

◇ 砥粒加工学会技術賞 紹介記事 ◇

化合物半導体(SiC)ウェハの高効率, 高品位切断加工プロセス
および専用工具の開発

Novel cutting method of compound semiconductor (SiC) and development of specialized tool

北市 充*, 浅井義之*, 福西利夫*

Mitsuru KITAICHI, Yoshiyuki ASAI and Toshio FUKUNISHI

Key words :scribe, break, cutting method, single crystal wafer, SiC, compound semiconductor, brittle materials

1. 緒言

近年, パワー半導体におけるエネルギーロスの低減(高効率化)やデバイス小型化の実現のため, 化合物半導体を使用した次世代パワー半導体が注目されている。なかでも SiC を用いたパワー半導体は, 鉄道, 自動車へ実用化が進んでいる。しかしながら, SiC ウェハは従来の Si ウェハと比較して高硬度のため, 現切断加工技術では多大な時間がかかることが大きな課題であり, その改善要求が高まっている。

この課題を解決するため, 脆性材料(主にガラス)の切断技術であるスクライブ&ブレイクを応用し SiC ウェハの高効率, 高品位切断を可能とする技術を開発した。また, 化合物半導体(SiC)に対して, 製品チップ加工精度, 工具耐久性の要求を満たす専用工具を開発した。本稿では, 開発した SiC ウェハの切断プロセスと, 専用工具について紹介する。

2. スクライブ&ブレイクの概説

スクライブ&ブレイクは一般的に板ガラスの切断加工に用いられている。特徴は, 高速切断が可能, カーフロスが発生しない, 完全ドライプロセスであり, 材料ロスの低減や研削水不要など環境にやさしい加工プロセスであることがあげられる。

図 1 に, スクライブ&ブレイクの概略図を示す。まず, 図 1(a)のスクライブ工程で, スクライビングホイールをガラス表面に押し付け回転させ, 溝(以後, スクライブラインと示す)を形成すると, ガラス板厚方向に垂直なクラックが形成される。次に, 図 1(b)のブレイク工程で, 垂直クラックに曲げ応力を付与し, クラックを進展させ分離する。スクライブ&ブレイクは, これら 2 つの工程で基板を切断する手法である¹⁾。

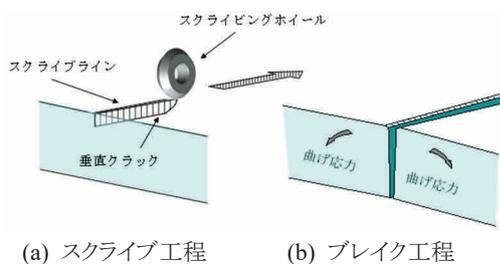


図 1 スクライブ&ブレイクの概略図

3. SiC ウェハの結晶へき開型切断加工

3.1 4H-SiC ウェハの性質^{2),3)}

SiCは12%のイオン性結合を有する共有結合結晶であり, 結晶学的には同一の組成でc軸方向に対して多様な積層構造をとる結晶多形(ポリタイプ)を示す材料として有名である。このポリタイプは, Si原子, C原子単位層の最密充填構造を考えたときに原子の積み重なりの違いにより説明されている。応用上重要なのは, 3C-, 4H-, 6H-, 15R-SiCであると言われている。なかでもデバイス応用に適していると考えられている構造は4H-SiC, 6H-SiCであり, ここでは4H-SiCについて着目する。特筆すべき物性として熱伝導率がSiの約3倍, 絶縁破壊電界がSiの約10倍であることなどがあげられ, さまざまな分野で実用化が進んでいる。4H-SiCは昇華法によって合成される六方晶構造であり, 一般的にステップ制御エピタキシーを使用するため, 4° のオフ角が設けられている。また, (0001)面(Si面)をデバイス面とすると, 第一オリフラ(orientation flat)は<1-100>方向に, 第二オリフラは<11-20>方向に設定される。オリフラとオフ角の関係性を図2に示す。

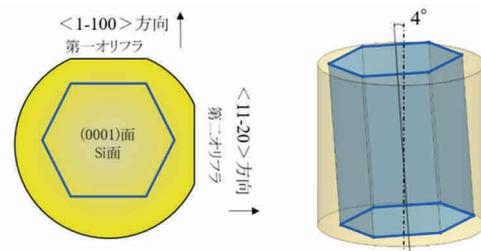


図2 4H-SiCのオリフラとオフ角の関係

また, (0001)面(Si面)の<1-100>方向に直交する面が{1-100}面になり, <11-20>方向に直交する面が{11-20}面になる。へき開のしやすさは{0001}面>{1-100}面>{11-20}面の順となることが知られている。これは, 結晶面の原子密度に依存し, 密度が高い面ほど露出しやすい傾向があるためであると考えられる。

3.2 4H-SiC ウェハの切断

結晶材料をスクライブ&ブレイクを用い, スクライブラインを起点とし, 垂直クラックを進展させて切断するためにはへき開性が重要な位置づけとなる。またへき開性を利用した加工であると仮定すると, 第一オリフラ平行方向切断面は{1-100}面が露出すると予測され, 第二オリフラ平行方向切断面は

* 三星ダイヤモンド工業株式会社: 〒566-0034 大阪府摂津市香露園32-12

〈学会受付日:2021年12月 6日〉

{11-20}面が露出すると考えられる。

実験に用いたSiCウェハの仕様を、表1に示す。外径2 mmのスクライビングホイールを使用して、表面(Si面)にスクライブラインを形成した。その際、次のブレイク工程で個片化したチップを保持するために、裏面(C面)にウェハ保持テープを貼り付けた。スクライブ速度は100 mm/s、ウェハ端から0.5 mmの位置を開始位置とし、5 mm間隔で第一オリフラに平行方向にスクライブ加工を行った。その後、第二オリフラに平行方向にスクライブ加工を行った。

表1 SiCウェハの仕様

ポリタイプ	4H
サイズ	4インチ
オフ角	4°
厚さ	350±50 μm

Si面のスクライブ後、第一オリフラ平行方向のスクライブラインと垂直クラックを電子顕微鏡(SEM)で観察した。観察結果を図3に示す。

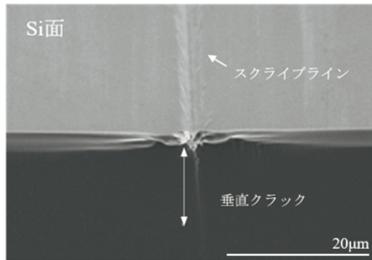
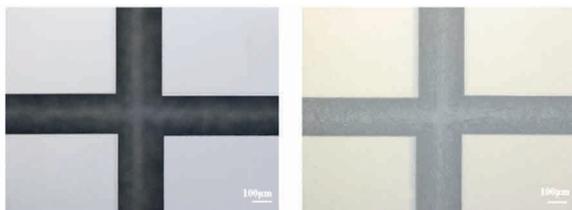


図3 スクライブラインと垂直クラックのSEM観察

図3よりSi面にスクライブラインが形成され、その周辺にチッピングなどの欠陥は見られなかった。スクライブライン直下には深さ20 μm程度の垂直クラックが確認された。以上より、ブレイク後のチップには、チッピングなどの欠陥のない切断面が得られると予測できる。

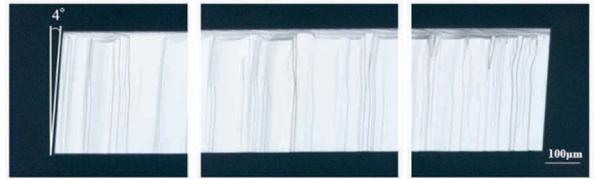
次に、ウェハ表面を保護するために、スクライブラインを形成したSi面に保護フィルムを貼り付け、3点曲げでC面側からブレイクバーを押し込みブレイクした。ブレイク後にウェハ保持テープを引き延ばしてチップ間隔を拡張した。個片化されたチップの表面(Si面)、裏面(C面)の観察結果を図4に示す。



(a) 表面観察(Si面) (b) 裏面観察(C面)

図4 個片化したSiCウェハの観察

ブレイク後のチップの表面(Si面)、裏面(C面)には、チッピングなどの欠陥は確認されなかった。さらにオフ角の影響を調べるため第一オリフラおよび第二オリフラに平行方向の切断面と端部を観察した。観察結果を図5に示す。



(a) 第一オリフラ平行方向切断面と端部



(b) 第二オリフラ平行方向切断面と端部

図5 切断面と切断面端部の観察

図5(a)よりウェハ表面に対して第一オリフラ平行方向切断面の端部が4°傾いた観察結果が得られた。これはウェハ結晶軸に対して、第二オリフラ<11-20>方向に設けられたオフ角の影響を受けているためと考えられる。一方、第二オリフラ平行方向切断面は紙面奥行方向に4°傾いている。端部ではオフ角の影響を受けないため、図5(b)に示すようにウェハ表面に対して垂直な切断面が確認された。どちらの切断面についても縦筋のような模様が確認された。これらは六方晶の結晶構造をへき開させた特有の現象と考えられる。

切断面の結晶状態を詳細に確認するため、第一オリフラ平行方向切断面に対してEBSD(Electron Back Scatter Diffraction)解析を行った。その結果を図6に示す。

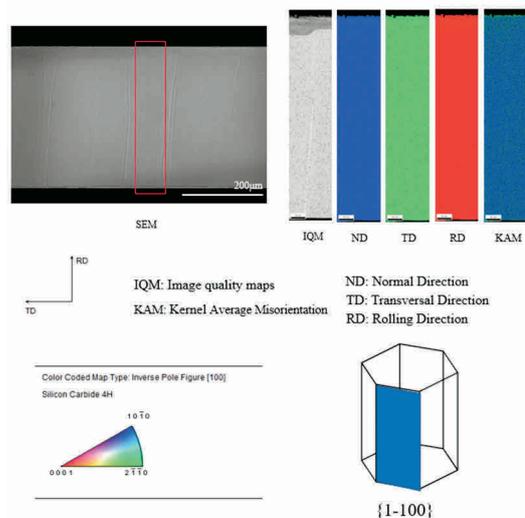


図6 第一オリフラ平行方向切断面のEBSD解析結果

EBSDにおけるIQMは結晶性の良し悪しを表し、鮮明に見えるほど結晶性が良い。ND, TD, RD は、単一色で認識できれば、同一のへき開面(結晶面)で切断されていることになる。KAMは、濃淡が認識されれば、局所的な方位差があることを示している。図6のND, TD, RD から、第一オリフラ平行方向切断面は、SiC ウェハの{1-100}の結晶面であることが明らかとなった。さらに IQM より切断面は結晶性が良く、KAM より切断面に局所的な方位差がないことが確認できた。同様に、第二オリフラ平行方向切断面に対して EBSD 解析を行った。その結果を図7に示す。

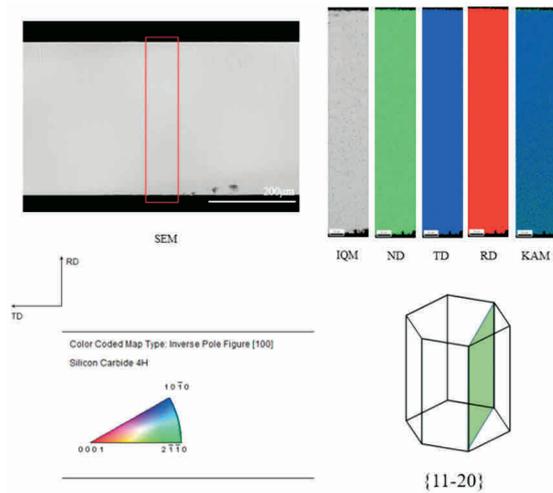


図7 第二オリフラ平行方向切断面のEBSD解析結果

図7のND, TD, RD から、第二オリフラ平行方向切断面は、SiC ウェハの{11-20}の結晶面であることが明らかとなった。IQM, KAM の解析結果から、結晶性が良く切断面に局所的な方位差がないことが確認された。スクライプ&ブレイクでは、第一オリフラ平行方向は SiC ウェハの二番目にへき開しやすい面を、第二オリフラ平行方向は三番目にへき開しやすい面を、切断加工に利用していることが明らかとなった。

ここまでの結果より、スクライプ&ブレイクで SiC ウェハを切断できることが明らかとなった。スクライプ&ブレイクが応用できることで、SiC ウェハの高速切断が可能となった。また、切断面はへき開された面が露出しており、狙った位置に SiC のへき開を発生させることが可能であることを実証した。すなわち、スクライプ&ブレイクによる SiC ウェハの切断加工は、結晶のへき開性を最大限に利用し、チップングなどの欠陥を最小限に抑える、全く新しいメカニズムによる切断加工法(結晶へき開型切断加工)であると考えられる。

4. 専用工具について

4.1 専用工具の開発

スクライプ&ブレイクによる SiC ウェハの切断加工法の有効性は確認されたが、従来工具である PCD(Poly Crystalline Diamond)製スクライビングホイールでは、半導体チップ加工精度と耐久性の課題に直面した。

SiCは共有結合性が強く、ビッカース硬度2,500 HV程度の高硬度を有している。従来のPCD製スクライビングホイールでは工具先端部の摩耗が激しく、ウェハ1枚でさえ加工できない状況であった。

半導体チップ加工精度と耐久性の課題を解決する専用工具として、SiCの加工にも耐えうる高耐久性かつ高精度の新しいスクライビングホイールを開発した。図8に示すように専用工具の寸法は、厚み0.65mm、外径2mm、穴径0.8mmとした。先端角度は切断するウェハの厚みに応じて100~140°の間で任意に設定される。

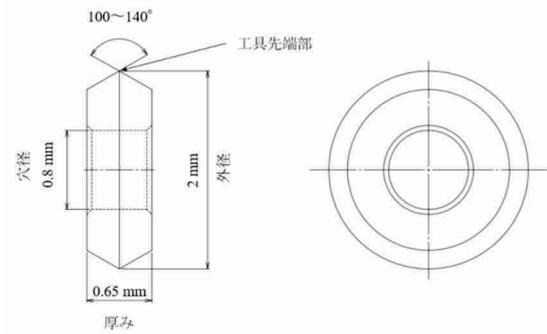
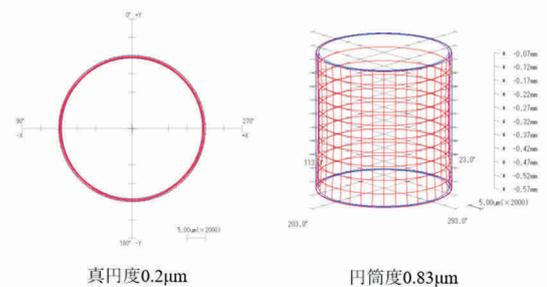
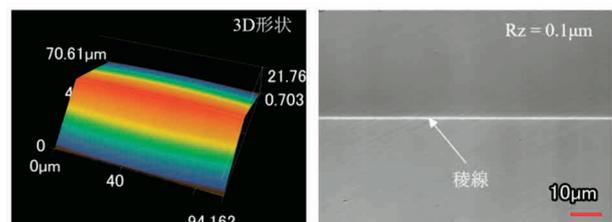


図8 専用工具の概略図と寸法

結晶へき開型切断加工を高精度に行うため、工具穴は図9(a)に示すように真円度を0.5 μm以下、円筒度5.0 μm以下に加工した。工具の先端部の形状は図9(b)に示すように稜線の粗さをRz 1 μm以下に加工した。工具穴と先端部形状の加工精度を向上させることで、SiC ウェハの製品チップ加工の高精度化を実現させた。



(a) 専用工具の穴加工精度



(b) 専用工具の3D形状と稜線粗さ

図9 専用工具の穴加工精度と稜線加工品質

4.2 専用工具ホルダーの開発

専用工具を保持するホルダーも開発した。専用工具ホルダーは図 10 に示すような形状とした。また、ホルダーを装置へ取り付ける方法として、従来はねじ止めで固定していたが、マグネット方式を採用した⁴⁾。これより、ワンタッチでホルダーを装置から取り付けできるようになり、工具交換時の作業効率を改善した。さらに、ホルダー着脱時の繰り返し位置精度を高精度に保つため、ホルダー細部の加工精度を向上させた。その結果、工具交換時間を低減させ、工具交換前後でスクライブ加工精度の維持を実現した。

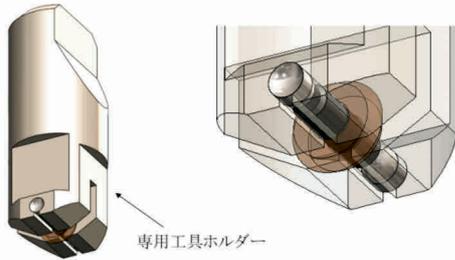


図 10 専用工具ホルダーの外観図と拡大図

4.3 専用工具の耐久性

開発した専用工具を用いて SiC ウェハの Si 面に対して実際の切断加工に用いられる荷重を印加し、スクライブ速度 100 mm/s で、耐久試験を実施した。切断方向は第一オリフラ平行方向、第二オリフラ平行方向の順とし、1,000 m 走行させた。走行前と走行後の工具先端部の状態を観察し、比較した結果を図 11 に示す。

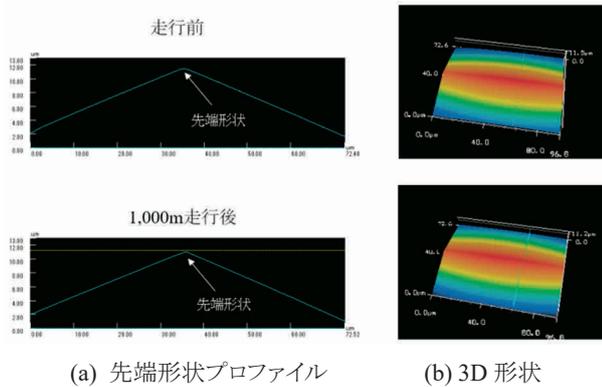


図 11 耐久試験前後の工具先端形状のプロファイル比較

図 11 より、SiC ウェハ上を 1,000 m 走行させても先端部の形状に変化がないことが確認された。これより、工具の摩耗はほとんど進行しておらず走行初期の形状を維持していると考えられる。次に、走行前と走行後の SiC ウェハの切断品質を比較した。その結果を表 2 に示す。

表 2 走行距離における専用工具の切断品質比較

		専用工具(高精度, 高耐久性スクライビングホイール) 走行距離		
		0m	500m	1,000m
切断面	第一オリフラ平行			
	第二オリフラ平行			

表 2 より 500 m, 1,000 m 走行後でも、個片化された SiC ウェハ表面および切断面にチッピングなどの欠陥が発生していないことが確認された。これらより、専用工具は走行初期の性能を維持していると考えられ、耐久性の課題が解決できたことを実証した。さらに、1,000 m 走行後でも工具の形状と性能に変化がないことから、1,000 m 以上の更なる長寿命化が期待される。これは従来の PCD 工具の 100 倍以上の耐久性であり、SiC に適した高硬度材料を選定したためであると考えられる。

5. 結言

化合物半導体(SiC) ウェハの高効率、高品位な結晶へき開型切断加工、およびその専用工具を開発した。

- (1) スクライブ & ブレイクを応用し、高速かつチッピングなどの欠陥がない高品位切断を可能とした。切断面ではへき開面が確認できた。第一オリフラ平行方向切断面は、{1-100}面 でへき開され、第二オリフラ平行方向切断面は{11-20}面 でへき開されることが明らかとなった。
- (2) 専用工具(高精度スクライビングホイール)は半導体チップの加工精度を実現した。耐久性は SiC ウェハ 1,000 m の走行を達成し、更なる長寿命化が期待できる。これは、従来の PCD 製工具の 100 倍以上の耐久性である。

以上の結果より、切断加工プロセス、専用工具の観点から化合物半導体(SiC)のチップ化の工程において、革新的な技術開発を達成した。化合物半導体(SiC)の実用化が進んでいくなかで、社会に貢献できる技術の 1 つとして期待ができる。

6. 参考文献

- 1) 北市充, 村上健二, 留井直子, 福西利夫: SiC の割断加工(スクライブ+ブレイク法), 先端加工フォーラム 2017, (2017), 技術講演④.
- 2) 松波弘之: 半導体 SiC 技術と応用, 日刊工業新聞社, (2003), 9.
- 3) 芦田晃嗣: 低速電子線チャネリング効果を用いた SiC 結晶表面の終端構造評価, 関西学院大学博士学位論文, (2017), 37.
- 4) チップホルダ: 特許公開(2013), 5327287.