

次世代パワー半導体 (SiC) の結晶へき開型切断加工

三澤 明日香 三星ダイヤモンド工業(株) 研究開発部技術研究課

北市 充 三星ダイヤモンド工業(株) 研究開発部技術研究課 課長

1. はじめに

化合物半導体の一つである SiC は、Si の約 10 倍の絶縁破壊電界、約 3 倍のバンドギャップ、約 3 倍の熱伝導率を有する。これらの特性は、パワーデバイスの高耐圧化、低損失化、高速化、小型化に寄与するため、SiC は車載用パワーデバイス材料として注目を集めてきた。すでに、一部の車種に SiC パワーデバイスが搭載されており、今後も需要拡大が見込まれる。自動車以外にも、民生機器、情報通信機器、鉄道車両、太陽光・風力発電、各種産業機器への SiC パワーデバイスの採用がより一層広がるものと期待されている¹⁾。

従来の Si パワーデバイス製造において、ウェハからチップへ切り出す手法として、砥石製のブレードを用いたダイシングが広く採用されてきた。しかしながら、SiC は Si よりも高硬度であるため、従来手法で SiC ウェハを切断する場合は加工速度を遅くせざるを得ず、現実的な加工速度は 3 mm/s 程度となる。また、加工負荷が大きく、ブレードの目つぶれや破損、ウェハのチッピングやクラック発生が課題であった。そこで、SiC ウェハの切断に対応するために、ブレードに超音波振動を付与する、超音波援用ダイシングが開発された^{2,3)}。超音波援用ダイシングにより、チッピングやクラックの発生を抑制しつつ、従来手法の数倍の加工速度で SiC ウェハを切断できるようになった。しかしながら、SiC パワーデバイスの需要は絶えず拡大しており、加工速度の高速化や歩留まり向上への要求が高まっている。そのため、SiC ウェハの新規切断手法として、ステルスダイシング

⁴⁾、プラズマエッチング⁵⁾、ウォータガイドレーザによるダイシング⁶⁾などが提案・研究されている。

一方で、三星ダイヤモンド工業は長年にわたり、主に液晶パネル用の板ガラスを切断するための装置、工具、加工プロセスを提供してきた。その切断手法の概要を図 1 に示す。まず、外縁を刃先形状に加工された硬いホイール (スクライビングホイール) を板ガラス表面に押し付けて転動させる (スクライブ)。このスクライブ工程において、板ガラス表面には浅い溝 (スクライブライン) が形成し、スクライブラインの直下には板ガラス表面に対して垂直なき裂 (垂直クラック) が形成する。次に、板ガラスに曲げ変形を与え、垂直クラックを板厚方向に進展させる (ブレイク)。これら 2 つの工程から成る切断手法を、スクライブ & ブレイク (SnB) 法と称している。SnB 法におけるスクライブ速度は 100 mm/s 以上と比較的速く、切断に必要なスクライブのパス数は板厚によらず 1 パスのみである。SnB 法で切断可能な板ガラスの板厚範囲は、約 0.1 mm から約 20 mm と非常に広い。また、冷却水等を使用しないドライプロセスであるため、排水処理を必要としない。さらに、SnB 法で切断された板ガラスにはカーフがなく、1 枚の板ガラスから切り出せる商品数を最大化できる。また、母材の塑性変形はスクライブライン周囲の限られた領域のみで起こり、切断面の大部分においては、母材の原子スケール構造に与えるダメージが小さい。

上記のとおり SnB 法は、脆性材料におけるき裂進展現象を、その切断加工に積極的に利用するものである。ここで、SiC は脆性材料であるのみならず、へき開性を

有する材料である。SiC 中において、き裂を特定のへき開面に沿って進展させることが比較的容易である点に着目し、SnB 法を SiC ウェハの切断に応用した。本報では、SnB 法において特に独自性の高い技術であるスクライブについて、垂直クラックの形成メカニズムを簡単に紹介するとともに、SiC ウェハに対するスクライブ特性について述べる。また、SnB 法で切断された SiC ウェハにおける切断部の品質について、切断部の外観、および、切断面における結晶状態の評価結果を紹介する。

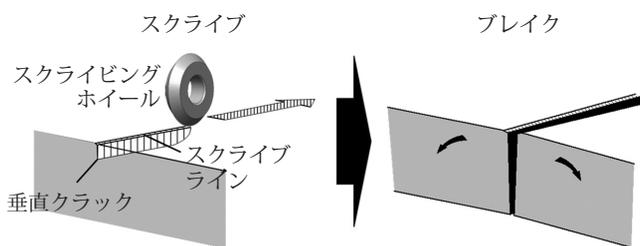


図1 スクライブ&ブレイク法の概要

2. スクライブ

2.1 垂直クラック形成メカニズム

脆性材料の表面に対してピッカース圧子などの圧子を押し込んだ際、押し込み位置の周囲には様々なき裂が形成する。圧子の押し込みによって形成するき裂のうち、材料表面に対して垂直なき裂を垂直クラック、あるいは、メディアンクラックと呼ぶ。スクライブは、切断線に沿う垂直クラックのみを選択的に形成させる手法といえる。垂直クラックの形成メカニズムを記述するもっとも基本的なモデルとして、ピッカース圧子による押し込みを対象とした Lawn-Evans-Marshall (LEM) モデルが知られている⁷⁾。図2に LEM モデルの概要を簡略化して示す。圧子を押し込まれた箇所周囲は、強い圧縮によって塑性変形をしながら外側へ膨張する。一方で、塑性変形領域の外側では、塑性変形領域の膨張に追従して引張方向の変形が起り、引張応力が誘起される。塑性変形領域の外側に誘起される上記の引張応力が、垂直クラック形成の主な駆動力となる。LEM モデルでは、垂直クラック

クを半円き裂とみなした破壊力学的解析により、垂直クラックサイズと押し込み加重や物性値との関係式が導かれている。

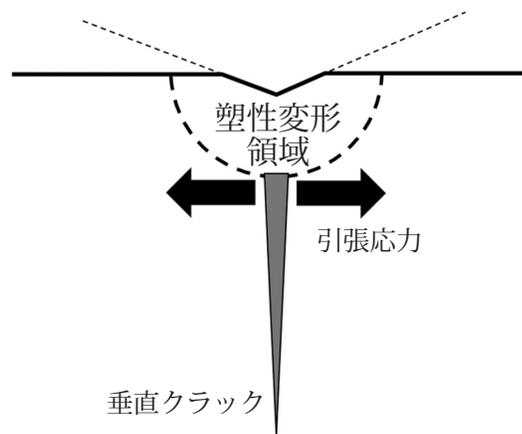


図2 脆性材料に対する圧子の押し込みによる垂直クラック形成

Tomei ら⁸⁾は、スクライビングホイールを押し込まれたガラスの内部における応力分布を明らかにするため、有限要素法による数値計算、および、光弾性法による応力分布測定を実施した。そして、スクライビングホイールの押し込み位置の直下には圧縮応力場が形成し、圧縮応力場の外側には GPa オーダーの引張応力場が形成することを示した。この応力分布の特徴は上記の LEM モデルにおける応力分布と似通っており、スクライブにおいても、LEM モデルと類似のメカニズムによって垂直クラックが形成されることが示唆された。

2.2 SiC ウェハに対するスクライブ特性

SiC には、同一の化学組成で原子の積層構造が異なる複数のポリタイプが存在するが、パワーデバイス用途で主に使用されるのは、比較的安定で、バルク移動度とバンドギャップが大きい 4H-SiC である。図3に、市販の 4H-SiC ウェハにおける代表的な結晶方位を示す。4H-SiC の (0001) 面、すなわち、Si 面をデバイス面とし、 $\langle 1\bar{1}00 \rangle$ 方向に第一オリフラ、 $\langle 11\bar{2}0 \rangle$ 方向に第二オリフラを有する。エピタキシャル成長による結晶成長特性を向上させるために、 4° のオフ角が設けられている。その

ため、第一オリフラと平行な $\{1\bar{1}00\}$ 面がウェハ表面と垂直であるのに対し、第二オリフラと平行な $\{11\bar{2}0\}$ 面はウェハ表面垂直方向に対して 4° 傾いている。4H-SiC のへき開面は、 $\{0001\}$ 面、 $\{1\bar{1}00\}$ 面、 $\{11\bar{2}0\}$ 面であり、へき開のしやすさは $\{0001\}$ 面 $>$ $\{1\bar{1}00\}$ 面 $>$ $\{11\bar{2}0\}$ 面⁹⁾ である。したがって、上記の 4H-SiC ウェハに対して第一オリフラ平行方向および第二オリフラ平行方向にスクライプを行うと、それぞれ、へき開面の $\{1\bar{1}00\}$ 面および $\{11\bar{2}0\}$ 面に沿う垂直クラックを形成させることができると期待される。以降は、上記の 4H-SiC ウェハを対象とした SnB 法に関する記述であり、4H-SiC ウェハを単に SiC ウェハと表記する。

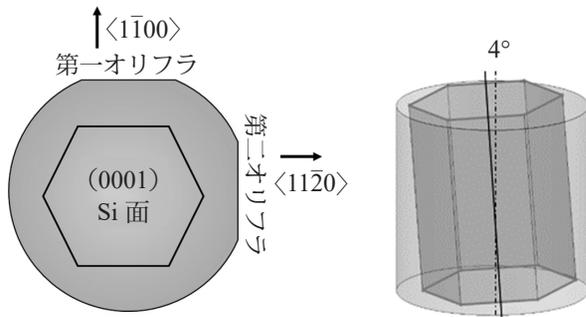


図3 市販の4H-SiC ウェハにおける代表的な結晶方位

図4¹⁰⁾に、SiC ウェハに対するスクライプによって形成するスクライプラインと垂直クラックの一例を示す。なお、図4は、スクライプ面をSi面、スクライプ方向を第一オリフラ平行方向、スクライプ速度を 100 mm/s としたものであり、スクライプ後のスクライプ面と垂直断面とを斜めからSEM観察して得られた図である。図の上半分はスクライプ面であり、スクライプラインが見られる。一方、図の下半分は垂直断面であり、スクライプラインの下部に垂直クラックが形成している。通常、SiC ウェハに対する SnB 法で形成されるスクライプラインは、深さ $1 \mu\text{m}$ 未満、幅 $5 \mu\text{m}$ 未満と、極めて微細な溝となる。また、スクライプライン近傍に形成される塑性変形領域のサイズは数 μm 程度であることが分かっている。一方で、1パスのスクライプでSiC ウェハに形成できる垂直クラックの深さは最大で数十 μm に及ぶ。これにより、厚さ $450 \mu\text{m}$ 程度までのSiC ウェハを、1パ

スのスクライプとブレイクで切断することができる。さらに特筆すべきは、図4において、垂直クラックの両側に切り代のような隙間が存在しない点である。スクライプ工程に続くブレイク工程は垂直クラックを板厚方向に進展させるのみなので、SnB法はカーブレスな切断を可能とする。

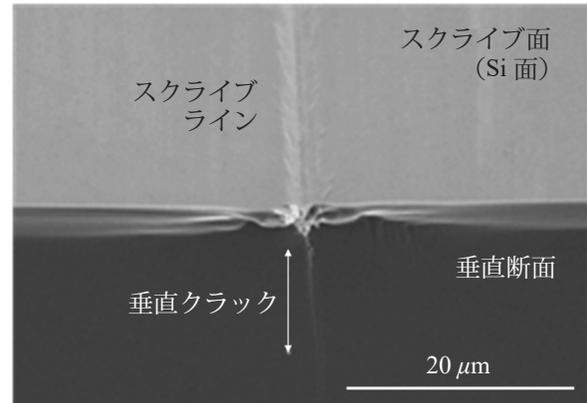


図4 SiC ウェハに対するスクライプにより形成するスクライプラインおよび垂直クラック¹⁰⁾

3. SnB法で切断されたSiC ウェハにおける切断部の品質

本章では、SnB法で切り出されたSiCチップにおける切断部の品質について述べる。ここでは、Si面をスクライプ面とし、第一オリフラ平行方向、第二オリフラ平行方向の順で、それぞれ等間隔にスクライプを行った後、3点曲げ方式のブレイクを施した。

図5¹⁰⁾は、スクライプ面、および、その逆側の面において、SiCチップの端部(切断線が交差する箇所)を光学顕微鏡で観察して得られた図である。いずれの面においてもチッピングやクラックは見られず、SnB法でSiCウェハを良好に切断できたことが分かる。図6に、SiCチップの側面、すなわち、切断面の光学顕微鏡像を示す。図6(a)は第一オリフラと平行な切断面、図6(b)は第二オリフラと平行な切断面であり、それぞれの中央部および両端部で撮影された画像である。切断面には凹凸による縦の筋が見られるが、その表面粗さは $1 \mu\text{m}$ 以下と小さいため実用上の影響はほとんどない。図6(a)におけ

る端面画像より、第二オリフラと平行な断面が、ウェハ表面垂直方向に対して約 4° 傾いていることが分かる。これは、2.2節で述べた $\{11\bar{2}0\}$ 面とウェハ表面垂直方向との角度と一致する。すなわち、第二オリフラ平行方向は、狙い通りへき開面の $\{11\bar{2}0\}$ 面に沿って切断できている。一方、図6(b)における端面画像より、第一オリフラと平行な切断面はウェハ表面に対してほぼ垂直であることが分かる。2.2節で述べたとおり、SiCウェハにおける $\{1\bar{1}00\}$ 面はウェハ表面に対して垂直であることから、第一オリフラ平行方向もへき開面の $\{1\bar{1}00\}$ 面に沿って切断されたことが確認できる。

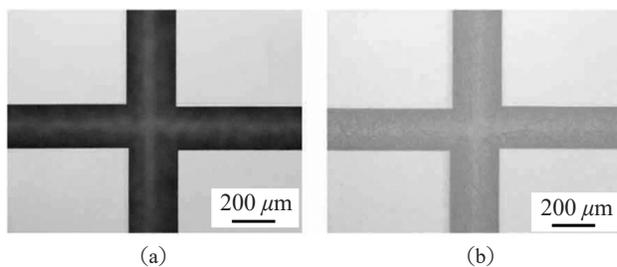


図5 SnB法で切り出されたSiCチップの(a)スクライブ面および(b)スクライブ面とは逆側の面における切断部の様子¹⁰⁾

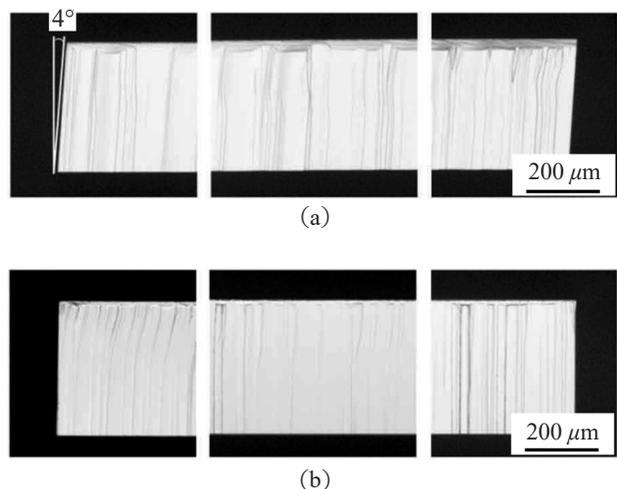


図6 SnB法で切り出されたSiCチップにおける(a)第一オリフラと平行な切断面および(b)第二オリフラと平行な切断面の光学顕微鏡像¹⁰⁾

図7¹⁰⁾は、第二オリフラと平行な切断面に対するEBSD解析結果である。EBSD解析では、観察面の表面から深さ数十nmまでの、極表層における結晶構造情報を得ることができる。図7におけるIQM (Image Quality Map) は、EBSDパターンの鮮明度をもとに結晶性の良い悪いを評価し、結晶性の良い箇所を明るい色で、悪い箇所を暗い色でマッピングした図である。切断面のほぼ全域が明るい色で示されていることから、切断面の広い範囲が良好な結晶状態であることが分かる。また、図7におけるND (Normal Direction), TD (Transverse Direction), RD (Rolling Direction) はそれぞれ、紙面垂直方向、左方向、上方向に対応する結晶方位を、図7左下に示すカラーコードに従ってマッピングした図である。図6(a)について上述したとおり、第二オリフラ平行方向はへき開面の $\{11\bar{2}0\}$ 面に沿って切断されるが、図7のEBSD解析結果からも、この切断面が確かに $\{11\bar{2}0\}$ 面であることが確認できた。図7におけるKAM (Kernel Average Misorientation) は、測定点ごとに、それと隣接する測定点との結晶方位差を評価してマッピングしたものであり、原子スケールの歪分布が定性的に可視化された図である。なお、青色は結晶方位差がゼロであることを示す。この図より、切断面のほぼ全域にわたって結晶方位差がゼロであり、原子スケールの歪が小さい切断面が得られていることが分かる。第一オリフラと平行な切断面に対しても同様にEBSD解析を行ったところ、第二オリフラと平行な切断面の場合と同様の結果を得られた¹⁰⁾。

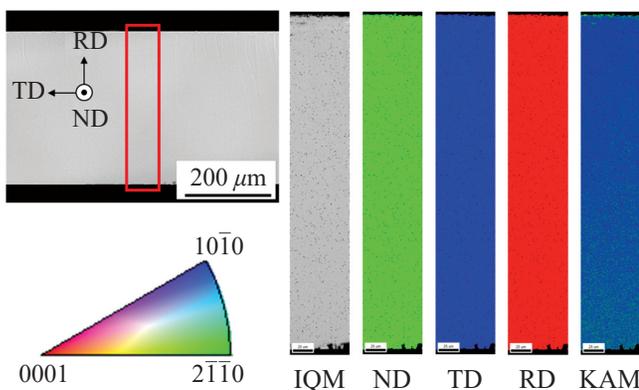


図7 第二オリフラと平行な切断面のEBSD解析結果¹⁰⁾

上記のとおり、SnB法によって、SiC ウェハをへき開面に沿って切断することができる。切断部に生じるチップングやクラックは比較的少なく、切断面における原子スケール構造へのダメージも小さい。一方で、スクライブライン近傍における大きさ数 μm の領域だけは、塑性変形するため結晶構造に乱れが生じる。この塑性変形領域がデバイスに及ぼす影響を低減させる手法として、デバイス面である Si 面ではなく、その逆側の C 面をスクライブ面とする方法が挙げられる。C 面をスクライブ面とした場合でも SiC ウェハを良好に切断できることは、南雲ら¹¹⁾により報告されている。

4. まとめと今後の展望

板ガラスを切断するための技術として知られる SnB 法は、速い切断速度、カーブレス、完全ドライプロセスであるといった特長を持つ。SnB 法は脆性材料におけるき裂進展現象を利用する切断手法であるため、へき開性を有する SiC ウェハの切断にも応用できると考え技術開発を進めることとなった。本文では述べなかったが、板ガラス用の切断装置をそのまま利用できたわけではなく、スクライビングホイール、専用工具ホルダ、切断装置の機構などを一新することとなった。特に、SiC ウェハのスクライブに耐え得るスクライビングホイールの開発は、その製造方法の開発も含めて多くの時間を要した。完成した SiC ウェハ用切断装置は、SnB 法の上記特長を踏襲した切断を可能とする。また、本文で述べたとおり、切断面におけるチップングやクラックは比較的少なく、切断面へのダメージも小さい。現在は、顧客とともに様々な製品の切断実績を積み上げているところである。しかしながら、SiC ウェハの切断に関する知見は板ガラスと比べて少なく、結晶性半導体材料に特有の現象など、明らかにすべき課題は多く残されている。今後は、Si、GaN、GaAs など、他の結晶性半導体材料への応用も視野に入れ、SnB 法による切断現象を明らかにしていきたい。

文献

- 1) 富士経済インダストリアルソリューション事業部, 2022 年度版 次世代パワーデバイス&パワエレ関連機器市場の現状と将来展望, 富士経済, pp. 3 - 46 (2022)
- 2) 邱 曉明, 熊谷 壮祐, 田篠 文照, 小澤 成俊, 超音波援用ダイシングソーの開発と電子デバイス部品加工への応用, 精密工学会誌, Vol. 76, pp. 606 - 609 (2010)
- 3) 邱 曉明, 田篠 文照, 超音波振動を援用したダイシング技術, 2014 年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集, M67 (2014)
- 4) 久野耕司, ステルスダイシングによる微細加工技術の変遷と展望 — 24 時間稼働できる高スルーブットレーザ加工装置 —, レーザ加工工学会誌, Vol. 26, pp. 92 - 98 (2019)
- 5) Y. Sano, H. Nishikawa, Y. Okada, K. Yamamura, S. Matsuyama, K. Yamauchi, Dicing of SiC wafer by atmospheric-pressure plasma etching process with slit mask for plasma confinement, Materials Science Forum, Vols. 778 - 780, pp. 759 - 762 (2014)
- 6) 門屋 祥太郎, 高橋 哲, 道畑 正岐, 大谷 昇, 阿部 耕三, 有村 俊介, ウォータガイドレーザを用いた SiC ウェハのダメージフリーダイシング, 先進パワー半導体分科会第 10 回講演会予稿集, IIA-3 (2023)
- 7) B.R.Lawn, A.G.Evans, D.B.Marshall, Elastic / Plastic Indentation Damage in Ceramics: The Median / Radial Crack System, J. Am. Ceram. Soc., Vol. 63, pp. 574 - 581 (1980)
- 8) N.Tomei, K.Murakami, T.Fukunishi, S.Yoshida, J.Matsuoka, Direct observation of crack propagation in a liquid crystal display glass substrate during wheel scribing, Int. J. Appl. Glass Sci., Vol. 9, pp. 105 - 113 (2018)
- 9) A.Kubo, Y.Umeno, First-Principles Analysis of Deformation and Fracture Properties of Semiconductors, Procedia Structural Integrity, Vol. 23, pp. 372 - 377 (2019)
- 10) 北市 充, 浅井 義之, 福西 利夫, 化合物半導体 (SiC) ウェハの高エネルギー、高品位切断加工プロセスおよび専用工具の開発, 砥粒加工工学会誌, Vol. 66, pp. 56 - 59 (2022)
- 11) 南雲 裕司, 植茶 雅史, 奥田 勝, 長屋 正武, 藤原 広和, 森 亮, 木山 直哉, 北市 充, 武田 真和, SiC パワー半導体におけるスクライブ & ブレイク法を用いた新ダイシング技術の開発, 先進パワー半導体分科会第 10 回講演会予稿集, IB - 2 (2023)