

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 9 日現在

機関番号：14401

研究種目：基盤研究(A)

研究期間：2009～2013

課題番号：21246027

研究課題名(和文)省エネルギーパワーデバイス用SiC基板の高効率加工方法

研究課題名(英文)High efficiency chemical thinning and dicing process for SiC semiconductor substrate

研究代表者

佐野 泰久 (Sano, Yasuhisa)

大阪大学・工学(系)研究科(研究院)・准教授

研究者番号：40252598

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 33,300,000円、(間接経費) 9,990,000円

研究成果の概要(和文)：省エネルギーパワーデバイス用炭化ケイ素(SiC)基板は硬くて脆いため、従来の加工法では高効率な加工が困難である。大気圧プラズマを用いた高効率化学エッチングであるPCVM (Plasma Chemical Vaporization Machining)によるSiC加工用実験装置を製作し、SiC基板の薄化とダイシングの基礎検討を行った。その結果、2インチ基板を用いた薄化の基礎検討において、加工速度0.5 $\mu\text{m}/\text{min}$ という高加工速度が得られ、小片基板を用いたダイシングの基礎検討の結果、200 μm 以下の溝幅で10 $\mu\text{m}/\text{min}$ 以上の切断速度が得られることが分かった。

研究成果の概要(英文)：Silicon carbide (SiC) is a promising semiconductor material for energy-saving power devices. However, because of its high hardness and brittleness, few conventional machining methods can handle this material efficiently. A plasma chemical vaporization machining (PCVM) technique, which is plasma etching using atmospheric-pressure plasma, has been considered for thinning and dicing process of SiC substrates by using the newly-developed PCVM apparatus. As a result of thinning experiments, a maximum removal rate of 500 nm/min was obtained over the entire 2-inch 4H-SiC (0001) wafer. And as a result of basic cutting experiments, a maximum removal rate of more than 0.01 mm/min with a groove width of less than 0.2 mm was successfully achieved.

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：特殊加工 炭化ケイ素 薄化 ダイシング 大気圧プラズマ PCVM

1. 研究開始当初の背景

半導体材料としてのSiCは、シリコンに比べて、バンドギャップが約3倍であり、絶縁破壊電界強度が約10倍、熱伝導率が約3倍、飽和電子速度が約2倍、といった優れた物性値を有しており、理論上、パワートランジスタのオン抵抗を二桁～三桁低減可能である。このような省エネルギーSiCパワーデバイスの実用化のため、結晶成長、結晶加工、結晶欠陥評価法、MOS界面形成法、等、多方面から数多くの研究が行われ、近年はSiCパワートランジスタや周辺回路も含めたSiCパワーモジュールが試作されるに至っている。しかしながら、SiCはダイヤモンドに次ぐ硬度を有する脆性材料であり、シリコンデバイスを生産するための機械的加工法をそのまま流用していたのでは十分な加工能率や加工精度が得られず、実用化・普及に向けた課題の一つとなっている。

2. 研究の目的

本研究課題では、SiCデバイス製造プロセスにおける、デバイス形成後の「薄化」および薄化後の「ダイシング」に関して、化学的加工法による高能率加工の実現を目指し、実用化に向けた基礎的検討を行うことを目的とする。

低損失SiCパワーデバイスにおいては直列抵抗成分低減のためデバイス形成後に裏面から薄化を行うが、この工程に研削等の機械加工を用いた場合、単に加工速度が遅いばかりではなく、原理上ウエハにもたらされる加工歪によって、ウエハが湾曲したり最悪薄化中に割れてしまったりすることが問題となっている。また、ダイシングの工程においても、薄化後のウエハは50～100mmと極めて薄くなるため、従来技術であるダイヤモンドブレード等による研削によって切断することはウエハの割れや欠けを誘発し、歩留まり低下が懸念される。これらのことは外力を加えて加工を行う機械加工に起因するものであり、何ら外力を加えることのない化学的な加工法を適用することでこれらのリスクを回避することが可能になると考えている。

3. 研究の方法

上記化学的な加工法として、大気圧プラズマを用いたプラズマエッチング技術である、PCVM (Plasma Chemical Vaporization Machining)を用いる。低圧力下で行われる通常のプラズマエッチングに対して、大気圧下でプラズマを発生させることで、極めて高密度な反応種を生成可能となり、機械加工に匹敵する高能率な化学エッチングが可能になる。また、ガス分子の平均自由行程が小さいことから、プラズマ中のイオンのエネルギーが小さく、基板表面に与えるダメージが極めて小さい。さらに、プラズマは電界強度の大きい場所のみ局在して発生するため、加工したい部分のみを除去加工できる。

薄化に関して、これまでの研究において、PCVMによるSiCの加工速度は基板温度依存性が高く、約400における加工速度が室温の約10倍になることが分かっている。そこで、SiCウエハ薄化加工のためにウエハ昇温機構付試料台を有するPCVM装置を設計・製作した。図1に装置内部の概念図を示す。試料台には昇温機構の他、加工によってウエハが薄くなっても安定なプラズマを発生できるよう、昇降機構を有し、加工特性の面内均一性向上のため回転機構を有している。一軸走査機構および電極-試料間距離(加工ギャップ)調整機構を有する棒状電極によってライン状のプラズマを発生させることが可能で、ウエハ上を往復運動させることでウエハ全面の加工を行う。

ダイシングに関して、これまでは主としてワイヤー電極周りに局在化して発生させたプラズマによる切断を検討してきており、各

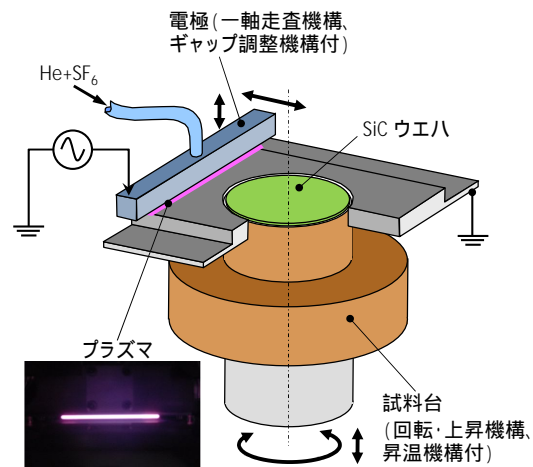


図1 SiCウエハ薄化用PCVM装置概念図

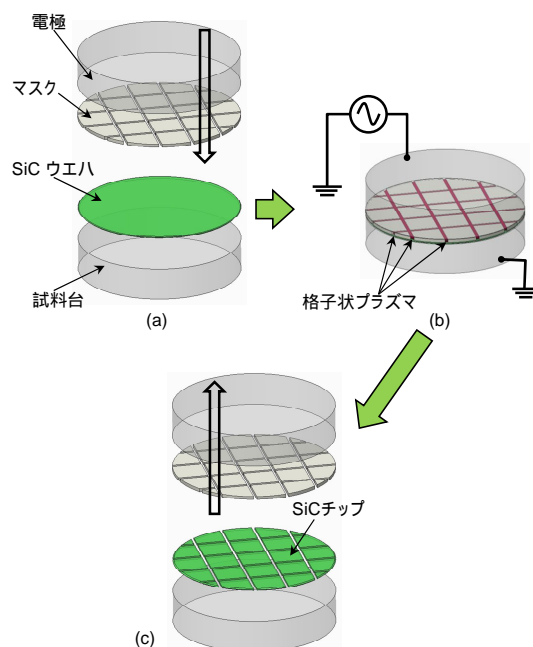


図2 プラズマ領域制限マスクを用いたPCVMダイシングの概念図

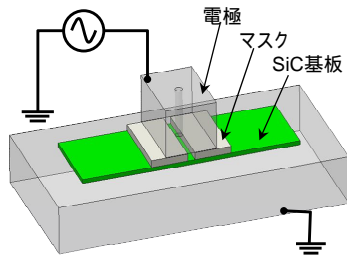


図3 SiC基板ダイシング基礎実験概念図

種加工条件の最適化によって、切断加工速度約 $2 \mu\text{m}/\text{min}$ を達成してきた。しかしながら、ワイヤー電極による PCVM においては、加工速度を増大させるため RF 電力を増大するとプラズマ発生領域が拡張し、切断加工溝幅が増大するという原理的な問題を有していた。そこで、プラズマが発生可能な領域を物理的に制限することで、高加工速度かつ狭加工溝幅を実現することを目指し、図2のような新たな PCVM ダイシング法を考案した。タイル状に配置されたマスクのために電力を増大してもプラズマはマスク間に形成された格子状の空間にしか発生することが出来ず、高効率な一括ダイシングが可能になると考えられる。このような方法の実現可能性を探るため、図3に示すアレイによって基礎検討を行った。

4. 研究成果

薄化に関し、試料として 2 インチの 4H-SiC(0001) 基板の裏面を用いて加工実験を行った。反応ガスとしてヘリウムで希釈した所定の濃度の SF_6 を使い、基板温度や RF 電力をパラメータとして加工速度を評価した。加工速度は加工前後の質量減損から算出した。加工速度を評価した実験結果を表1に示す。基板温度、 SF_6 濃度、RF 電力の増大とともに加工速度は増大し、最大で約 $0.5 \mu\text{m}/\text{min}$ を得ることに成功した。本加工法は化学的な加工法であり、加工後表面に加工変質層を残さず、よって基板の反り等も生じない。加工変質層を残さない加工法としてはこの加工速度は極めて高速である。原理的には SF_6 濃度や RF 電力をさらに増大することは可能であり、今後、さらに数倍程度の加工速度も期待できる。次に、試料として機械加工によって裏面を厚さ約 $100 \mu\text{m}$ まで薄化した 2 インチ 4H-SiC ウエハを用い、基板温度 400 、 SF_6 濃度 1% 、投入電力 800 W にて約 140 分間加工を行った。試料台は、電極が試料を通過する毎に 15 度回転させ、加工特性の面内均一化を図った。薄化実験前後のウエハの厚さ分布を図4に示す。円周方向に特に加工量の分布は見られず、試料を回転することによる平均化効果の有効性が示された。外周部付近にリング状の加工ムラが観察されるが、これはウエハを固定するための真空チャック用の溝と形状が一致していることが分かっており、真空チャック方法の最適化によって、解消可能と考えている。

表1 2インチ SiC ウエハ薄化加工速度

基板温度 ($^{\circ}\text{C}$)	SF_6 濃度 (%)	RF電力 (W)	ガス流量 (sccm)	加工速度 ($\mu\text{m}/\text{min}$)
100	1	1000	70	0.08
200	1	1000	70	0.13
300	1	1000	70	0.18
400	1	1000	70	0.24
200	2	1400	250	0.31
300	2	1400	250	0.43
400	2	1400	250	0.54

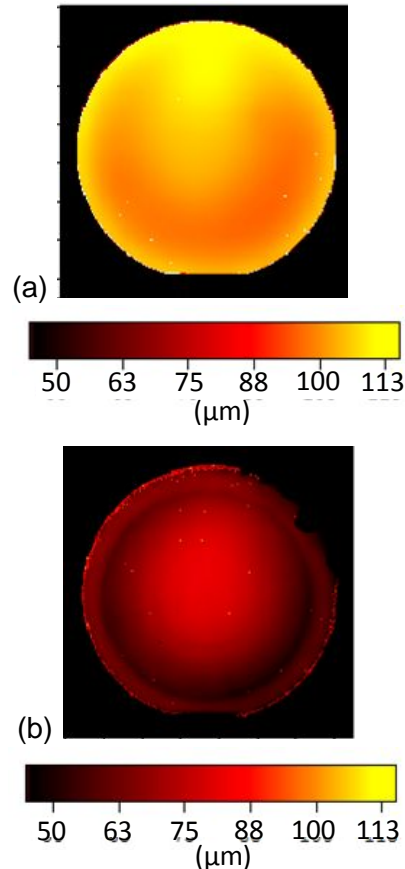


図4 2インチ SiC ウエハ薄化実験における (a) 加工前、(b) 加工後の厚さ分布

ダイシングに関し、小片 4H-SiC 基板を用いて切断加工の基礎実験を行った。加工用ガスとしてヘリウム希釈の $1\% \text{ SF}_6$ 、厚さ $100 \mu\text{m}$ のマスクをマスク間距離 $165 \mu\text{m}$ として配置し、加工実験を行った例を図5に示す。図のように約 $10 \mu\text{m}/\text{min}$ の加工速度が得られており、ワイヤー電極を用いた限界値を大幅に超える高速加工を実現した。またこの際、幅方向のエッチング速度は約 $3 \mu\text{m}/\text{min}$ であった。PCVM においては平均自由行程の小ささから等方的な加工が行われるが、深さ方向の加工速度に比べて半分以下の値となった。これは、加工とともにマスク下に回り込んで発生するようになったプラズマの強度が弱いことに起因すると考えており、切断加工に適した加工特性が得られたと考えている。また、マ

スク幅を小さくすることで加工幅を小さくすることを試みた結果を図6に示す。図6(a)はマスク幅を60 μm に、同(b)は30 μm に設定して加工を行った結果である。マスク幅を100 μm 以下に狭小化してゆくと定性的にプラズマの発生・維持が難しくなり、加工速度は低下したものの、加工溝幅として最も狭い約25 μm が得られた。本方法においては、プラズマ発生部はマスクと試料、電極間に囲まれた微小空間であるため、初期に存在する空気を真空置換する必要が無いことも大きな特徴であり、今後の発展が期待される。

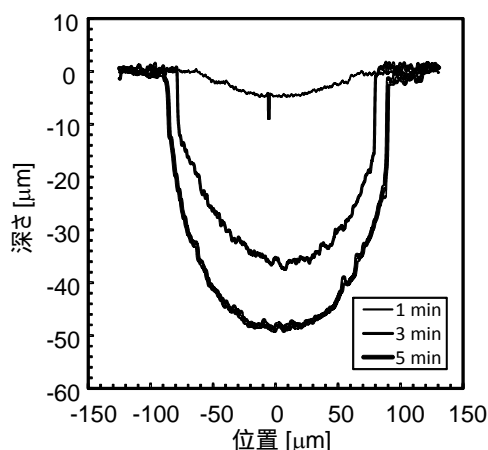
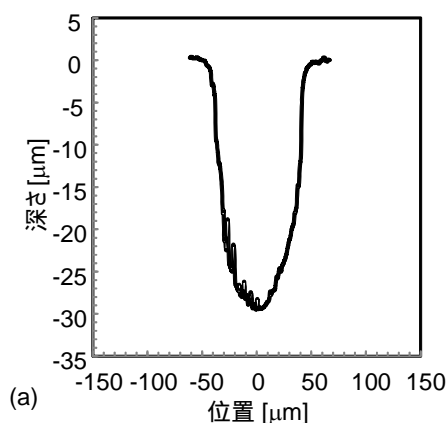
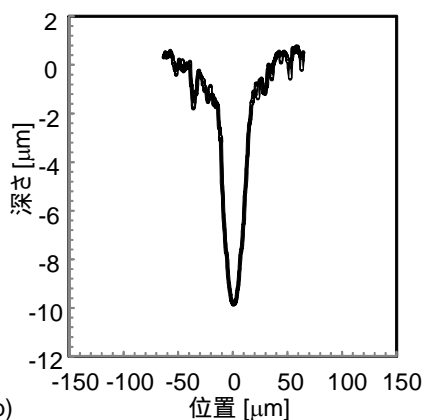


図5 マスク幅 100 μm における加工溝断面



(a)



(b)

図6 マスク幅(a)60 μm 、(b)30 μm における加工溝断面

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8件)

Yasuhisa Sano, Hiroaki Nishikawa, Yu Okada, Kazuya Yamamura, Satoshi Matsuyama and Kazuto Yamauchi, Dicing of SiC wafer by atmospheric-pressure plasma etching process with slit mask for plasma confinement, Materials Science Forum, 査読有, Vol. 778-780, 2014, pp. 759-762, doi:10.4028/www.scientific.net/MSF.778-780.759

Yu Okada, Hiroaki Nishikawa, Yasuhisa Sano, Kazuya Yamamura and Kazuto Yamauchi, Thinning of a two-inch silicon carbide wafer by plasma chemical vaporization machining using a slit electrode, Materials Science Forum, 査読有, Vol. 778-780, 2014, pp. 750-753, doi:10.4028/www.scientific.net/MSF.778-780.750

Yasuhisa Sano, Hiroaki Nishikawa, Kohei Aida, Chaiyapat Tangpatjaroen, Kazuya Yamamura, Satoshi Matsuyama and Kazuto Yamauchi, Basic experiment on atmospheric-pressure plasma etching with slit aperture for high-efficiency dicing of SiC wafer, Materials Science Forum, 査読有, Vol. 740-742, 2013, pp. 813-816, doi:10.4028/www.scientific.net/MSF.740-742.813

Yasuhisa Sano, Kohei Aida, Hiroaki Nishikawa, Kazuya Yamamura, Satoshi Matsuyama, and Kazuto Yamauchi, Plasma Chemical Vaporization Machining of Silicon Carbide Wafer Using Flat-bar Electrode with Multiple Gas Nozzles, Advanced Materials Research, 査読有, Vol. 497, 2012, pp. 160-164, doi:10.4028/www.scientific.net/AMR.497.160

Yasuhisa Sano, Kohei Aida, Takehiro Kato, Kazuya Yamamura, Hidekazu Mimura, Satoshi Matsuyama and Kazuto Yamauchi, Cutting of SiC Wafer by Atmospheric-Pressure Plasma Etching with Wire Electrode, Materials Science Forum, 査読有, Vol. 717-720, 2012, pp. 865-868, doi:10.4028/www.scientific.net/MSF.717-720.865

Yasuhisa Sano, Kohei Aida, Hiroaki Nishikawa, Kazuya Yamamura, Satoshi Matsuyama, and Kazuto Yamauchi, Back-side Thinning of Silicon Carbide

Wafer by Plasma Etching using Atmospheric-pressure Plasma, Key Engineering Materials, 査読有, Vol. 516, 2012, pp. 108-112, doi:10.4028/www.scientific.net/KEM.516.108

[学会発表](計 27 件)

Y. Okada, Thinning of a Two-Inch SiC Wafer by Plasma Chemical Vaporization Machining Using a Slit Electrode, International Conference on Silicon Carbide and Related Materials 2013 (ICSCRM2013), 2013/9/29-10/4, Seagaia Convention Center (宮崎市)

Y. Sano, Dicing of SiC Wafer by Atmospheric-Pressure Plasma Etching Process with Slit Mask for Plasma Confinement, International Conference on Silicon Carbide and Related Materials 2013 (ICSCRM2013), 2013/9/29-10/4, Seagaia Convention Center (宮崎市)

岡田悠, PCVM による 2 インチ SiC 基板の全面加工, 2013 年度精密工学会春季大会学術講演会, 2013/3/13-15, 東京工業大学 (目黒区)

佐野泰久, 大気圧プラズマを用いた SiC 及び関連材料の高効率無歪加工 (招待講演) 学振「結晶加工と評価技術」第 145 委員会 第 132 回研究会, 2012 年 12 月 13 日, 明治大学 (千代田区)

西川央明, PCVM による 2 インチ SiC 基板の薄化 - スリット電極の検討 -, SiC 及び関連ワイドギャップ半導体研究会 第 21 回講演会, 2012/11/19-20, 大阪市中央公会堂 (大阪市)

Y. Sano, Basic experiment on atmospheric-pressure plasma etching with slit aperture for high-efficiency dicing of SiC wafer, 9th European Conference on Silicon Carbide & Related Materials (ECSCRM2012), 2012/9/2-6, Saint-Petersburg (Russia)

西川央明, PCVM を用いた 2 インチ SiC 基板の全面加工, 2012 年春季 第 59 回 応用物理学関係連合講演会, 2012 年 3 月 17 日, 早稲田大学

西川央明, プラズマ発生領域制限マスクを用いた PCVM による SiC 基板のダイシングの検討, SiC 及び関連ワイドギャップ半導体研究会 第 20 回講演会, 2011 年 12 月 8 日, 愛知県産業労働センター

Yasuhisa Sano, Plasma Chemical Vaporization Machining of Silicon Carbide Wafer Using Flat-bar Electrode with Multiple Gas Nozzles (招待講演) The 8th CHINA-JAPAN Conference on Ultra-Precision Machining, 2011 年 11

月 21 日, Hangzhou, China

Y. Sano, Back-Side Thinning of Silicon Carbide Wafer by Plasma Etching using Atmospheric-Pressure Plasma, 4th International Conference of Asian Society for Precision Engineering and Nanotechnology, 2011 年 11 月 17 日, Hong Kong, China

H. Nishikawa, Cutting of SiC substrates by atmospheric-pressure plasma etching with slit mask for plasma confinement, The 33rd International Symposium on Dry Process, 2011 年 11 月 10 日, Kyoto Garden Palace

西川央明, PCVM による 2 インチ SiC 基板の全面加工, 2011 年度精密工学会秋季大会学術講演会, 2011 年 9 月 22 日, 金沢大学

Yasuhisa Sano, Cutting of SiC Wafer by Atmospheric-Pressure Plasma Etching with Wire Electrode, International Conference on Silicon Carbide and Related Materials 2011, 2011 年 9 月 14 日, Cleveland, USA

Yasuhisa Sano, Development of Chemical Processing Methods for Silicon Carbide Wafering and Device Processing, Third International Symposium on Atomically Controlled Fabrication Technology, 2010/11/24, Osaka

会田浩平, PCVM による 2 インチ SiC 基板の全面加工, 2010 年度精密工学会秋季大会学術講演会, 2010/10/28, 名古屋

西川央明, PCVM を用いた SiC 基板の切断加工の検討 シャドウマスクを用いた切断加工の基礎検討, SiC 及び関連ワイドギャップ半導体研究会 第 19 回講演会, 2010/10/21, つくば市

会田浩平, PCVM を用いた 2 インチ SiC 基板の薄化, SiC 及び関連ワイドギャップ半導体研究会 第 19 回講演会, 2010/10/21, つくば市

Yasuhisa Sano, Dicing of SiC wafer by atmospheric-pressure plasma etching process with wire electrode, The 16th International Conference on Crystal Growth, 2010/8/10, Beijing, China

Yasuhisa Sano, Thinning of SiC wafer by plasma chemical vaporization machining, International Conference on Silicon Carbide and Related Materials 2009, 2009/10/14, Nurnberg, Germany

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