

研究種目：若手研究（A）  
 研究期間：2006～2008  
 課題番号：18686014  
 研究課題名（和文）  
 ワイドバンドギャップ半導体デバイス製作のための高能率化学的加工法  
 研究課題名（英文）  
 High efficiency chemical machining process for wide bandgap semiconductor substrate  
 研究代表者  
 佐野 泰久 (SANO YASUHISA)  
 大阪大学・大学院工学研究科・准教授  
 研究者番号：40252598

## 研究成果の概要：

ワイドバンドギャップ半導体である炭化ケイ素（SiC）は、次世代省エネルギーパワーデバイス用基板として注目されているが、その硬度と熱的・化学的安定性のため、有効な加工方法が模索されている。本研究では、大気圧プラズマを用いた化学的気化加工法（PCVM）を SiC の加工に適用し、加工特性の温度依存性を明らかにするとともに、SiC ウェハ外周のベベル加工（面取り加工）への応用および裏面薄化への応用について検討し、その可能性を明らかにした。

## 交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2006年度	8,300,000	2,490,000	10,790,000
2007年度	7,300,000	2,190,000	9,490,000
2008年度	4,700,000	1,410,000	6,110,000
年度			
年度			
総計	20,300,000	6,090,000	26,390,000

## 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：炭化ケイ素, PCVM, 大気圧プラズマ, ベベル加工, 薄化

## 1. 研究開始当初の背景

ワイドバンドギャップ半導体である炭化珪素（SiC）は、禁制帯幅が広く、絶縁破壊電界、飽和電子速度、熱伝導度が高いという優れた物性を持つ半導体材料である。これらの特徴のため、パワーデバイス、高周波高出力デバイスなどの分野では、シリコン（Si）やガリウム砒素といった既存の半導体では不可能な高性能なデバイスが実現できる。家電製品や産業機械、鉄道、電気自動車などに使われるインバータ用のパワーデバイスに

SiC を用いた場合、電力の変換損失が Si デバイスの数百分の1になることが期待されており、省エネルギー、低環境負荷の観点から、広くその実用化が期待されている。近年の意欲的な研究開発によって、SiC の結晶作製技術、基板製造技術、デバイス製造技術は飛躍的に進展してきたが、いずれもまだ十分であるとは言えない。特に、SiC はダイヤモンドに次ぐ硬度を有しており、熱的・化学的にも極めて安定なため、基板やデバイスを製造する際の有効な加工方法が模索されている。

## 2. 研究の目的

本研究の全体構想は、SiC 基板の製造に関わるあらゆる加工技術に対して、大気圧プラズマを用いたプラズマエッチングであり、高効率な化学的加工法である Plasma Chemical Vaporization Machining (PCVM) 等を適用することにより、SiC の高効率・高精度加工を実現することである。それにより、高性能な SiC デバイスの開発・普及を促進し、省エネルギー社会の実現に貢献したい。

その中で、本研究課題においては、(1) PCVM による SiC の基本加工特性を明らかにすること、さらに、(2) SiC ウエハのベベル加工(面取り加工)への PCVM の応用、(3) SiC ウエハの裏面薄化への PCVM の応用、について基礎検討を行いその可能性を見極めることを目的とする。

## 3. 研究の方法

### (1) PCVM による SiC の基本加工特性

これまでの PCVM による SiC の加工に関する基礎実験から、その加工速度がプラズマへの投入電力に対して非線形に増大することが知られており、加工特性の基板温度依存性を調査する必要がある。そこで、既存の PCVM 基礎実験用装置に試料加熱用のシステムを導入し、基板温度を変化させてその加工特性を調査した。

### (2) PCVM による SiC ウエハのベベル加工

高品位な研磨面を得るためには、研磨前にウエハ外周部のエッジを面取りすることが不可欠であり、PCVM の適用を検討した。ウエハ外周部全体にプラズマを発生させることが可能な PCVM ベベル加工装置を新たに試作し、2 インチ SiC ウエハ外周部の加工実験を行うことで、その有用性を実証した。

### (3) PCVM による SiC ウエハの裏面薄化

ウエハ表面と垂直方向に電流が流れるパワートランジスタにおいては、オン抵抗低減のため、デバイス形成後に裏面からウエハを薄化することが有効である。PCVM を用いて SiC 基板の薄化が可能であることを示すため、2 インチ 4H-SiC (0001) 8° オフ基板から切り出した 20mm×5mm の短冊状の小片試料を用いて検討を行った。

## 4. 研究成果

### (1) PCVM による SiC の基本加工特性

本実験ではパイプ電極(直径 3mm)を用い、プラズマによる加熱を抑えるため、投入電力はプラズマを安定に発生させるのに必要な最低電力(25W)に設定した。試料は 4H-SiC (0001) on-axis 基板の Si 面および C 面、そして比較のためのシリコン(Si)基板、の 3 種類とした。基板温度を 100°C、200°C、

360°C として加工実験を行った結果を図 1 に示す。100°C と 360°C の結果を比較すると、100°C においては SiC の加工速度は Si に比べて 1/10 程度であるのに対して、360°C においては Si の約 1/3 にまで向上することが分かった。この一連の実験においては投入電力を 25W に固定しているため、プラズマ中で生成している F ラジカルの量は等量であると考えられ、加工速度が上昇したのは、表面原子が F ラジカルと反応して離脱する確率が基板温度上昇に伴って増加したことによると考えられる。また、各条件における加工面を顕微干渉計(Zygo NewView 200)によって計測した結果を図 2 に示す。基板温度の上昇に伴って、エッチピット等の発生が促進される傾向があるが、基板温度を 100°C 程度に抑えることで加工前表面よりも表面粗さは改善することが分かった。なお、図 2 の結果は Si 面に関する結果であるが、C 面については 200°C や 360°C においても図 2(b)と同様の結果が得られており、C 面においては少なくとも 360°C 以下では温度によらず加工面の表面粗さは改善することが分かった。

これらの結果は、PCVM の SiC 加工への各種応用研究に対する基礎となる点で大変意義深い。しかしながら、Si 面と C 面における加工特性の相違の解釈等、依然明らかになっていないことも多く、今後も検討を続けて行きたい。

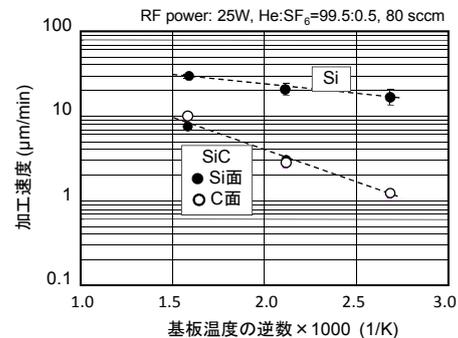


図 1 加工速度の基板温度依存性

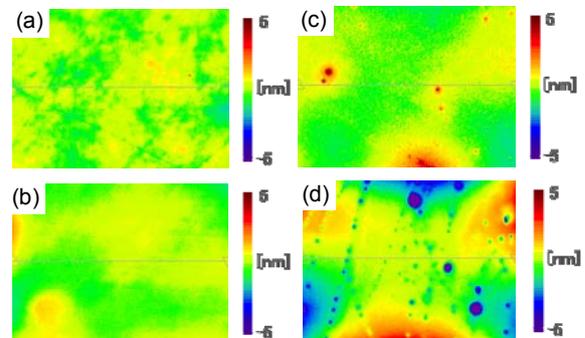


図 2 加工面の基板温度依存性 (Si 面)  
(a)加工前, (b)100°C, (c) 200°C, (d) 360°C

(2) PCVM による SiC ウェハのベベル加工

図 3 に、開発した SiC ウェハ用 PCVM ベベル加工装置の概略を示す。SiC ウェハ自体をプラズマ発生用電極としており、外側電極の形状をウェハのオリエンテーションフラットに対応させており、図 4 のようにウェハ全周において均一にプラズマを発生させる事が可能となっている。本装置では大気圧雰囲気中でプラズマを発生させるためエッジ部のみに局所的にプラズマを発生させる事が可能である。

2 インチ 4H-SiC (0001) 基板を用いて約 20 分の加工実験を行い、加工前後のエッジ部の形状をレーザー共焦点顕微鏡によって測定した結果を図 5 に示す。エッジ先端部分(図 5 中の B)は、側面(図 5 中の A)に比べ多く加工されたことを確認でき、良好なベベル加工が行われたことが分かる。PCVM によりベベル加工が可能であるのは、ウェハエッジ先端において電界が集中するため、反応種である F ラジカルの密度がエッジ先端に近いほど高くなるためと考えられる。

本成果は、SiC ウェハエッジ部のベベル加工とウェハ端部の破碎層の除去を同時に高能率に実現する方法として、国内学会・国際会議等で注目された。今後は、加工後の断面形状の各種加工条件による制御性等について検討を続けていきたい。

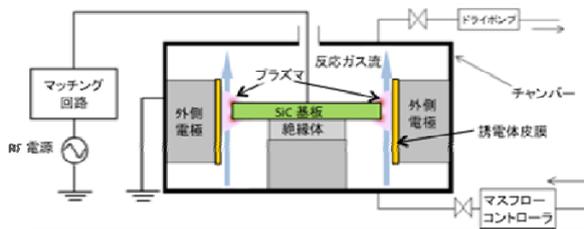


図 3 PCVM ベベル加工装置概略



図 4 プラズマ発生の様子

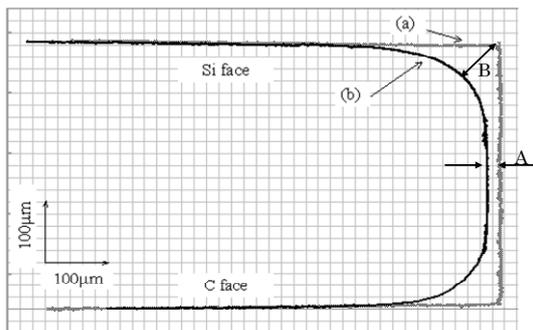


図 5 エッジ部の形状：(a)加工前、(b)加工後

(3) PCVM による SiC ウェハの裏面薄化

一般的に Si 面にデバイスが形成されることが多いため、薄化は裏面である C 面側より行うものとした。切り出した小片の厚さは当初約  $400\mu\text{m}$  であったが、これを C 面側より機械粗研磨によって約  $100\mu\text{m}$  まで薄化したものを PCVM 加工用試料とした。Si 面は機械研磨仕上げ面である。加工実験には直径  $200\text{mm}$ 、長さ  $250\text{mm}$  の円筒型回転電極を用い、回転軸と短冊試料の長辺側とが平行になるように配置することで、プラズマ中に試料全体が収まるようにした。

加工時間と試料厚さとの関係を表 1 に示す。加工速度としては  $1.5\mu\text{m}/\text{min}$  程度が得られており、40 分加工後には厚さ約  $40\mu\text{m}$  まで薄化することに成功した。機械研磨と異なり基板に対して一切機械的な力が作用しないため、原理的にはさらなる薄化も可能であると考えられる。

加工前と加工開始 10 分後、20 分後、40 分後の試料の反りを計測した結果を図 6 に示す。反りは機械研磨面である Si 面側より顕微干涉計によって計測している。図 6 より、加工前は Si 面から見て凹状に反っており、最も深い部分で  $45\mu\text{m}$  程度の大きな反りが存在していることが分かる。これは、機械粗研磨によって導入された加工変質層が裏面の C 面に存在しており、加工変質層の圧縮歪のために曲げモーメントが発生したためと考えられる。この反りは加工開始 10 分後(加工量  $22\mu\text{m}$ )の測定結果では約  $5\mu\text{m}$  まで緩和されており、圧縮歪を有する加工変質層の大部分が PCVM によって除去されたと考えられる。加工開始 20 分後(加工量  $34\mu\text{m}$ )、40 分後(加工量  $60\mu\text{m}$ )においては、凹状の反りは解消した。

次に、薄化前後の表面粗さを評価した。加工前および加工後の表面粗さを顕微干涉計によって計測した結果を図 7(a)、図 7(b)にそれぞれ示す。加工前試料の表面は機械粗研磨面であるため、PV で  $1\mu\text{m}$  以上、RMS で  $80\text{nm}$  と粗い面であったが、PCVM によって約  $40\mu\text{m}$  まで薄化(除去量約  $60\mu\text{m}$ )した表面では PV で約  $3\text{nm}$ 、RMS で約  $0.3\text{nm}$  と、薄化と同時に粗さの除去が実現されていることが確認された。

本成果も、硬脆材料である SiC ウェハを反りや割れ・欠けが生じることなく高能率に裏面薄化する方法として、国内学会・国際会議等において注目された。今後は小片ではなくウェハ全面における薄化に関して、さらに検討を進めていきたい。

表 1 加工時間と加工量

	A	B	C	D
加工時間 (min)	0	10	20	40
加工量 ( $\mu\text{m}$ )	0	22	34	60
加工後厚さ ( $\mu\text{m}$ )	100	78	66	40

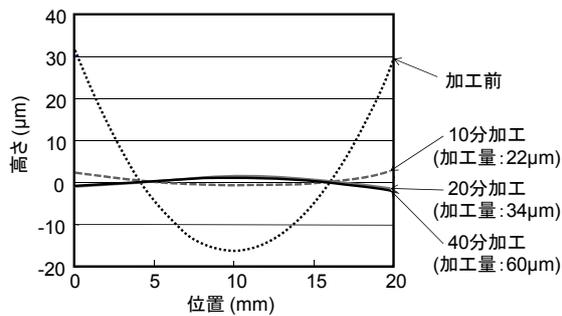


図6 薄化加工による試料の反りの変化

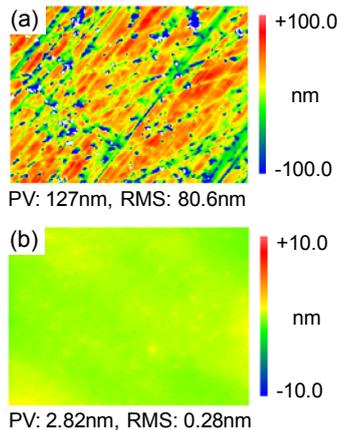


図7 薄化加工前後の表面粗さ：(a)薄化前、(b)薄化後

## 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4件)

- ① Y. Sano, M. Watanabe, T. Kato, K. Yamamura, H. Mimura and K. Yamauchi, "Temperature Dependence of Plasma Chemical Vaporization Machining of Silicon and Silicon Carbide", Materials Science Forum, 査読有, Vols. 600-603 (2009) pp 847-850.
- ② T. Kato, Y. Sano, H. Hara, H. Mimura, K. Yamamura and K. Yamauchi, "Beveling of Silicon Carbide Wafer by Plasma Chemical Vaporization Machining", Materials Science Forum, 査読有, Vols. 600-603 (2009) pp 843-846.
- ③ Y. Sano, M. Watanabe, K. Yamamura, K. Yamauchi, T. Ishida, K. Arima, A. Kubota, and Y. Mori, "Polishing Characteristics of 4H-SiC Si-Face and C-Face by Plasma Chemical Vaporization Machining", Materials Science Forum, 査読有, Vols. 556-557 (2007) pp757-760.
- ④ Y. Sano, M. Watanabe, K. Yamamura, K. Yamauchi, T. Ishida, K. Arima, A. Kubota and Y. Mori, "Polishing characteristics of silicon carbide by plasma chemical vaporization

machining", Japanese Journal of Applied Physics, 査読有, Vol. 45 (2006) pp 8277-8280.

[学会発表] (計13件)

- ① 加藤武寛, 佐野泰久, 会田浩平, 堀勉, 山村和也, 三村秀和, 松山智至, 勝山義昭, 山内和人, "Plasma Chemical Vaporization Machiningを用いたSiC基板の薄化", 応用物理学会 SiC 及び関連ワイドギャップ半導体研究会 第17回講演会予稿集, 64 (2008/12/8, 大田区).
- ② 会田浩平, 佐野泰久, 加藤武寛, 山村和也, 三村秀和, 松山智至, 山内和人, "PCVM(Plasma Chemical Vaporization Machining)を用いたSiC基板の切断加工の検討", 応用物理学会 SiC 及び関連ワイドギャップ半導体研究会 第17回講演会予稿集, 66 (2008/12/8, 大田区).
- ③ 白沢佑樹, 佐野泰久, 岡本武志, 山内和人, "SBDのI-V測定によるSiC加工表面の結晶性評価", SiC 及び関連ワイドギャップ半導体研究会 第17回講演会 予稿集, 138 (2008/12/8, 大田区).
- ④ 加藤武寛, 佐野泰久, 会田浩平, 山村和也, 三村秀和, 松山智至, 山内和人, "PCVM(Plasma Chemical Vaporization Machining)を用いたSiC基板の切断加工の検討", 2008年秋季第69回応用物理学会学術講演会, 351(2008/9/2, 春日井市).
- ⑤ Y. Sano, K. Yamamura, K. Yamauchi and Y. Mori, "Crystal machining using atmospheric pressure plasma", 4th International Workshop on Crystal Growth Technology, (2008/5/20, Beatenberg, Switzerland) (招待講演).
- ⑥ T. Kato, Y. Sano, T. Hori, K. Yamamura, H. Mimura, Y. Katsuyama, and K. Yamauchi, "Thinning of SiC wafers by Plasma Chemical Vaporization Machining", The 4th Asian Conference on Crystal Growth and Crystal Technology, 189 (2008/5/24, 仙台).
- ⑦ 加藤武寛, 佐野泰久, 堀勉, 原英之, 山村和也, 三村秀和, 勝山義昭, 山内和人, "PCVM(Plasma Chemical Vaporization Machining)を用いたSiC基板の薄化", 2008年春季 第55回応用物理学関係連合講演会予稿集, 435(2008/3/28, 船橋市).
- ⑧ 加藤武寛, 佐野泰久, 堀勉, 原英之, 山村和也, 三村秀和, 勝山義昭, 山内和人, "PCVM(Plasma Chemical Vaporization Machining)を用いたSiCウエハの薄化", 応用物理学会 SiC 及び関連ワイドギャップ半導体研究会 第16回講演会予稿集, 29-30 (2007/11/29, 名古屋市).
- ⑨ Y. Sano, M. Watanabe, T. Kato, K. Yamamura, H. Mimura, and K. Yamauchi, "Temperature Dependence of Plasma Chemical

Vaporization Machining of Silicon and Silicon Carbide”, International Conference on Silicon Carbide and Related Materials 2007, Mo-P-55 (2007/10/15, 大津市).

- ⑩ T. Kato, Y. Sano, H. Hara, H. Mimura, K. Yamamura and K. Yamauchi, “Beveling of Silicon Carbide Wafer by Plasma Chemical Vaporization Machining”, International Conference Silicon Carbide and Related Materials 2007 (ICSCRM2007), We-98, (2007/10/17, 大津市).
- ⑪ 加藤武寛, 佐野泰久, 原 英之, 三村秀和, 山村和也, 山内和人, “PCVM(Plasma Chemical Vaporization Machining)を用いた SiC ウエハのベベル加工”, 第 68 回応用物理学学会学術講演会講演予稿集, 411, (2007/9/4, 札幌市).
- ⑫ 加藤武寛, 佐野泰久, 三村秀和, 原英之, 山内和人, “PCVM (Plasma Chemical Vaporization Machining) を用いた SiC ウエハのベベル加工の検討”, 精密工学会 2007 年度関西地方定期学術講演会講演論文集, 21-22 (2007/8/9, 大東市).
- ⑬ Y. Sano, M. Watanabe, K. Yamamura, K. Yamauchi, T. Ishida, K. Arima, A. Kubota and Y. Mori, “Polishing characteristics of 4H-SiC Si-face and C-face by plasma chemical vaporization machining”, The 6th European Conference on Silicon Carbide and Related Materials (ECSCRM 2006), 34, (2006/9/6, Newcastle upon Tyne, UK)

[図書] (計 1 件)

- ① Y. Sano, K. Yamamura, H. Mimura, K. Yamauchi, and Y. Mori, Wiley-VCH, Crystal Growth Technology (Chapter 19: Plasma Chemical Vaporization Machining and Elastic Emission Machining), 2008, pp475-495.

[産業財産権]

○出願状況 (計 1 件)

名称: 半導体ウエハ外周部の加工方法及びその装置

発明者:

佐野泰久, 山村和也, 原英之, 加藤武寛

権利者: 大阪大学

種類: 特許

番号: 特開 2009-43969

出願年月日: 2007 年 8 月

国内外の別: 国内

○取得状況 (計 0 件)

[その他]

特になし

6. 研究組織

(1)研究代表者

佐野 泰久 (SANO YASUHISA)

大阪大学・大学院工学研究科・准教授

研究者番号: 40252598

(2)研究分担者

(3)連携研究者