SiC 材料の表面加工と電気的作用

江龍 修・田中 弥生

名古屋工業大学 大学院機能工学専攻 ☎ 466-8555 愛知県名古屋市昭和区御器所町

(2013 年 10 月 15 日受付; 2013 年 11 月 28 日掲載決定)

Surface Processing of SiC and Relations with the Electrical Properties

Osamu ERYU and Yayoi TANAKA

Nagoya Institute of Technology, Gokiso-cho, Showa-ku, Nagoya, Aichi 466-8555

(Received October 15, 2013 ; Accepted November 28, 2013)

We made an off-axis surface of SiC with the chemical-mechanical polishing (CMP) method to examine the influence of an atomic step on the electronic properties. It became clear that processing pressure had the threshold in the electric field that let the removal of the atom accelerate using the abrasive of the piezoelectric particles. The electric charge distribution of the SiC surface affects the removal rate of SiC. The conductive atomic force microscopy (CAFM) method is effective technique to examine processing mechanism of the materials surface.

KEYWORDS : SiC, dielectric abrasive, conductive atomic force microscopy

1. は じ め に

炭化ケイ素半導体 (SiC) は主に周波数変換やスイッチングなど, パワーデバイスと呼ばれる分野で, その利用が期待されている。パワーデバイスで求められる一つの要素は, ロスなく電力を操作することである。この操作時の省エネルギー化は, 特に, 大電力制御において効果が大きい¹⁾。小さな電力を制御して, 大きな省エネ効果を生むケースにおいては, 今後も主力材料は量産効果が高いシリコン半導体 (Si) である。さらに, 高速・高周波領域においては, 急速に量産化技術が進化してきている, 窒化ガリウム半導体 (GaN) が主役となりつつある^{2,3)}。一方, 新幹線や大型土木用機械, 大型のマシニングセンタなど, 我が国が得意な分野におけるパワートレイン制御において, 精密制御やトルクの向上が求められる部分において, SiC は主力材料になる潜在力を持つ。それは単一素子で大電力を制御可能なためである⁴⁾。さらには大きな電力制御が, 可聴周波数を越えたトランジスタ動作が可能となるため⁵⁾, ハイブリッド車や電気自動車の走行時にデバイスノイズが聞こえなくな

る快適性が得られる。一方で, 1.2 kV, 1 kA でのスイッチング時が求められるなど, 電磁妨害 (EMI: Electro Magnetic Interference) が予想されるため, 対応する周辺回路素子の開発や電磁波シールド技術が新たに求められるようになってきている。これはまた, SiC デバイスが市場に出回り始めたことも意味する。このように大電力動作が SiC のデバイス材料として求められることから, 成長インゴットから基板化する際に生じる結晶欠陥は致命的となる。理想的には Si と同様に, 研磨欠陥を化学薬品によってエッチングして取りのぞくことであるが, SiC は耐酸・アルカリ性がきわめて高く, 加工欠陥をエッチングにて取り除くことは困難である。優れた事例として白金の触媒作用を活用し, フッ化水素を反応剤として加工欠陥を除去する手法が報告されており, 発展が期待される^{6,7)}。ここでは, SiC などのイオン結合性を有する多元素系材料の, デバイス化に向けた加工技術開発における着眼点を述べる。加工時に SiC に掛かる圧力が SiC 内部に電解を発生させ, それが加工に影響を与えている結果を示す。さらに, 平坦化加工によって得られた, 多元素系材料の表面電子特性について述べる。原子ステップが得られる程度に加工したステップエッジに表出する原子の電子的特性が, 表面のマクロな電気的特性

に影響を与える結果を示す。

2. 研磨加工における圧力効果

2.1 加工条件

本節で用いた基板は、市販されている 4H-n 型 SiC で、キャリア濃度は室温でのドナー濃度とアクセプタ濃度の差は $N_D - N_A \cong 7 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ である。ここでは可能な限り (0001) 面に近い C 面を用いている。(0001) 面からのオフ角度は 0.05 度以内であることを、AFM により確認している。ここでは、研磨加工時の圧力効果を評価するために、圧電体材料を研磨砥粒とした。SiC の研磨加工プロセスは、未だスタンダードな加工法は確立されておらず、研磨に用いる砥粒と SiC との反応状態を調べることで、デバイス基板として用いる際に最適化された表面が得られると考える。そのため、多く形状形成過程に用いられるダイヤモンド砥粒ではなく、加工加重と研磨量との関係を推測するために圧電体材料を用いた。用いた圧電体材料と物性定数、および諸条件を Table 1 に示す。圧電定数と比誘電率との比 d/ϵ は、歪と、それに伴い生じる電界との関係を示すものであり、数値が大きいほど、歪に対する電界強度が大きくなる。この値と、加工量との関連を調べることで、材料加工における表面の電気的作用について検討する。

2.2 加工能率圧力依存性

Fig. 1 に研磨砥粒として BaTiO₃ を用いた場合の、SiC の C 面における加工圧力と加工能率との関係を示す。加工圧力が約 850 g/cm² までは、75 nm/h の加工能率が得られている。一方で 850 g/cm² を超える圧力を加えると、加工能率が急激に増加していることがわかる。これは、圧電材料が発生させる SiC 表面に及ぼす電界強度と SiC 表面からの原子の脱離とに閾値が存在していることを示していると考ええる。

次に Fig. 2 に、3 種類の砥粒を用い、BaTiO₃ を用いた場合に加工能率が一定と考えられる圧力領域と、加工能率が増加した圧力領域での比較を行った結果を示す。図の棒グラフに用いた砥粒を示す。Fig. 2 より、Table 1 に示した d/ϵ の値が大きい砥粒において、加工能率が高くなっていることがわかる。SiC 表面への酸素イオンの供

給が加工能率と関係していることが知られており³⁾、表面に吸着している酸素イオンに及ぼす圧電材料が発生する電界との相互作用によって加工が進行すると考える。本結果は、イオン結合性を有する材料の研磨加工において、表面に与える電気的作用が加工能率に影響を与えることを示していると考ええる。今後、共有結合性結晶において圧電体による研磨加工を実施し、本研究の検証を行っていく。

Fig. 1. Relations with polishing pressure and removal rate with BaTiO₃ abrasive.

Fig. 2. Relations with abrasives and removal rate.

Table 1. Abrasives and physical constant.

Abrasives	Dielectric constant ϵ	Piezoelectric constant d	d/ϵ	Mean diameter (μm)
BaTiO ₃	2000	200	0.1	0.66
SrTiO ₃	200	100	0.5	0.57
MgTiO ₃	15	250	16.7	0.95

3. 加工表面の電子的観察

3.1 評価手法

前節において、砥粒が発生する圧電作用と加工能率との関係について議論した。本節では加工によって得られる SiC 表面の原子ステップの電気的特性を導電性 AFM (Conductive Atomic Force Microscopy : CAFM) により調べた結果を述べる。Fig. 3 に SiC 表面のテラス幅と CAFM 探針径との関係を示す。オン面加工表面においては、ステップ間のテラス幅は、AFM 観察によって大略 250 nm であることがわかっている⁸⁾。一方、3.5 度のオフセットを取って研磨加工した場合には、テラス幅は大略 4 nm となると見積もることができる。Si 原子と C 原子の電気陰性度を比較した場合、C 原子が大きく、したがって、SiC のイオン結合性において、負性の電荷分布は C 原子に偏ることになる。これにより、SiC の Si 面を加工した場合、原子ステップエッジには C 原子が露出することになる。CAFM において用いたダイヤモンド探針は、SiC の Si 面に対しては電子的なバリア性を示し、一方で C 面においては、そのバリアが低い⁹⁾。したがって、表面の原子ステップ密度と表面の負性電荷分布との関係を、ダイヤモンド探針を用いた CAFM によって、直接的に観測できると考えた。

3.2 CAFM 測定結果

Fig. 4 に電界の方向を、SiC 基板からダイヤモンド探針側にとり、SiC 基板に対するダイヤモンド探針側の負バイアスを大きくしていった際の、基板からダイヤモンド探針に流れる電流との関係を示している。基板をゼロ電位（アース電位）に取っていることから、グラフの横軸を、右から左に向かって負の側に大きくしている図としている。縦軸は探針と基板間に流れる電流の大きさを取っている。Fig. 4 によれば、基板のオフセット角度が大きい場合において、電流値が大きくなっていることがわかる。この結果は、基板表面に露出する C 原子が多い場合に、電流値が大きくなっていることを示していると考ええる。SiC 基板の研磨加工において、Si 面は C 面に比べて加工能率が低いこと、および、オフセット角度が大きくなるに従い、加工能率が高くなることがわかっている⁹⁾。本測定結果は、ステップ端に存在する C 原子が電気的な反応起点となって、加工が進行していくことを示していると考ええる。今後、オン面基板を用いて、ステップとテラスにおける電気的特性を精密にマッピングしていくことで、ステップ端の電子的な特性を明らかにしていきたい。

前節の圧電体を用いた加工結果と合わせて考えると、研磨時の加工圧力は、材料表面に存在する電荷分布を変

Fig. 3. Principles of the conductive atomic force microscopy.

Fig. 4. Current measurements between AFM probe and SiC.

化させる働きをすることも考えられ、加工圧力は研磨加工時の機械的除去力を高めるのみではなく、被加工物表面の電荷分布を変化させることに影響を与えられ考える。したがって、SiC 等の結合にイオン性を有する材料の研磨加工においては、材料表面における機械的歪による電荷の分布までを考慮し、加工圧力を検討する必要があると考える。

4. ま と め

我々は、圧電体材料を研磨砥粒として用いることで、SiC 表面に存在する電荷の分布が加工能率に影響を与えることを示した。導電性 AFM を用いることで、被加工物の表面電荷分布を測定できる可能性を示した。両手法により、加工時に表面近傍に生じる電界が、加工特性に強く作用していることを示す結果を得た。今後、電気的作用を積極的に取り入れた加工法が、イオン結合性を有する材料加工の研究に取り入れられていくことを期待する。

謝 辞

本研究は豊田工業大学 吉村雅満教授, および, 株式会社フジミインコーポレーテッド 永利一幸氏の協力を得た。ここに謝意を表する。

文 献

- 1) K. Kyuma, extended abstract : ICSCRM 2013 Mo-PL-1, ICSCRM 2013, Sept. 29-Oct. 4, 2013, Miyazaki, Japan.
- 2) D. Marcon, B. De Jaeger, S. Halder, N. Vranckx, G. Mannaert, M. Van Hove and S. Decoutere : IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing **26**, 361 (2013).
- 3) H.H. Liu, H.Y. Lin, C. Liao and J. Chyi : ECS J. Solid State Sci. Technol. **2**, N3001 (2013).
- 4) J. Biela, Member, M. Schweizer and S. Waffler : IEEE transactions on industrial electronics **58**, 2872 (2011).
- 5) 鶴田和弘 : デンソーテクニカルレビュー **16**, 90 (2011).
- 6) H. Hara, Y. Sano, H. Mimura, K. Arima, A. Kubota, K. Yagi, J. Murata and K. Yamauchi : J. Electron. Mater. **35**, L11 (2006).
- 7) H. Hara, Y. Sano, H. Mimura, K. Arima, A. Kubota, K. Yagi, J. Murata and K. Yamauchi : Mater. Sci. Forum **556-557**, 749 (2007).
- 8) K. Hotta, K. Hirose, Y. Tanaka, K. Kawata and O. Eryu : Mater. Sci. Forum **600-603**, 823 (2009).
- 9) Y. Tanaka, T. Kanda, K. Nagatoshi, M. Yoshimura and O. Eryu : Mater. Sci. Forum **717-720**, 569 (2012).