最も大きなメーカの化学機械研磨（A 社：化学機械研磨品質を評価した 3 社の中で最も加工導入欠陥が少ない。）の加工導入欠陥密度の 30%以下であり、機械加工導入欠陥密度が化学機械研磨の 1/2 以下という目標を達成していることがわかった（表 2-3）。

表 2-2 研磨品質の比較表

Crystal-polish	Dislocation array		Triangular defect		Triangular SF
	density	depth	density	depth	density
A-CMP	○	○	○	△	△
B-CMP	×	×	×	×	△
B-CMP by X	◎	◎	×	×	×
C-CMP by act	○	○	◎	○	◎
C-MP by act	◎	◎	◎	◎	○
D-MP by act	○	○	○	○	○

Depth: ◎ <0.1μm, ○<0.4 μm, △<0.7 μm, × 0.7 μm<

Density:

DA: ◎ 0cm<sup>-2</sup>, ○<10cm<sup>-2</sup>, △<20cm<sup>-2</sup>, × 20cm<sup>-2</sup><

TD: ◎ <20cm<sup>-2</sup>, ○<80cm<sup>-2</sup>, × 80cm<sup>-2</sup><

TSF: ◎ <40cm<sup>-2</sup>, ○<100cm<sup>-2</sup>, △<200cm<sup>-2</sup>, × 200cm<sup>-2</sup><

表 2-3 機械加工欠陥密度の比較 (cm<sup>-2</sup>)

加工起因欠陥	機械研磨	化学機械研磨		
	アクト	A社	B社	X社
潜傷	0	10	26	0
三角欠陥	9	70	533	多数
三角積層欠陥	54	180	140	多数

ウエハの基底面転位密度と開発した機械研磨ウエハの上にエピ膜を成長した後の基底面転位の密度を求め、（ウエハの基底面転位密度－エピ膜の基底面転位密度）/ウエハの基底面転位密度 x100 を転位変換率と規定して転位変換率を求めた。転位密度はウエハを KOH もしくは KOH+Na<sub>2</sub>O<sub>2</sub> の融液でエッチングして顕在化した転位を計数して求める。（一例を図 2-7 に示す。） ウエハの基底面転位密度が 500 個/cm<sup>2</sup>、エピ膜の基底面密度が 11 個/cm<sup>2</sup> であることから、基底面転位の 98%が変換され、本研究開発の目標値である転位変換率 90%以上を達成した。

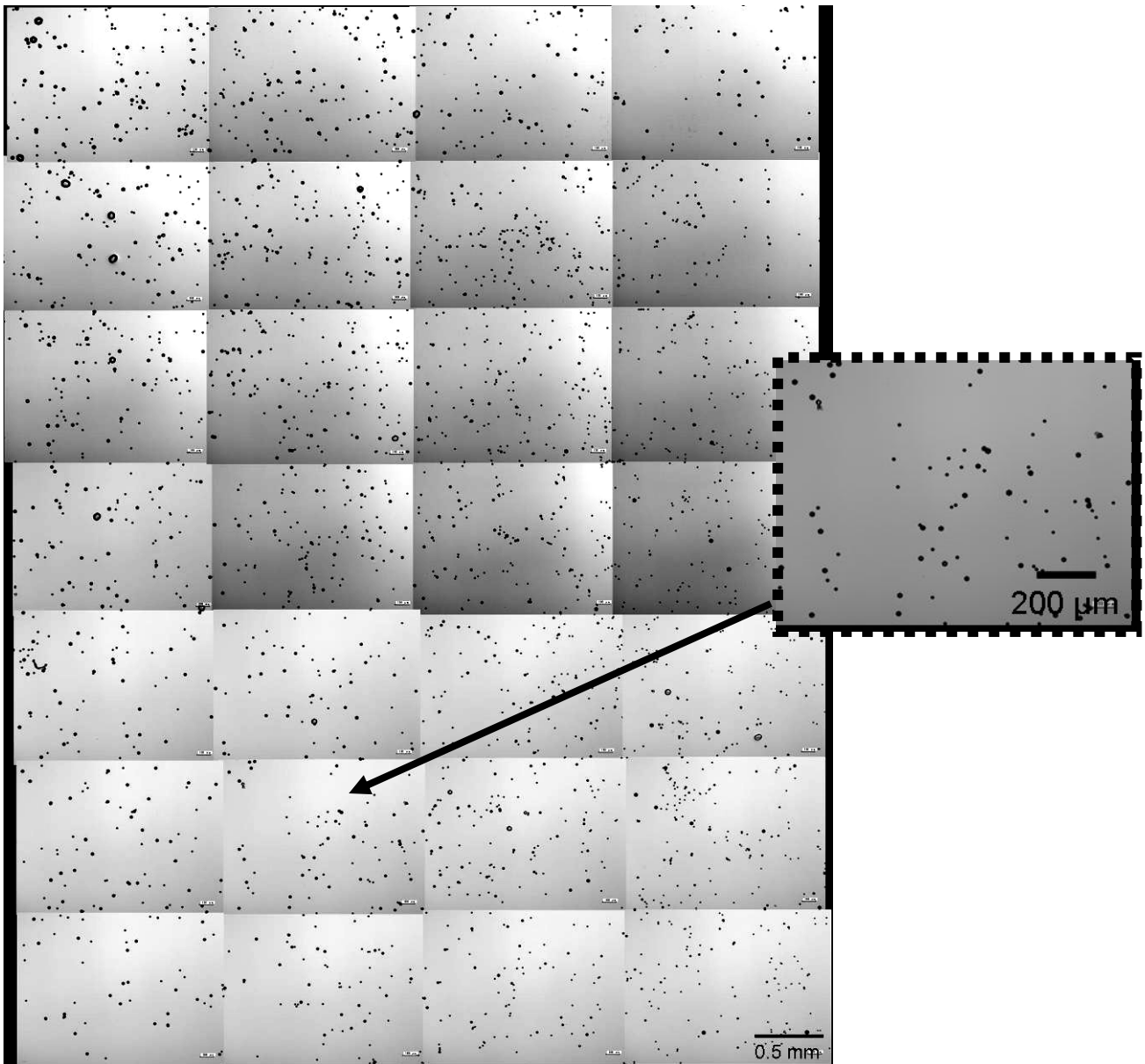


図 2-7 アクト MP 研磨ウエハのエピ膜表面（エッチング処理）のレーザー顕微鏡観察結果

また、Ra が  $0.37\text{nm}$  で初期目標値の  $0.2\text{nm}$  に達しないことの是非について検討した。研磨直後の表面形状よりもエピ成長直前の表面形状が重要であるので  $\text{H}_2$  ガスエッチングを行い表面形状の差異を調べた。開発した機械研磨の表面形状は、化学機械研磨の表面形状と同等なものが得られたので Ra  $0.37\text{nm}$  で十分であることが分かった。

強研磨と弱研磨を組み合わせた研磨レシピ数種について、表面の加工欠陥密度、エピ膜に導入される欠陥密度の観点から研磨品質を評価した。表面の加工欠陥密度が研磨パターンによって異なることを見出し、最も欠陥密度の低いレシピを抽出した。また、どの研磨レシピも、表面を  $0.4\mu\text{m}$  水素ガスエッチングすると表面の加工欠陥は除去されエピ膜中に伝搬しないので欠陥は浅いことがわかった。

モデル研磨を行い、研磨で SiC 結晶表面に大きな砥粒( $6\mu\text{m}$ )研磨で導入される転位には深さ方向に広がるネットワーク転位と基底面上に伸びる基底面転位があること。小さな砥粒( $0.5\mu\text{m}$ )研磨で導入される転位はハーフループ状であることを明らかにした。

SEM-CL 観察により、加工導入欠陥を起点にしてエピ膜に成長した欠陥を解析した。三角欠陥は積層欠陥を含んでおり、潜傷を起点に発生した転位列中にも積層欠陥が発生していることを明らかにした。

### 2.1.3. 機械研磨安定性の向上

従来使用しているダイヤモンドスラリーに対してパッドの違い（19 種類）による研磨結果を比較し、安定的な研磨を得ることのできるパッドを研磨後のウエハの表面形状(スクラッチの有無)から抽出し（図 2-8）、絞り込みを行った。



図 2-8 研磨表面形状のパッド依存性の例

（上が適切と判断したパッドで研磨、下は不適と判断したパッドで研磨した。左は x50 倍、右は x200 倍の突起はフォーカスを合わせやすくするために使用したウエハ上のゴミ等である）

加えて新たに導入した片面研磨機による研磨条件の最適化により、安定性が向上した。研磨条件選定がパッドのチューニングより重要であることが分かった。また、加工レシピの検討で加工時間を半分に短縮した。

## 2.1.4. 技術の適用範囲の確認

市販ウエハの標準規格であるオフ角、オフ方向、ウエハ供給メーカー(5社)のウエハを研磨し、開発した研磨技術が適用可能なことを確認した。今後の主流となる 4inch ウエハへの本技術の適用性も検討し、同じ品質が得られることを確認した。

## 2.2. 切断技術の開発

### 2.2.1. 切断技術の選定

ウエハメーカーの機密保持のために入手が困難な SiC のインゴットを、自ら SiC を単結晶成長しインゴット化した。これをそれぞれ、放電加工、遊離砥粒、固定砥粒で切断し、切断面品質評価用試料とした。放電加工は遊離砥粒切断に比べ表面が粗い。詳細な切断面の評価結果は 2.2.3 に示す。

加工時間、歩留まり、後工程、2.2.3 に記述した切断面品質の評価結果などの観点から切断方法を評価し、放電加工切断は適切ではないと判断した。遊離砥粒切断と固定砥粒切断は一長一短があり、この2つを切断技術として選定した。

### 2.2.2. 研削技術の選定と高度化

研削条件、特に砥石の検討を行った。SiC 結晶をウエハに加工する際に問題となる外周部のチップングは # 8000 以上で抑制されることを見出した。また、研削加工で生じるダメージ深さは砥石の番手が大きくなるほど浅くなることがわかった。表面粗さも番手が大きくなるほど小さくなった。# 10000 の研削を行うと一般的機械研磨と同等な Ra 約 3nm の表面が得られる様になった (図 2-9)

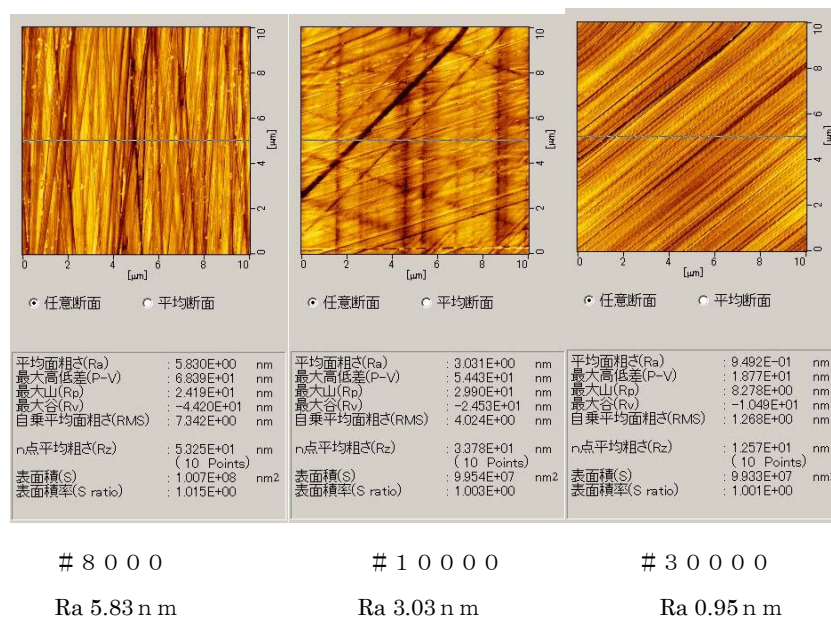


図 2-9 研削面の粗さ評価

選定した研削条件で2インチウエハを加工すると表 2-4 に示す様に TTV は研削直後で  $1\mu\text{m}$  となった。その後の機械研磨で  $2\mu\text{m}$  となり目標値を達成した。

表 2-4 研削による厚さバラツキの変化

計測ポイント	加工前	研削			
		#1000		#10000	
		1回目	2回目	1回目	2回目
①	956	950	928	928	926
②	953	950	929	928	925
③	958	950	927	927	925
④	948	949	927	927	925
⑤	949	948	928	927	925
平均厚さ	952.8	949.4	927.8	927.4	925.2
高低差(TTV)	10	2	2	1	1

### 2.2.3. 切断・研削による転位・ダメージ発生の評価

開発した表面評価技術を用いて、放電加工、遊離砥粒、固定砥粒で切断した試料の切断面品質評価を行った。放電加工表面は粗く、加工分解物である Si、C (図 2-10) が最表面に、3C-SiC (図 2-11) が表面近傍に形成されていた。一方、遊離砥粒および固定砥粒切断した試料の切断面は放電加工面に比べると平坦で、加工分解物はない。しかし、切断によって導入されたダメージによって、結晶欠陥(積層欠陥、転位、歪、非輻射遷移)が生じていることを明らかにした。放電加工は、少ない応力でも切断できるためダメージが少なく高品質な切断面が得られるとされていたが、切断時に生成された 3C-SiC は積層欠陥等と同じく除去の必要があり、表面粗さ・最大高さとも遊離砥粒や固定砥粒の 6-8 倍と大きく平坦性の確保と 3C-SiC の除去のために必要な加工量が大きく、後工程の優位性が認められなかった。



## 放電加工切断面の様子

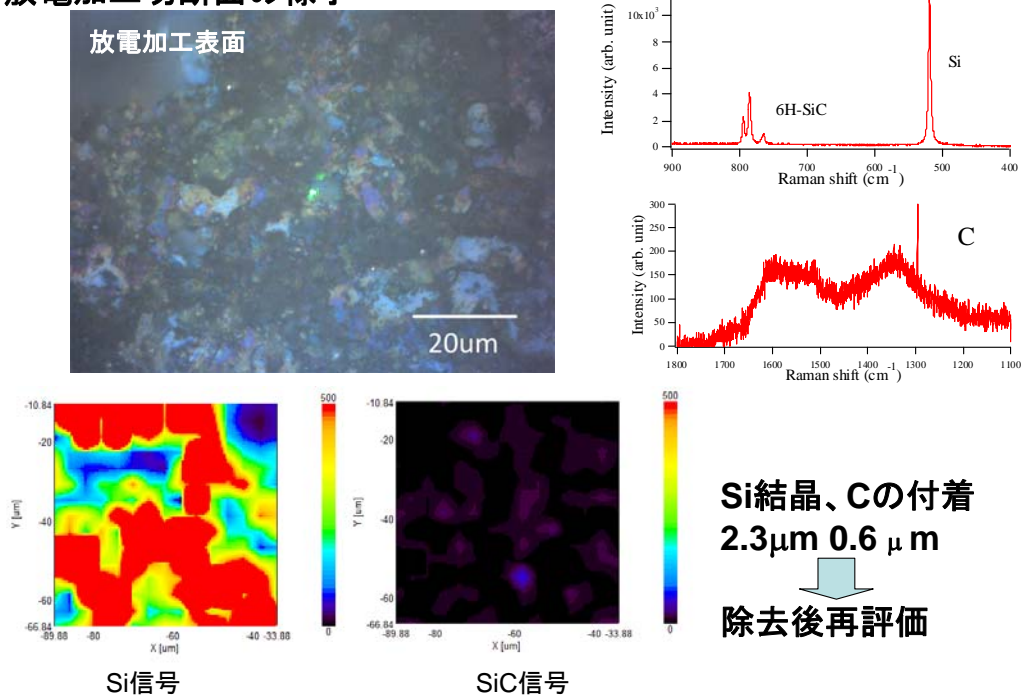


図 2-10 放電加工面のラマンによる評価

## 放電加工切断面の様子(付着物除去後)

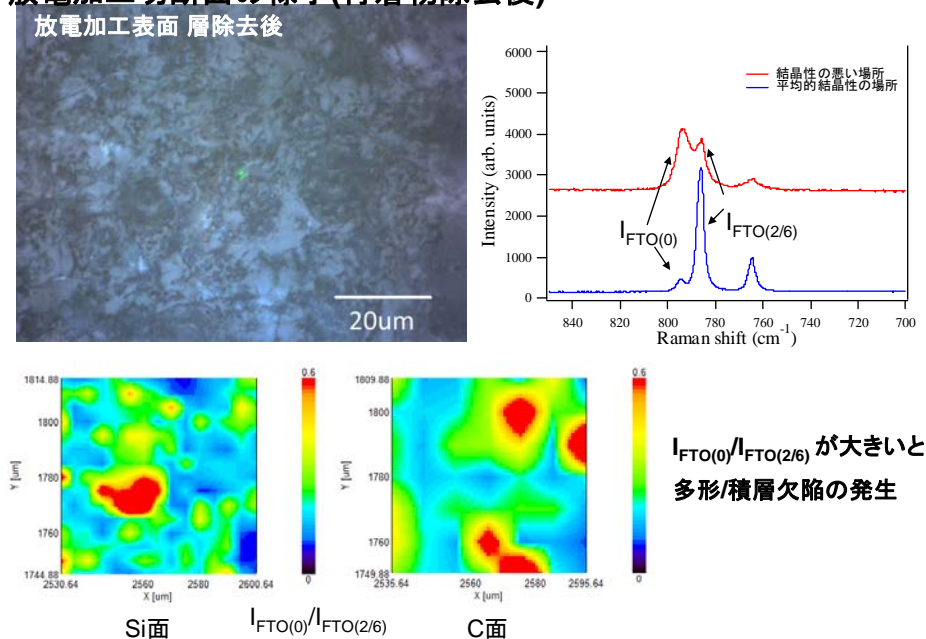


図 2-11 放電加工面のラマンによる評価 (表面層除去後)

遊離砥粒切断と固定砥粒切断の比較においては若干ながらラマン信号における  $I_{FTO(0)}/I_{FTO(2/4)}$  が遊離砥粒切断の方が大きく  $I_{FTO(2/4)}$  の半値幅が大きいことから、積層欠陥等の欠陥は遊離砥粒切断の方が多という結果になった。一方、CL による評価からは遊離砥粒切断の発光強度が強く、非輻射遷移の密度は固定砥粒切断の方が多という結果になった。表面粗さは固定砥粒切断の Ra が 0.2–0.3 $\mu$ m、遊離砥粒切断が 0.4 $\mu$ m で遊離砥粒切断の方が粗かった。遊離砥粒と固定砥粒のどちらが切断に適しているかの判定を上

記の結果のみからすることは難しい。コストや後工程を考慮する必要がある。また、各切断方法で切断面近傍に導入された欠陥・凹凸など等を模式化したのが図 2-12 である。

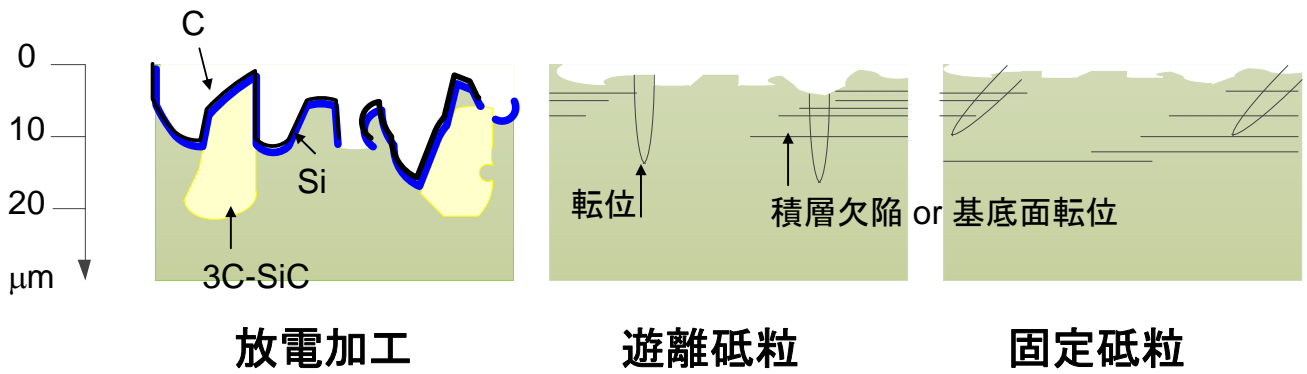


図 2-12 切断断面の模式図

他にモデル切断として一方向研磨における転位発生の差異を EBIC 法で調べ、ステップを上る際には転位が導入されるがステップを降りる際には転位が導入されないことを見出した。この結果は単純に切断の条件だけではなく結晶を切断する際の結晶の配置がダメージの少ない切断には重要なことを示唆している。

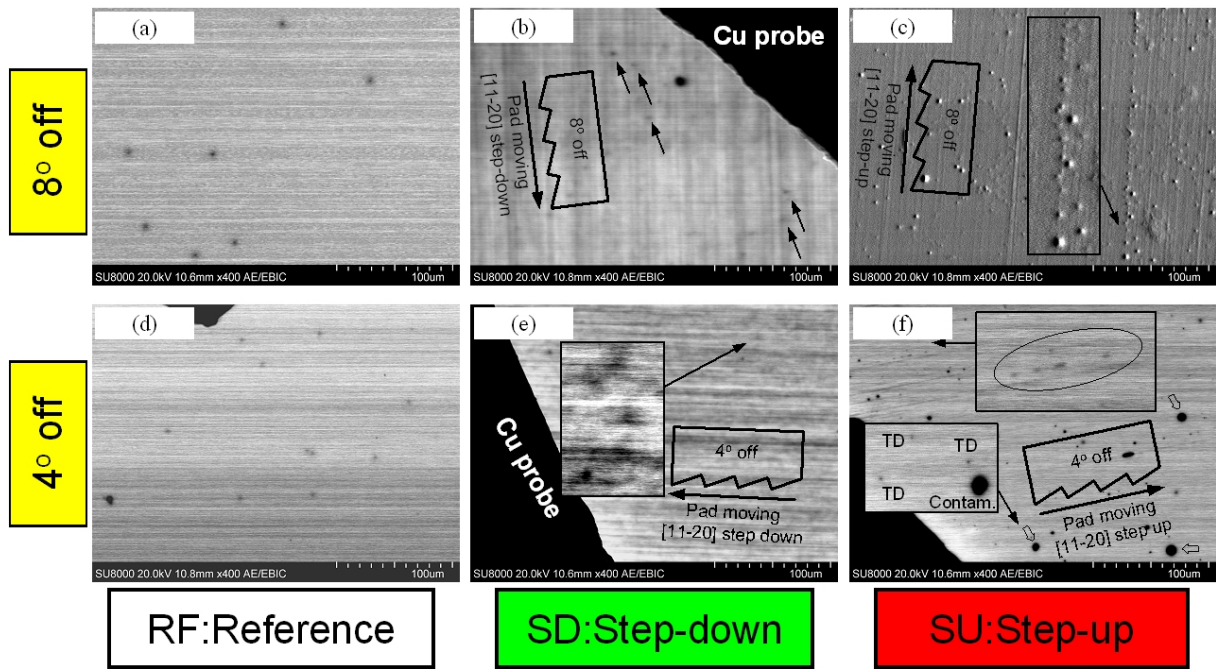


図 2-13 参照試料(Reference 試料=未研磨,以下 RF)、SD 方向研磨、及び SU 方向研磨試料の EBIC 像 (上=8°オフ、下=4°オフ)。

### 3. プロジェクトの管理・運営

#### 3.1. 進捗管理・物品管理

研究開発委員会の他に、年 3-4 回の研究打ち合わせを実施し、進捗状況の確認、今後の研究開発方針の検討を行った。

導入機械装置の発注及び検収管理を実施した。

#### 3.2. 研究開発委員会の開催

研究開発委員会を各年度 2 回開催した。

平成 22 年度

第 1 回研究開発委員会 平成 22 年 9 月 21 日

第 2 回研究開発委員会 平成 23 年 2 月 25 日

平成 23 年度

第 1 回研究開発委員会 平成 22 年 5 月 30 日

第 2 回研究開発委員会 平成 23 年 3 月 2 日

平成 23 年度 第 3 次補正

第 1 回研究開発委員会 平成 24 年 5 月 14 日

第 2 回研究開発委員会 平成 24 年 12 月 7 日



## 4. 全体総括

### 4.1. 複数年の研究開発成果

機械研磨のみで化学機械研磨並の研磨品質を得ることのできる機械研磨技術の開発を行った。目的を達成する為に機械研磨技術で以下の目標値を立てた。各目標値と達成した値を表にまとめた。Ra 以外は目標値をクリアした。Ra の目標値の妥当性について検討した結果、今回達成した Ra0.37nm でもエピ成長直前の表面形状は化学機械研磨と同等であることがわかったうえ、研究開発委員会におけるアドバイザーから過剰目標との指摘を受けたため、今回の達成値で十分であると判断した。

表 4-1 最終目標値と達成値

項目	目標値	達成値
Ra	0.2nm 以下	0.37nm
転位変換率	90%以上	98%
ウエハ加工による転位発生	化学機械研磨ウエハの半分以下	最大シェアメーカー化学機械研磨ウエハの 30%以下
TTV(2 インチウエハ)	2 $\mu$ m	2 $\mu$ m (研削では 1 $\mu$ m)
加工コスト	40%削減	66%削減

#### 4.1.1. 機械研磨技術の開発

##### 4.1.1.1. 平坦化技術の開発

加工導入欠陥の密度が低く浅い機械研磨条件の従来機を用いた検討を行い適切な条件を見出した。表面粗さは Ra=0.37nm である。本研磨条件を再現する様に、テーブル回転数とブレード回転数のパラメータを設定すると平成 23 年導入の片面研磨機でも従来機と同じ研磨が得られることが分かった。続けて、コスト低減のため加工速度の大きな研磨条件を見出し、加工導入欠陥密度が低く浅い上記開発機械研磨と組み合わせ、目標値である転位変換率 90%以上、機械加工によって導入された欠陥量が最大シェアを占めるメーカーの化学機械研磨の半分以下という高い研磨品質を保持しながら、機械研磨による加工時間を従来のは半分にした。機械加工時間の半減に加えて機械研磨のみで化学機械研磨と同等な表面形状・加工品質を得たことによる化学機械研磨工程の不要化により、加工コストは 66%削減され、目標値の 40%を上回った。

##### 4.1.1.2. 機械研磨品質の評価

開発した機械研磨の加工品質を市販ウエハの機械研磨および化学機械研磨加工品質と比較した。加工導入欠陥の密度や分布深さの観点から評価すると開発した機械研磨が最も優れていた。加工導入欠陥の密度はシェアの最も大きなメーカーの化学機械研磨（化学機械研磨品質を評価した 3 社の中で最も加工導入欠陥が少ない。）の加工導入欠陥密度の

30%以下であった。開発した機械研磨ウエハの上にエピ膜を成長し、転位変換率(エピ膜の基底面転位密度/ウエハの基底面転位密度 x100)を求め、98%であることを確認した。

また、Ra が 0.37nm で初期目標値の 0.2nm に達しないことの是非について検討した。研磨直後の表面形状よりもエピ成長直前の表面形状が重要であるので H<sub>2</sub> ガスエッチングを行い表面形状の差異を調べた。開発した機械研磨の表面形状は、化学機械研磨の表面形状と同等なものが得られたので Ra 0.37nm で十分であることが分かった。

強研磨と弱研磨の組み合わせた研磨レシピ数種について、表面の加工欠陥密度、エピ膜に導入される欠陥密度の観点から研磨品質を評価した。表面の加工欠陥密度が研磨パターンによって異なることを見出し、最も欠陥密度の低いレシピを抽出した。またどの研磨レシピでも、表面を 0.4μm 水素ガスエッチングすると表面の加工欠陥は除去されエピ膜中に発生しないので浅いことがわかった。

モデル研磨を行い、研磨で SiC 結晶表面に大きな砥粒(6μm)研磨で導入される転位には深さ方向に広がるネットワーク転位と基底面上に伸びる基底面転位があること。小さな砥粒(0.5μm)研磨で導入される転位はハーフループ状であることを明らかにした。

SEM-CL 観察により、加工導入欠陥を起点にしてエピ膜に成長した欠陥を解析した。三角欠陥は積層欠陥を含んでおり、潜傷を起点に発生した転位列中にも積層欠陥が発生していることを明らかにした。

#### 4.1.1.3. 機械研磨の安定性の向上

安定性の高いパッドを抽出し、絞り込みを行った。加えて平成 23 年度に導入した片面研磨機による研磨条件の最適化により、安定性が向上した。研磨条件がパッドのチューニングより重要であることが分かった。また、加工レシピの検討で加工時間を半分に短縮した。

#### 4.1.1.4. 技術の適用範囲の確認

市販ウエハの標準規格であるオフ角、オフ方向、ウエハ供給メーカ(5 社)のウエハを研磨し、開発した研磨技術が適用可能なことを確認した。今後の主流となる 4inch ウエハへの本技術の適用性も検討し、同じ品質が得られることを確認した。

### 4.1.2. 切断技術の開発

#### 4.1.2.1. 切断技術の選定

ウエハメーカーの機密保持のために入手が困難なインゴットを、自ら単結晶成長しインゴット化した。これをそれぞれ、放電加工、遊離砥粒、固定砥粒で切断し、切断面品質評価用試料とした。切断面品質、加工時間、歩留まり、後工程などの観点から切断方法を評価し、放電加工切断は適切ではないと判断した。遊離砥粒切断と固定砥粒切断は一長一短があり、この 2 つを切断技術として選定した。

#### 4.1.2.2. 研削技術の選定と高度化

研削条件、特に砥石の検討を行った。SiC 結晶をウエハに加工する際に問題となる外周部のチップングは # 8 0 0 0 以上で抑制されることを見出した。また、研削加工で生じ

るダメージ深さは砥石の番手が大きくなるほど浅くなることを見出した。#10000の研削を行うと一般的機械研磨と同等な Ra 約 3nm の表面が得られる様になった。選定した研削条件で2インチウエハを加工すると TTV は研削直後で 1 $\mu$ m。その後の機械研磨で 2 $\mu$ m となり目標値を達成した。

#### 4.1.2.3. 切断・研削による転位・ダメージ発生の評価

開発した表面評価技術を用いて、放電加工、遊離砥粒、固定砥粒で切断した試料の切断面品質評価を行った。放電加工表面は粗く、加工分解物である Si、C、3C-SiC が表面に形成されていた。一方、遊離砥粒および固定砥粒切断した試料の切断面は放電加工面に比べると平坦で、加工分解物はなく代わりに、結晶欠陥(積層欠陥、転位、歪、非輻射遷移)が生じていることを明らかにした。

モデル切断として一方向研磨における転位発生の差異を EBIC 法で調べ、ステップを上る際には転位が導入されるがステップを降りる際には転位が導入されないことを見出した。

## 4.2. 研究開発後の課題・事業化展開

本研究開発の当初の目標をクリアしたことによって今後の事業化に向けての新たな課題が明確になった。

### 「大口径ウエハでの TTV」

本研究では、2インチウエハでの TTV 2  $\mu$  m以下を実現したが、ウエハ成長技術の進展により大口径化が進んできたため、大口径ウエハでの TTV 低減化に本開発技術を適応させる取り組みが必要となった。

大口径ウエハに適応させるためには、研削効率の向上が重要である。砥石のダイヤモンドの集中度に加えて、ダイヤモンドを固定しているボンド材の検討も必要になることが予想される。

### 「研磨量の低減」

本研究で加工時間を短縮しコストを大幅に削減したが、研磨の前工程がわからないウエハでも高品質な表面(低加工導入欠陥密度)を得ることの可能な 20  $\mu$  mの研磨量を前提としていた。

この研磨量 20  $\mu$  mはインゴットから得られるウエハ枚数(歩留り)に大きく影響する。少ない研磨量で高品質な表面を創出するために、前工程である切断・研削の標準化を検討する必要があると思われる。

### 「ステップバンチングの抑制」

本研究開発中に新たに、ステップバンチング(高さが数 nm になる階段状構造)や微小ピットが表面にあるとデバイス性能が落ちることが問題となった。これらの原因としてウエハ表面のゴミや研磨で生じた微小な凹凸等が指摘されており、表面形状の検討が必要である。

### 「ポリッシュレス加工」

大口径ウェハに求められる形状制御（厚さとそのバラツキ）を研削によって形状を作り機械研磨工程（ラッピング、ポリッシング）を省略し直接CMP加工を行うことによって実現する試みを行う。

アドバイザーからの指摘にもあったように薄くて形状の整ったウェハが求められていることから形状の悪化を招く機械研磨を省略する意味は大きく、加えて工程の省略によるコストダウンを期待できる。

本研究によって得られたダメージに対する考え方をもとに研削加工におけるダメージ低減が実現できれば、形状制御と低コストを両立させる新しいウェハ加工工程として市場に提案できると考えている。

上述の様にいくつかの課題があるが、次の表に今回の研究開発で導入したそれぞれの装置の役割をまとめた。

表 4-2 課題と装置の役割

課題	装置					
	加工		洗浄		評価	
	表面研削装置	片面研磨機	基板洗浄装置	プラズマ洗浄装置	表面評価装置	表面検査装置
大口径ウェハでのTTV	◎	○	△	△		
研磨量の低減	○	◎	△	△	△	△
ステップバンチング抑制	○	◎	◎	◎	◎	○
ポリッシュレス加工	◎		△	△	○	○
◎＝非常に重要    ○＝重要    △＝補助的に必要						

残された課題をクリアすることにより下記特徴を前面に出した事業化が可能になる。

- ・ 低転位加工（＝高品質加工）
- ・ 低コスト加工

これらの特徴を明示するためには加工後の評価データに基づいた品質の説明を十分にすることがある。研究によって得られた結果（データ）を多用し学会や研究会を通じ各企業にアピールしていく予定である。

また、この研究成果である機械研磨技術を大型装置による量産化に適応させる努力も継続して行っていく必要があると考えている。

## 5. 外部発表等

サポインの研究開発成果を論文掲載（2 報）、雑誌記事執筆(1 件)、書籍執筆（1 件）、ファインセラミックスセンターの研究成果発表会（1 件）新聞掲載(1 件)、で公表し、開発技術の優位性を示した。