

SiC デバイス(FET)の良品構造解析手法

DPA (Destructive Physical Analysis) Technique for SiC Device

沖エンジニアリング株式会社

○大谷直己, 清水互, 久保田英久, 村原大介,
立山博丈, 服部民子, 矢部一博

Naoki OTANI, Wataru SHIMIZU, Hidehisa KUBOTA, Daisuke MURAHARA,
Hirohumi TATEYAMA, Tamiko HATTORI, Kazuhiro YABE

In recent years, aiming at lowering electric power consumption and downsizing of power devices, the device with substrates using wide gap semiconductors such as SiC (Silicon Carbide) and GaN (Gallium Nitride) are started to use for power modules and components. As the quality and the reliability of the devices is very important, SiC's DPA(Destructive Physical Analysis) is need to be developed. We have established DPA technique of SiC device at the base on "LSI process diagnostics system" which has been used for a reliability assessment technique of Si semiconductor device used for a high-reliability system. This paper provides the problem and evaluation technique peculiar to SiC device.

1. はじめに

半導体デバイスにはこれまで主としてSi(シリコン)が使用されてきた。しかし、近年デバイスの省電力化や小型化を見据え、Siに代わるSiC(シリコンカーバイド)やGaN(窒化ガリウム)等のワイドギャップ半導体を用いたデバイスが注目を集めている。中でも、SiCは高温動作性に優れており幅広い分野での実用が見込まれる。特に自動車に代表されるパワーデバイスへの実用が期待されている。自動車など人命に大きく関与するデバイスでは、高信頼性が要求される。そこで、信頼性を評価する有効な手法の確立が必要となる。

弊社では、高信頼性システムに用いられる半導体デバイスの信頼性評価手法として「LSIプロセス診断」¹⁾を開発し、評価実績を挙げている。この評価手法では、Si半導体デバイスの良品構造解析を実施してきた。このシステムをSiCデバイスへ応用する

際に、従来のSiと比べSiCは材料特性による加工性の悪さが問題となる。また、製造品質確認をする上でSiCデバイス特有の解析項目も必要となる。そこで我々は、今後普及が期待されるSiCデバイスの信頼性向上に貢献すべく、SiCデバイスの構造解析手法について検討・開発を実施した。その結果、SiCデバイスの解析において新たな知見が得られ、SiCデバイスの構造解析手法を確立することに成功した。本報文では、SiCデバイスの品質評価手法として開発した良品構造解析手法について報告する。

2. 良品構造解析(LSIプロセス診断)

先に述べた通り、弊社にて開発した「LSIプロセス診断」¹⁾とは、電氣的に良品であるデバイスについて、分解・解析を行い部品の状態や内在する欠陥を検出し、将来故障に至る危険性を推定する技術である。この「LSIプロセス診断」では非破壊検査、ア

沖エンジニアリング株式会社 信頼性解析事業部 解析センタ

〒179-0084 東京都練馬区氷川台 3-20-16

TEL : 03-5920-2354 FAX : 03-5920-2306 e-mail : ootani464@oki.com

【キーワード】SiC デバイス, 信頼性, 良品構造解析

センブリ工程検査，ウェハ工程検査の3検査に大別し，それぞれについて検査項目を設けている．この評価手法をベースとし，SiC デバイス特有の問題に対応するために解析項目を追加（白抜きの項目）している．表1にそれぞれの検査項目における検査ポイントを示す．また次節に，LSI プロセス診断の各検査項目の詳細および検査メニューについて述べる．

表1 SiC デバイスの良品構造検査項目

	検査項目	検査ポイント
非破壊検査	電気的特性検査	ON抵抗、耐圧、容量等
	熱抵抗測定	デバイスパッケージの熱抵抗
	外観検査	モールドの割れ、ボイド、捺印、リード
	X線検査	内部組立構造、チップ取付・ダイボンド・リード状態
アセンブリ工程検査	超音波探査	内部剥離の有無
	開封・内部検査	ワイヤリング・インナーリード・チップ取付状態
	ワイヤボンドプル試験	ワイヤ接続強度
	ダイシエアー試験	チップ取付強度
	クレータリング検査	ボンディングによる下層ダメージの有無
	パッケージ断面検査	モールド樹脂充填状態、ダイボンド状態
工程検査	パッケージ樹脂熱分析	モールド樹脂の熱特性
	チップ断面検査 (SEM)	素子構造および組成
	結合構造検査	pn接合状態
	チップ断面検査 (TEM)	ゲート酸化膜状態、結晶欠陥の有無
	基板平面構造検査 (TEM)	素子構造および結晶欠陥の有無
	チップ界面検査	積層構造、SiC基板表面状態

□ LSIプロセス診断(Si)と共通する検査項目

2.1 非破壊検査

非破壊検査では電気的特性検査，熱抵抗測定，外観検査，X線検査，超音波探査を実施する．この検査項目では，SiC デバイスに特化した検査手法や検査基準の追加が必要となり，熱抵抗測定を追加実施する．その他の検査では，Si デバイスと同様な評価が可能であるが SiC デバイスで重要となる着眼点を以下に記す．

電気的特性検査では SiC デバイスの特徴である高耐圧，高出力の特徴に合わせ，Si デバイスとは異なる測定器（パワーデバイス・アナライザ）を用意する必要があり，ON 抵抗，耐圧，容量といったデバイスの各種基本電気特性の異常の有無を検査するが，可能であれば動特性についても取得することが望ましい．

熱的な観点として，SiC デバイスはその特徴である高温領域での動作を考慮し，適切な熱設計や熱的な作り込みが行われている必要がある．これら熱的な性能の指針である熱抵抗を，熱的な構造情報と併せて評価することが望ましい．

外観検査では，モールド樹脂の割れやバリ，ボイドの開口，捺印状態，リード状態等を MIL-STD-750（Military Standard 750：個別半導体試験）に基づき判定するが，SiC デバイスでは高出力品が多く，

放熱特性が重要なため，特にヒートシンクとの当たり面のバリやそり状態に注意が必要となる．

X線検査では，モールド樹脂内部の組立構造，チップ取付状態，ダイボンド状態，リード状態等について検査を行い，MIL-STD-750に基づき判定する．ここでも，放熱特性に影響するダイボンド部は重要な着眼点となる．

超音波探査では，樹脂内部のボイド，ダイボンド剥離，樹脂と内部組立構造の密着性を検査する．SiC デバイスでは動作時の発熱が大きいため，この探査については初期状態，半田耐熱試験後，実動作試験後について行うことが望ましい．

SiC デバイスの非破壊検査フローを図2.1.に示す．また，SiC デバイスの非破壊検査の事例を図2.2に示す．

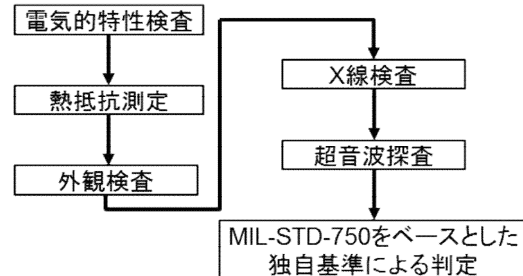


図2.1 非破壊検査フロー

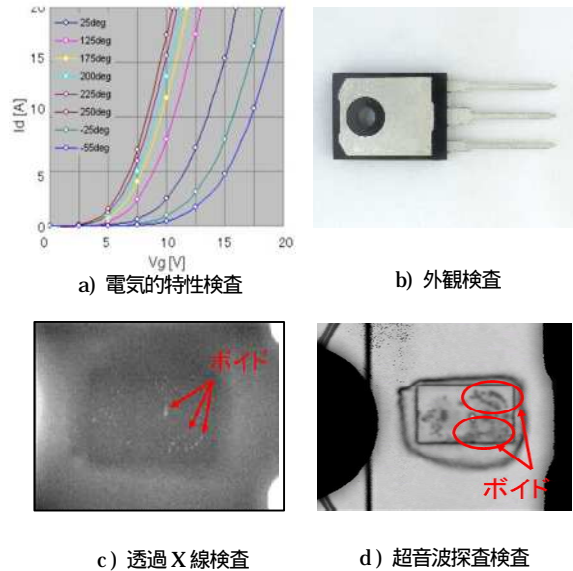


図2.2 非破壊検査結果事例

2.2 アセンブリ工程検査

アセンブリ工程検査では，開封・内部検査，ワイヤボンドプル試験，ダイシエアー試験，クレータリング検査，パッケージ樹脂熱分析，パッケージ断面検査，を実施する．アセンブリ工程については，SiC デバイスに特化した検査手法や検査基準は必要なく

Si デバイスと同様な評価が可能であるが SiC デバイスで重要となる着眼点を以下に記す。

開封・内部検査では、モールド樹脂を薬液により除去し、内部組立構造が観察可能な状態にする。MIL-STD-750 に基づき、内部チップの状態、ワイヤリング状態、インナーリードの構造等を検査する。SiC チップは Si チップと比較して硬く加工性が悪いことからダイシング形状に注意が必要である。

クレータリング検査では、ワイヤボンディングによる下層ダメージの有無を検査する。SiC デバイスの積層構造は Si デバイスとほぼ同構造であることが多いが高電圧で使われることが多いため、クレータリングによる層間膜ダメージは信頼性への影響が高く、重要な評価項目となる。

パッケージ断面検査では、パッケージ積層構造、ワイヤボンディング接続状態、ダイボンド状態、樹脂・内部構造の密着性等を検査する。パッケージ断面検査の試料作成は SiC チップが硬く加工性が悪いためイオンビームによる断面加工が必要となる。

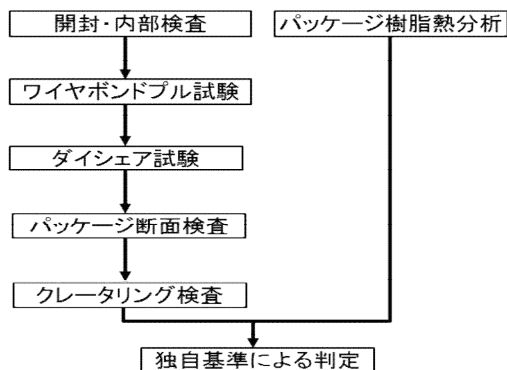


図 2.3 アセンブリ工程検査フロー

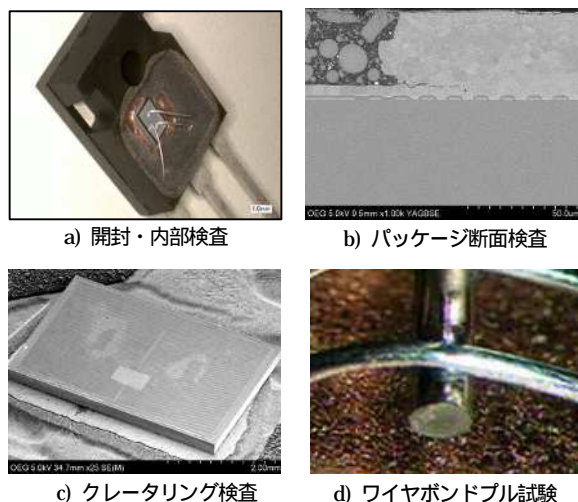


図 2.4 アセンブリ工程検査結果事例

SiC デバイスのアセンブリ工程検査フローを図

2.3 に示す。また、SiC デバイスのアセンブリ工程検査の事例を図 2.4 に示す。

2.3 ウェハ工程検査

ウェハ工程検査では SiC デバイスに特化した検査手法や検査基準が必要となる。チップの構造検査として走査型電子顕微鏡 (Scanning Electron Microscope : SEM) を用いたチップ断面検査、接合構造検査 (SEM)、透過電子顕微鏡 (Transmission Electron Microscope : TEM) を用いたチップ断面および平面検査 (TEM)、チップ界層検査を実施する。

SiC チップを評価する際に重要となる着眼点を以下に記す。

チップ断面構造検査 (SEM)、接合構造検査 (SEM) では、素子構造、各部組成、接合構造等を検査する試料作成が重要なポイントとなる。

SiC チップは硬く加工性が悪いためイオンビームによる断面加工が必要となるが、断面試料はパッケージ断面検査と共用が可能である。断面加工はあらかじめモールド樹脂をチップ近傍まで研削した後、イオン加工によるチップ端および中央部の断面作成を行う (加工説明図; 図 2.5)。

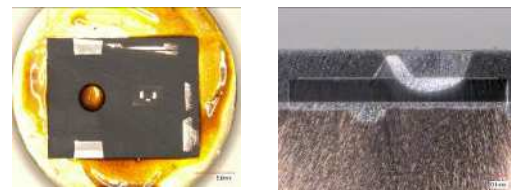


図 2.5 SiC 断面加工方法

チップ断面構造検査 (TEM) および基板平面構造検査 (TEM) では、素子構造、ゲート酸化膜状態、結晶欠陥等を検査する。チップ断面構造検査は、チップ端および中央部について、FIB 加工により試料を作成する。基板平面構造検査はディンプリング+イオンミリングにより試料を作成する。SiC デバイスは特性劣化につながりやすい結晶欠陥の密度が Si デバイスと比較して高く、結晶欠陥が直接観察できる TEM による検査は特に重要な検査項目となる。

チップ界層検査では、各種層膜を観察・除去を順次行い、各種層膜の形成状態を検査する。

SiC デバイスのウェハ工程検査フローを図 2.6 に示す。また、SiC デバイスのウェハ工程検査の事例を図 2.7 ~ 2.9 に示す。

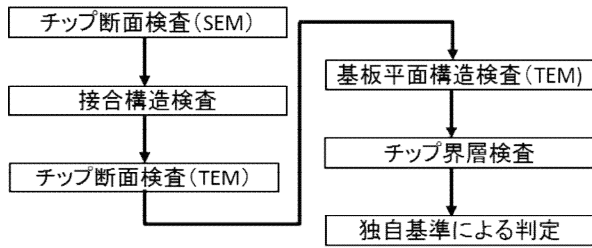
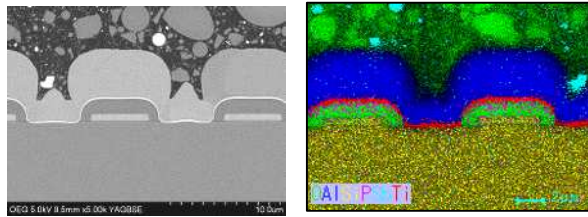


図 2.6 ウェハ工程検査フロー



a) SEM 像
b) EDX 像
図 2.7 チップ断面検査(SEM) 事例

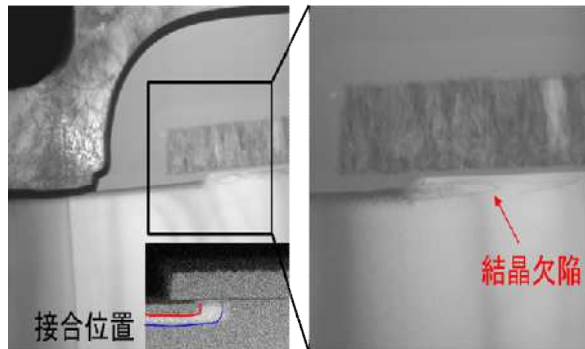


図 2.8 チップ断面構造検査(TEM)事例

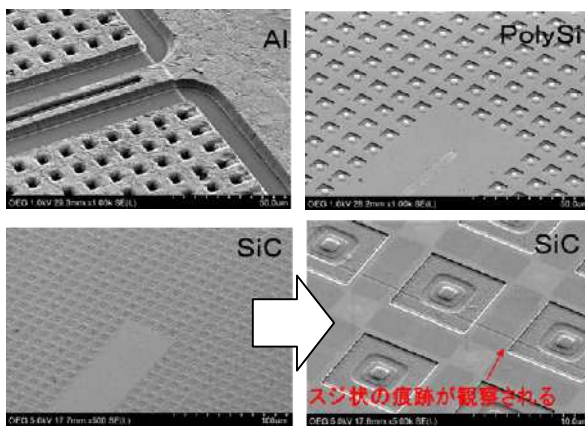


図 2.9 チップ界層検査事例

3. SiC デバイスにおける良品構造解析追加項目

先述の通り、SiC デバイスは Si デバイスに比べ高温動作性に優れているおり、高温環境下での使用が

想定される。そのため、熱に対する特性を厳しく評価する必要がある。また、Si に比べ SiC は難エッチング性の問題があるため、解決策を模索する必要がある。

3.1 熱抵抗測定

SiC デバイスの特長の一つとして、高温動作性が挙げられる。この特長を活かし、自動車のエンジンルームなどの高温環境下での使用を見込んだ開発が行われている。高温環境下、且つ大電流での使用は接合温度 (T_j) の増加を引き起こすため、その影響としてデバイスの短寿命化・故障率の増加 (信頼性の低下) が顕著な問題となって現れる。また、高温での動作時に注意が必要な要素として、SiC 以外にダイボンドやワイヤ、モールド樹脂が SiC の発する熱に耐えられなければならない。そこで、Si 系の良品構造解析メニューに加えて、デバイスの熱設計や熱的な作り込み指標の一つとして用いられる、熱抵抗の測定を新たな評価項目として組み入れることとした。熱抵抗測定には、測定対象物の熱的な構造情報を取得可能な評価手法として近年注目を浴びている「熱過渡特性解析法」を使用する。熱過渡特性解析法は評価対象デバイス中に作り込まれた PN 接合部の Vf 特性が有している温度依存性をあらかじめ取得しておき、測定時の Vf 過渡特性から対象デバイスの熱的な構造を熱抵抗 対 熱容量の構造関数と呼ばれるグラフ化することで、デバイスパッケージ内の熱的な構造を評価可能とした手法である。

3.2 接合構造検査

高速応答性が求められる SiC では、リークの抑制が重要な課題である。リークは製造工程で作り込まれた結晶欠陥部で生じる場合があるため、結晶欠陥とその発生位置 (接合との位置関係) を明確化する必要がある。Si デバイスでの接合状態を確認する方法は、薬液によるエッチング処理 (図 3.1(a)) により、接合層の顕在化を行ってきた。しかし、SiC デバイスでは難エッチング性であるため、有効なエッチング液がなく、接合層の顕在化が困難であった (図 3.1(b))。今回、新たに接合層の評価が可能な観察条件を明確化する試みとして接合構造検査を実施している。これは、SEM 観察時の条件を調整することで SiC デバイスの接合層に電位コントラストが出現することを利用している。

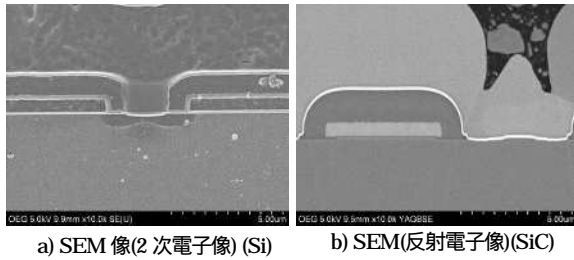


図 3.1 接合断面観察像

3.3 基板平面構造検査 (TEM)

従来の Si デバイスでは、チップ界層検査において基板表面を露出し、表面をセコーエッチングすることで基板表面付近の結晶欠陥を顕在化し、評価を行っていた。しかし、SiC デバイスは難エッチング性であるため、エッチングによる結晶欠陥の顕在化はできず、チップ界層検査での基板面結晶欠陥の評価はできない。そのため結晶欠陥の直接観察を可能とする基板平面構造検査(TEM)を新たな検査項目として加えている。

4. 追加検査項目の検査結果

4.1 熱抵抗測定結果

まず、追加項目として導入した熱抵抗測定結果について述べる。熱過渡解析を用いた熱抵抗測定を実施した結果の構造関数出力を図 4.1 に示す。

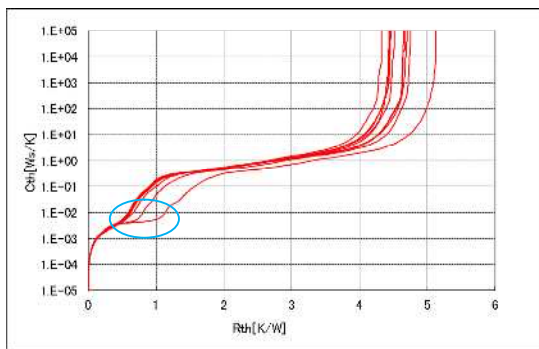


図 4.1 熱抵抗評価事例 (構造関数)

10 個の同一品種デバイスを評価した結果となるが一部のデバイスで熱抵抗が高いデバイスが見られている。このデバイスは図 4.1 中の で示した領域で熱抵抗が高く、チップ/ダイボンド/ダイパッド間での熱結合がルーズであると推定される。この個体については、実使用条件下において接合温度上昇、ひいては素子信頼性の低下を来す可能性が高いと判断される。

4.2 接合構造検査結果

次に接合構造検査結果について述べる。我々は Si デバイスと同様に SiC デバイスでも接合構造を SEM 観察で確認すべく、断面の加工法及び観察条件を検討した。その結果、イオン加工による断面材料に対しチャージUP防止の導電性コートを行わない状態で比較的高加速での SEM 観察を行うことで電位コントラストによる FET の 2 重拡散構造を確認することができた。今回、確認された拡散構造は観察時の加速電圧により接合領域が変化する様子が観測されたため、この電位コントラストと拡散構造との相関は走査型静電容量顕微鏡法 (Scanning Capacitance Microscopy : SCM) によるキャリア濃度分布との比較で確認を行っている。確認は図 4.2 a) に示す構造部にて行い、同 b) 図の SCM 像を比較対象としている。

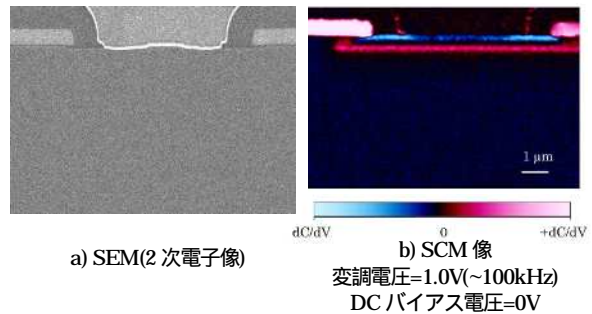


図 4.2 SEM 像と SCM 像

SCM 像との比較から最適条件を検証した(図 4.3)。検証の結果、1.0kV では得られた電位コントラストと SCM 像との相関性が悪い。3.0kV では SCM 像との相関性が良好となって来るがチャージによる像の乱れが現れる。3.0kV 以上の加速電圧では電位コントラストに変化がなく、良好な相関性を得ることが可能であった。なお、加速電圧が 0.5kV では電位コントラストが出現しなかった。

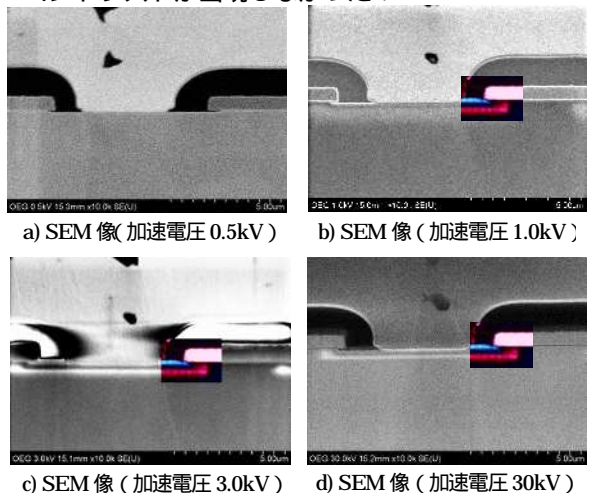


図 4.3 接合構造コントラストの加速電圧依存性

以上の結果から、接合構造検査は 3.0kV 以上の加速電圧で得られた電位コントラストを利用することで、接合構造領域を特定し、断面、平面 TEM 像で得られた結晶欠陥との比較、評価が可能となった。

4.3 基板平面構造検査(TEM)結果

続いて、追加項目として導入した基板平面構造検査(TEM)結果について述べる。SiC 基板表面の結晶欠陥を観察可能とするため、ディンプリング+イオンミリングにより試料を作成し、基板平面構造の検査(TEM)を実施した。ディンプリング+イオンミリング法では比較的広範囲(1mm 程度)の観察(図 4.4 が可能となる。

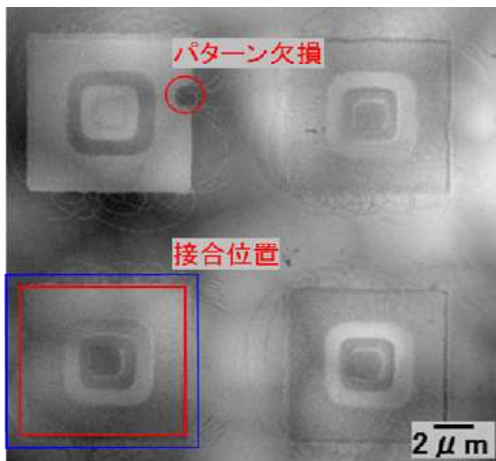


図 4.4 基板平面構造検査結果事例

広範囲にわたる検査の結果、結晶欠陥が多数観察されるほか、パターンの欠損も確認された。また、この結晶欠陥は先に述べた接合構造検査結果との検証により、接合構造を跨いでいたことが確認できた。以上のことから、基板平面構造検査(TEM)を導入することで、SiC デバイスの基板表面部結晶欠陥を観察することが可能であることが確認された。なお、本事例で確認された接合構造を跨いで存在する結晶欠陥やパターン欠損であるがデバイス品質への影響については情報がまだ少なく、製造品質を評価する診断基準としては、現在のところ整備途上である。

5. まとめ

これまで Si デバイスに対して実施してきた良品構造解析手法を、新たに SiC デバイスについて適用すべく、解析手法ならびに解析技術の検討、開発を

実施した。その結果、SiC デバイス特有の使用環境を想定し、非破壊検査にて熱抵抗測定を追加した。また、SiC デバイス特有の難エッチング性や難加工性に対し、接合構造検査、基板平面構造検査の項目を追加した。その結果、SCM 像との相関が良好な電位コントラストや、接合領域の結晶欠陥、パターン欠損等が検出され、同手法及び検査項目の有効性が示された。今回の各種検査結果を表 5.1 に示す。

表 5.1 検査結果一覧

検査項目	解析結果	備考
電気的特性検査		異常なし
熱抵抗測定		熱抵抗増有り(規格内)
外観検査		異常なし
X線検査		ダイボンド部ボイド
超音波探査		ダイボンド部ボイド
開封・内部検査		異常なし
ワイヤボンドプル試験	-	
ダイシアー試験	-	
クレータリング検査		異常なし
パッケージ断面検査		異常なし
パッケージ樹脂熱分析	-	
チップ断面検査(SEM)		異常なし
接合構造検査		異常なし
チップ断面検査(TEM)		結晶欠陥
基板平面構造検査(TEM)		結晶欠陥 パターン欠損
チップ界層検査		スジ状の痕跡

○: 異常なし, もしくは軽度異常
 △: 中度異常
 ×: 重度異常

このように本報文で示した良品解析手法を適用することで、SiC デバイスの製造品質を総合的に評価可能である。

この手法はユーザーサイドとして採用予定品の製造品質確認や製造社間のベンチマークに有効なツールとなるほか、検出された欠陥を製造社にフィードバックすることで、フィールドでの不具合発生を未然に防ぎ、信頼性向上に貢献できるものとする。

現状では、解析事例はまだ少なく、定性的な評価にとどまるが、今後は検査事例と信頼性試験、デバイスの動特性データを積み重ねることで、定量的な評価が可能となる SiC デバイスの診断システムの構築を目指している。

参考文献

- [1] 矢部一博他:『LSI プロセス診断システムと信頼性試験による相互検証』第 14 回 RCJ 信頼性シンポジウム 2004
- [2] 谷澤秀和他:『200 以上での SiC 駆動を想定した Al ワイヤボンディング信頼性』, スマートプロセス学会誌 第 2 巻 第 4 号, 2013