

(技術資料)

# SiC パワーデバイスのマルチスケール分析

中尾博樹\*1・猪口憲一\*1・佐々木美幸\*2

## Multiscale Analysis of SiC Power Device

Hiroki NAKAO・Kenichi INOKUCHI・Miyuki SASAKI

### 要旨

パワーデバイスには従来はSiが使用されていたが、より高効率な次世代パワー半導体としてSiCやGaNが実用化され、またGa<sub>2</sub>O<sub>3</sub>の開発も進められている。その中でもSiCは最も大きな市場を有しており、自動車・電装などに使用されている。SiCパワーデバイスの一つであるトレンチ構造のSiC金属酸化膜半導体電界効果トランジスタ(Metal-Oxide Semiconductor Field-Effect Transistor：MOSFET)は、従来のプレーナ構造のものに比べて小型・高性能化が可能なることから主流になりつつある。

本稿では、トレンチ構造のSiC MOSFETについて、走査電子顕微鏡(Scanning Electron Microscope：SEM)、透過電子顕微鏡(Transmission Electron Microscope：TEM)、ラマン分光による分析事例を紹介する。複数の分析手法を組み合わせることで、光学顕微鏡レベルからnmレベルまでのマルチスケールでの構造、組成、欠陥の評価を行った。

### Abstract

Conventionally, Si has been used for power devices; however, SiC and GaN have been put into practical use as next-generation power semiconductors with higher efficiency, and Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> is being developed as well. Among them, SiC has the largest market and is being used for automobiles and electrical equipment. The metal-oxide semiconductor field-effect transistor with trench structure (trench MOSFET) is one of the SiC power devices and is becoming the mainstream because it can be made compact with a higher performance, compared with those of the conventional planar structure. This paper introduces several examples of the analysis of SiC MOSFETs with trench structures performed by scanning electron microscopy (SEM), transmission electron microscopy (TEM), and Raman spectroscopy. Combining multiple analysis methods has allowed the evaluation of structure, composition, and defects at multi-scale from the optical microscope level to nm level.

### 検索用キーワード

パワーデバイス, SiC, MOSFET, トレンチ構造, SEM, ラマン分光, TEM, STEM, EDX, 結晶欠陥

まえがき = 電力利用の多様化が進み、電力変換に使われるパワー半導体の高効率化は省エネ社会の要求によりより重要なものになってきている。パワー半導体には従来はシリコン(Si)が広く使用されていたが、より高効率な次世代パワー半導体として炭化ケイ素(SiC)や窒化ガリウム(GaN)の実用化が進められている。また、酸化ガリウム(Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)はSiCやGaNと比較して高耐圧・低損失などの性能面で優れており、低コスト化が可能であることから、Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>の実用化に向けた研究も行われている。これらの中でもSiCはエネルギー分野、自動車・電装分野で使用されており、次世代パワー半導体の中では市場が最も大きく今後も拡大が見込まれている<sup>1)</sup>。

金属酸化膜半導体電界効果トランジスタ(Metal-Oxide Semiconductor Field-Effect Transistor, 以下MOSFETという)は、主要なパワー半導体の一つである。SiC MOSFETのうち、電極をウェハー表面に付けるプレーナ型に比べて、電極を埋め込むタイプのトレンチ型の方が小型化・高性能化が可能なる構造であり、さらにダイオードを一体化した構造が主流になりつつある<sup>2), 3)</sup>。図1にSiC MOSFETの構造例を示しており、左側がプレーナ型、中央がトレンチ型、右側がダイオードを一体化した構造である。

チャネル形成する際のイオン注入時の残存欠陥発生を低減するために、SiCでは高温環境下でのイオン注入や注入後の超高温アニール処理が行われている。SiC中に、それら処理で発生する点欠陥、転位、積層欠陥などの結晶欠陥が残存すると、オン抵抗やリーク電流が増加するなどデバイス特性に悪影響を与える<sup>4)</sup>。

本稿では、トレンチ型SiC MOSFETについて構造、組成、結晶欠陥を評価するために走査電子顕微鏡(Scanning Electron Microscope, 以下SEMという)、透過電子顕微鏡(Transmission Electron Microscope, 以下TEMという)、ラマン分光で分析を行った事例を紹介する。

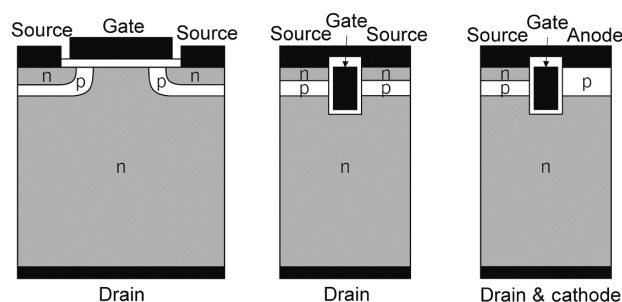


図1 SiC MOSFETの構造  
Fig.1 SiC MOSFET structure

\*1(株)コベルコ科研 材料ソリューション事業部 応用物理技術部 \*2(株)コベルコ科研 高砂事業所 化学分析センター

## 1. 評価に用いたトレンチ型SiC MOSFET

評価用の試料には、市販されている耐圧1,200 VのSiC MOSFETを用いた。評価する際の前処理として研磨およびクロスセクションポリリッシャ (CP) 加工による断面加工を施した後に、SEM観察およびラマン分光による測定を行った。さらに、加工した断面から集束イオンビーム (Focused Ion Beam:FIB) により小片を抽出し、薄片加工を施してTEM観察を行った。

## 2. トレンチ型SiC MOSFETの構造と組成評価

### 2.1 SEM, TEMによる構造評価

図2 (a), (b) にSEMでの観察結果, 図2 (c) ~ (e) にはTEMによる観察結果を示す。SEM観察からは、トレンチ構造のMOSFETが周期的に並んでいることが確認される。図2 (b) ではトレンチの左側 (青色枠部), およびトレンチ右側の一部 (赤色枠部) が帯状に若干明るいコントラストを示しており、組成差または電位コントラストによる明るさの違いが現れていると考えられる。後述するエネルギー分散型X線分光 (Energy Dispersive X-ray Spectroscopy, 以下EDXという) による分析結果において他のSiC領域と大きな組成の差がなかったことから、明るさの違いは電位コントラストによるものと考えられる。つまり、青色枠部、赤色枠部で明るくなっている部分は電位が低くなっており、p型領域と考えられる。トレンチ左側は上からp/nとなっており、ダイオードが形成されていることがわかる。いっぽう、トレンチ右側は上からn/p/nのMOSFETとなっており、図1右側の構造例と同様の構造となっていることがわかる。また、図2 (b) の赤色矢印部には、ダイオード領域とMOSFET領域を作り分けるためのマスク領域を反映したと思われる段差がある。

次に、TEM観察結果として、トレンチ間の走査型透過電子顕微鏡 (以下、STEMという) による明視野像 (以

下、BF像という) を図2 (c) に示す。また、トレンチ左側を拡大したBF像と高角度散乱暗視野像 (以下、HAADF像という) を、それぞれ図2 (d) と (e) に示している。図2 (d), (e) ではSiC中の結晶欠陥を捉えるために、SiCのa面と呼ばれる結晶面に対して垂直方向から観察できるように試料の傾斜を変更している。ゲート電極とゲート酸化膜は図の奥行き方向に続いており、傾斜を変更したことによりトレンチ側壁が重なって見えている。

STEMによる観察では数nmから原子サイズに近いレベルまで電子線プローブを細く絞り、2次元に走査して各走査位置での透過電子を検出して結像している。散乱角の異なる透過電子を複数の検出器で検出することにより、原子番号コントラストや回折コントラストなどさまざまな情報を得ることができる。

まず、BF像では試料が結晶の場合にはブラッグの回折条件を満たすか否かによって明暗がつく回折コントラストが得られるが、トレンチの左側に粒状の暗い部分が確認された。いっぽう、原子番号に比例したZコントラストが得られるHAADF像では、粒状の若干明るい部分が確認された。HAADF像に比べてBF像のほうが明確なコントラストが得られており、組成差によるコントラストよりも回折コントラストの影響が強いと考えられる。このことから、BF像での粒状の暗い部分は局所的に結晶格子が変化することで回折条件が異なっているものと考えられ、イオン注入による結晶欠陥 (以下、粒状の結晶欠陥という) が存在しているものと推察される。

### 2.2 STEM EDXマッピングによる組成評価

組成評価を行った結果として、STEM EDXマッピングの結果を図3に示す。EDXマッピングは、STEMで電子線プローブを走査する際に、走査位置においてEDX分析を行うことで元素の分布を調べることができる。

EDXマッピングにより、ソース電極にはAl, Ti, Ni, ゲート電極にはSi, ゲート酸化膜にはSi, Oが用いられ

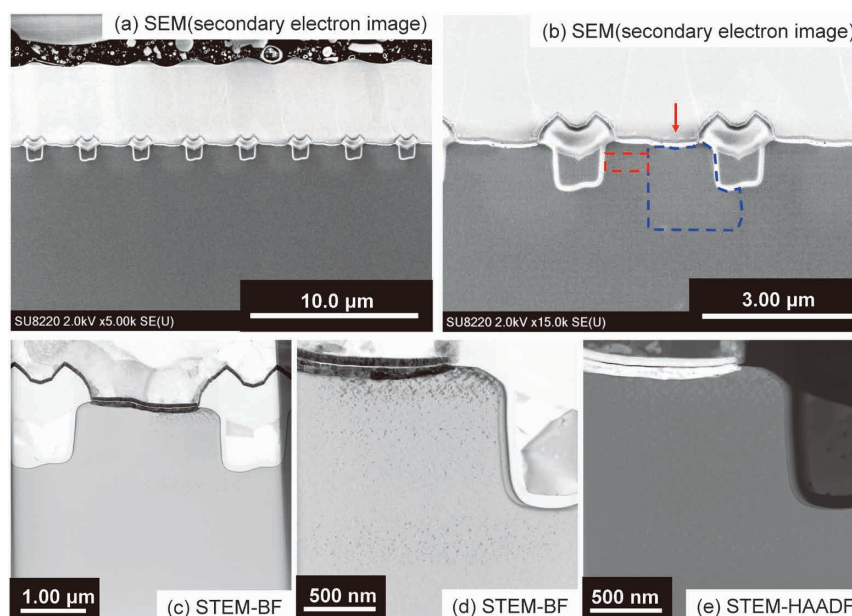


図2 SEM観察結果 (上段), およびSTEM観察結果 (下段)

Fig.2 SEM image (upper) and STEM image (lower)

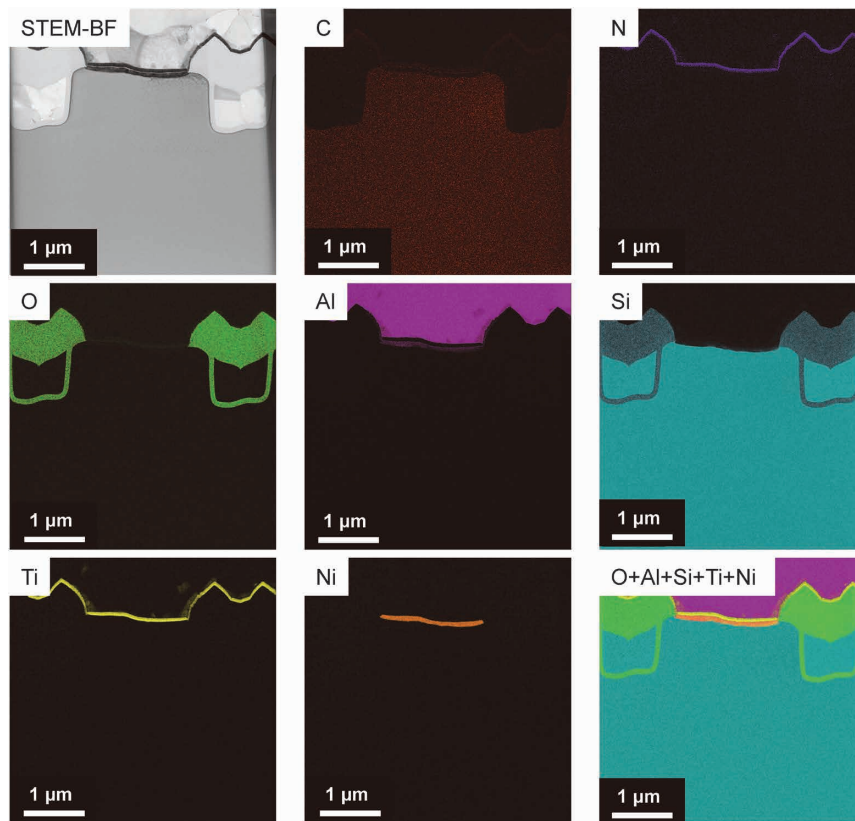


図3 STEM EDXマッピング結果  
Fig.3 STEM EDX mapping

ていることが明瞭に捉えられている。いっぽう、トレンチ周辺にイオン注入されたであろう不純物の分布は確認されず、不純物濃度がEDXの検出下限値より低くなっていると考えられる。

### 3. トレンチ型SiC MOSFETのひずみ評価

STEMによる観測結果でトレンチ横のSiC中に粒状の結晶欠陥が存在することが示唆されたため、SiC中のひずみの評価としてラマン分光およびSTEMによる解析を行った。それぞれの手法は分解能が異なり、両手法を用いることでマルチスケールでの評価が可能となる。

#### 3.1 ラマン分光によるひずみ解析

トレンチ型SiC MOSFETにおける応力・ひずみの評価を目的に、SEM、STEMと同様に断面方向からラマン分光による解析を行った。ラマン分光は、入射光と異なる振動数をもつ散乱光（ラマン散乱光）を解析することで、分子構造や結晶構造に関する様々な情報を得ることができる手法である。半導体分野においては、材料組成、結晶性、応力、不純物や欠陥、キャリア濃度、面方位などの情報が得られることから、その活用が進んでいる。圧力や応力が加わった結晶には構造のひずみが生じ、原子間距離の変化に伴い格子振動の周波数が変化して、スペクトルのピーク（以下、ラマンピークという）の波数がシフトする。具体的には、指標となるラマンピークは引張応力に起因するひずみに対して低波数側、圧縮応力に起因するひずみに対して高波数側にシフトすることが知られている。このピークのシフトを精密に解析することで、応力の分類や大きさ、分布の評価を行うことがで

きる。

いっぽう、4H-SiCのように異方性のある結晶は、観測されるラマンスペクトル（振動モード）が測定配置によって異なり、得られる情報も変化する。4H-SiCでは、いくつかの振動モードが観測されるが、c面に平行な振動モードとしてFTO(2/4)E<sub>2</sub>モード、およびc面に垂直な振動モードとしてFTO(0)A<sub>1</sub>モードを応力の評価に用いることができ、対応する方向の応力状態を表しているとの報告がある<sup>5)</sup>。各振動モードについての詳細は、説明が複雑になるため、ここでは触れず専門書に譲る。

2種類の偏光測定によって得られたラマンスペクトルと応力分布のラマンイメージを図4に示す。上段がFTO(2/4)E<sub>2</sub>モード、下段がFTO(0)A<sub>1</sub>モードについての解析結果である。別途測定した無応力の4H-SiCから検出されたラマンピークの波数（FTO(2/4)E<sub>2</sub>モード：775.6 cm<sup>-1</sup>、FTO(0)A<sub>1</sub>モード：781.7 cm<sup>-1</sup>）を基準として解析した結果、測定領域内では全体に圧縮応力がかかった状態であると考えられる。また、ラマンイメージ内の下側から上側にかけて圧縮応力がより強くなる傾向が見られ、さらに圧縮応力がトレンチの左側で強くなっていることが確認された。これらの結果から、SEMでの電位コントラストやSTEMで粒状の結晶欠陥が確認された領域において圧縮応力が強くなっていることがわかり、イオン注入による結晶欠陥やひずみが残存していることが示唆された。このように、ラマン分光は応力の詳細な状態を視覚的に捉えることができる点で有効な手法であるといえる。

### 3.2 4DSTEMによるひずみ解析

ラマン分光に続き、4D（4次元）STEMを用いたひずみ解析を試みた。4DSTEMは近年盛んに開発されている手法であり、電子線プローブを走査させた際に各分析位置で電子回折パターンを取得する。得られるデータが2次元配列上の各ピクセルに電子回折パターン（2次元画像）を格納した4次元データとなることから、4DSTEMと称される。

電子回折パターンは、試料中の結晶状態を反映したデータを得ることができる。パターン内のスポット間距離を解析することで格子面間隔がわかるため、格子面間隔を比較することで局所的なひずみを評価することが可能となる。

4DSTEMのデータ取得のイメージを図5に示す<sup>6)</sup>。試料中で回折した電子線がカメラ（または専用の検出器）上に電子回折パターンとして投影され、各分析点での電子回折パターンを連続的に保存することで4次元データ

が構築される（図5左側）。取得した多数の電子回折パターンから各分析点の結晶性或格子面間隔を確認できるだけでなく、任意領域のデータを抽出することでHAADF像やBF像に相当する像を再構築することもできる（図5右側）。

4DSTEMより得られたひずみマップを図6に示す。図6(c)の(1-10)面のひずみマップではトレンチ横で圧縮ひずみが確認され、画像の上側から下側に向けてひずみが小さくなっていることがわかる。図6(d)の(004)面のひずみマップでは、図4のラマンイメージで見られたようなトレンチ間から深さ方向にかけてのひずみは見られなかった。この結果から、試料を薄片化する際に応力が緩和された、または薄片化試料のわずかな湾曲が影響している可能性が考えられる。

また、図6(d)に青色で示した楕円部と矢印部において、細かな圧縮ひずみが確認された。この細かなひずみはSTEM-BF像で見られた粒状の結晶欠陥に相当する

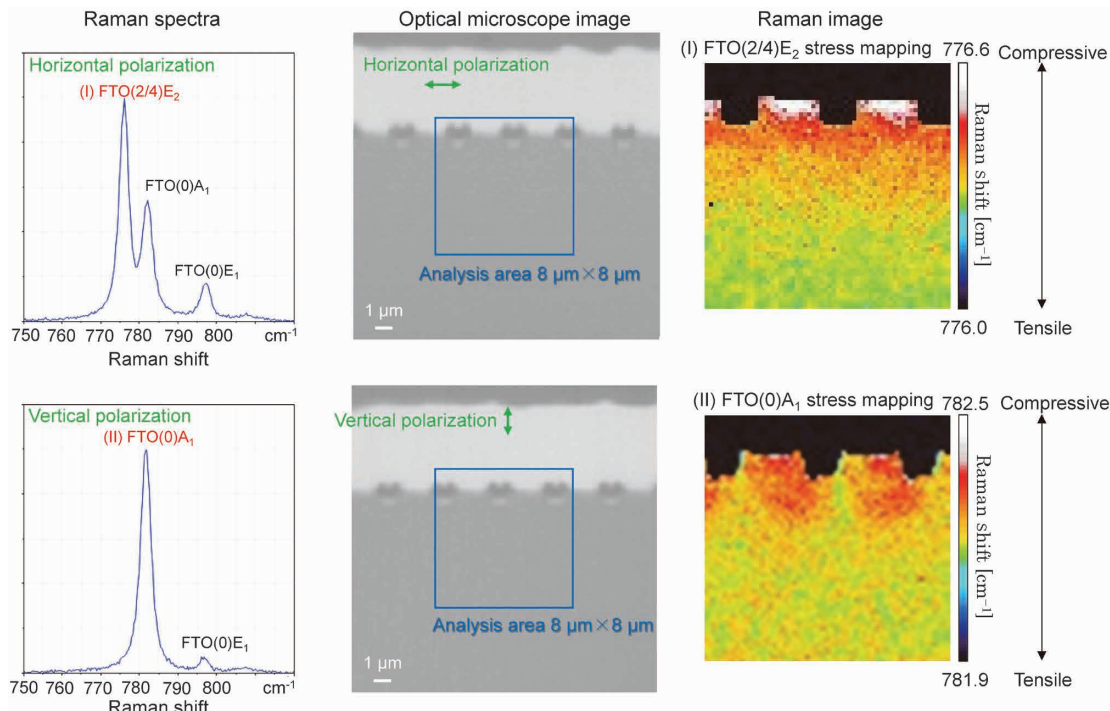


図4 ラマンイメージ評価結果  
Fig.4 Raman imaging

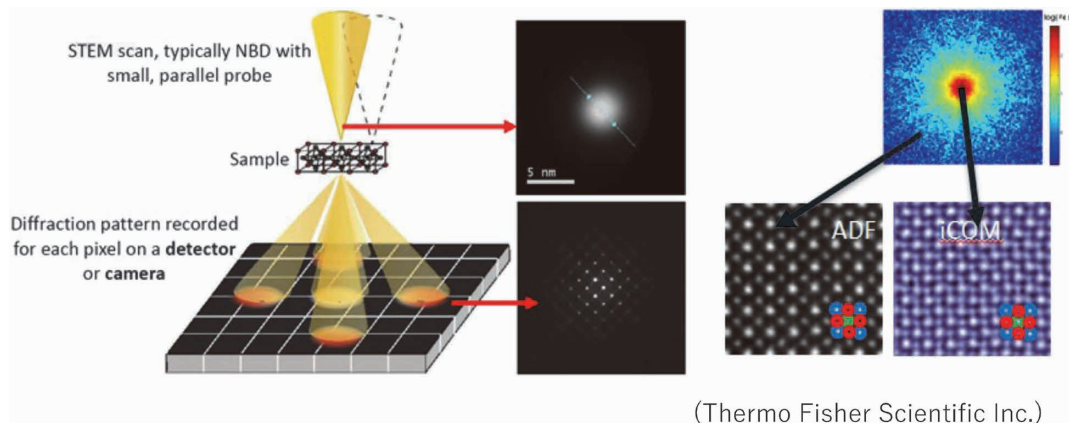


図5 4DSTEMのデータ取得のイメージ<sup>6)</sup>  
Fig.5 Experimental 4DSTEM measurement<sup>6)</sup>

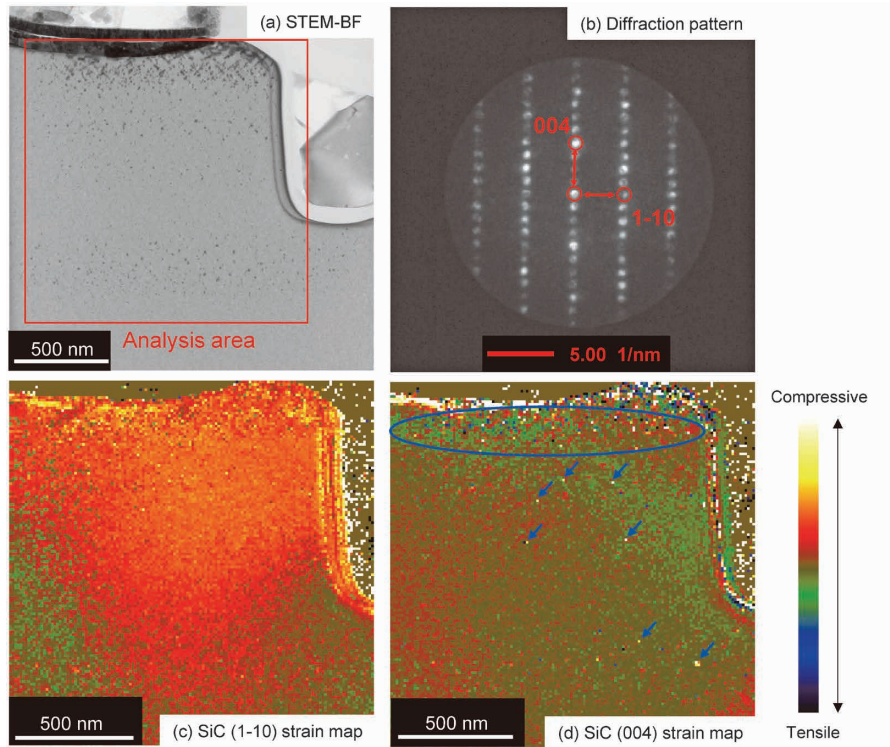


図6 4DSTEMから得られたひずみマップ  
Fig.6 Strain maps obtained from 4DSTEM

と考えられ、分解能の違いによりラマンイメージでは捉えられなかったひずみを捉えられている可能性がある。

### 3.3 STEMモアレ法によるひずみ評価結果

4DSTEMにて捉えられた細かなひずみをさらに解析するために、STEMモアレ法によるひずみ解析を行った。モアレは、周期が近い二つの格子が重なるときに縞模様が現れる現象である。STEMでのモアレは、STEMの走査線と試料の結晶格子が2つの格子として用いられ、走査間隔と結晶格子幅が近いとモアレが観察される。結晶格子幅は試料中の結晶や方位により異なるため、走査間隔を調整することで意図的にモアレを発生させることができる。

モアレの例として、通常のSTEM-BF像を図7 (a)、また同視野のモアレを含む像を図7 (b)に示す。図7 (c)は、左側の格子を結晶格子、右側の格子をSTEMの走査線に見立てたモアレの模式図であり、重なった部分にモアレ縞が現れているのがわかる。モアレ縞の間隔は格子と走査間隔の比および方向によって決まることから、結晶中にひずみが存在するとモアレ縞の間隔が変化するため、モアレを解析することで格子ひずみの分布を調べることができる<sup>7)</sup>。

図8は、STEM像で結晶欠陥が多く確認された電極付近で取得したひずみマップである。図8 (a)がSTEM-BF像、図8 (b), (c)がモアレの解析により得られたひずみマップであり、図8 (d), (e)はBF像とひずみマップを重ねた画像を示している。粒状の結晶欠陥の周辺にひずみが存在し、一部分でひずみが強くなっていることが確認できる。

図9 (a)にモアレ解析を行った領域で拡大観察したSTEM-BF像、図9 (b)にBF像の高速フーリエ変換 (以

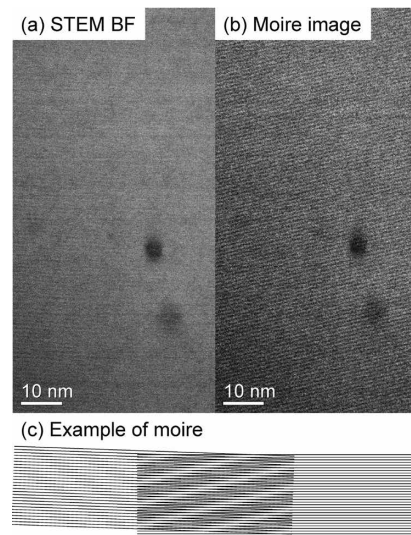


図7 モアレ縞を含むSTEM BF像およびモアレ縞の模式図  
Fig.7 Moire image and example of moire

下、FFTという)パターン、図9 (c)に逆FFT像を示す。逆FFT像はFFTパターンにおいて赤矢印部のスポット周辺にマスクをかけて逆FFTを行った結果であり、転位が確認された箇所を⊥マークで示している。粒状の結晶欠陥内に転位が確認され、余剰な原子面が存在していることがわかる。したがって、粒状の結晶欠陥は余剰な原子面が存在することによる整合ひずみであると推察される。

このことから、モアレ法による解析で部分的にひずみが強くなっていた要因は、転位の存在であると考えられる。また、4DSTEMによるひずみマップで確認された細かなひずみも、転位が存在することで局所的にひずみが大きくなっているものと考えられる。

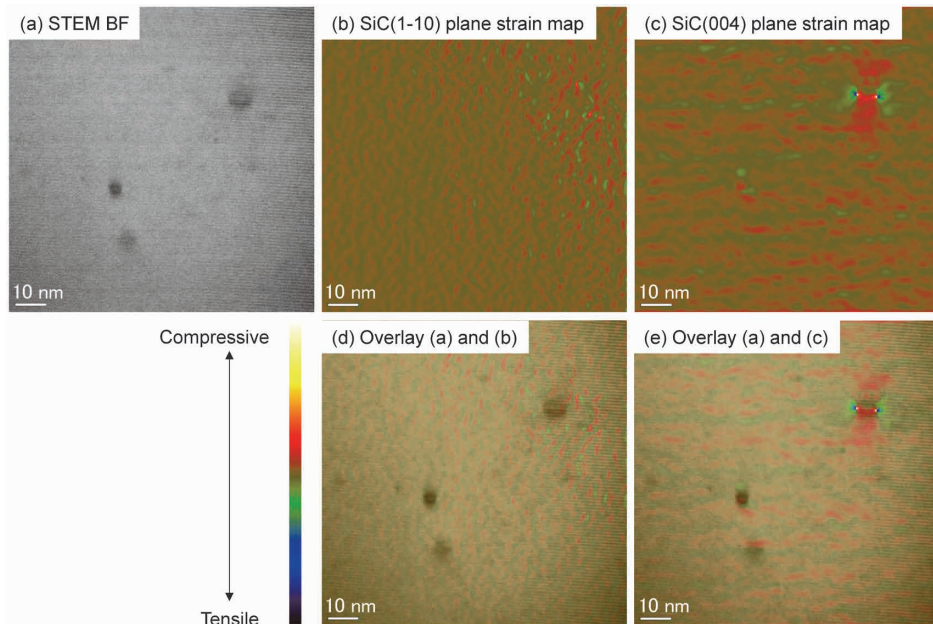


図8 STEM BF像およびモアレ法によるひずみマップ  
Fig.8 STEM BF and strain maps obtained from moire

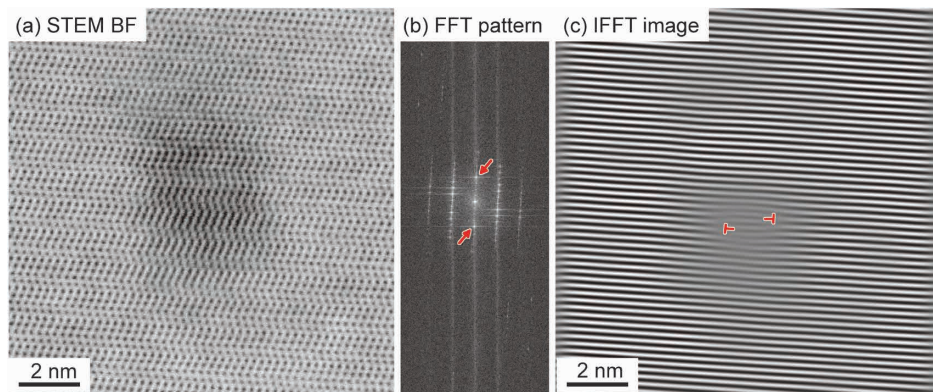


図9 原子分解能STEM観察結果  
Fig.9 Atomic resolution STEM images

むすび=トレンチ型SiC MOSFETに対して今回実施した分析手法について、それらの分析領域を図10に示した。複数の分析を行うことで、光学顕微鏡レベルからnmレベルまでの、マルチスケールでの構造、組成、ひずみを評価することができた。評価を行ったデバイスに対して複数の分析手法を適用することで、イオン注入の影響を反映する結果が得られ、TEMでは微小なひずみが多数存在することによってマクロなひずみが大きくなっていることを示唆する結果が得られた。また、これらの手法を組み合わせることで、欠陥がどこにどのように残存するかの調査に有効であることが確認できた。

SiCは今後も開発、実用化が進むと考えられ、欠陥の評価はさらに重要になることが予想される。また、不良解析においては、SEMやTEMを用いた構造と組成の分析は有用な調査ツールとなり得る。これらの評価を目的に合わせて提案・実施することで、パワーデバイスの開発・実用化に貢献したい。

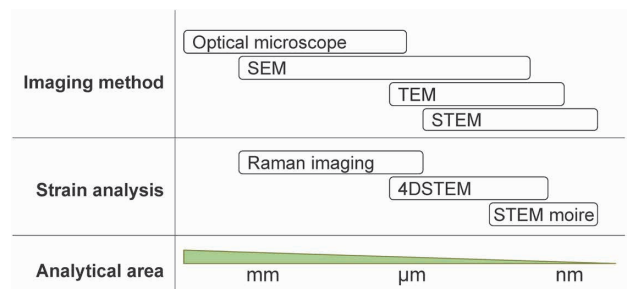


図10 分析手法と分析領域  
Fig.10 Analytical method and area

参考文献

- 1) 経済産業省、「次世代デジタルインフラの構築」プロジェクトに関する研究開発・社会実装計画(案)の概要. 2021, [https://www.meti.go.jp/shingikai/sankoshin/green\\_innovation/industrial\\_restructuring/pdf/004\\_03\\_00.pdf](https://www.meti.go.jp/shingikai/sankoshin/green_innovation/industrial_restructuring/pdf/004_03_00.pdf), (参照2022-04-13).
- 2) 菅原勝俊ほか. 三菱電機技報. 2016, Vol.90, No.5, p.15-18.
- 3) 玉祖秀人ほか. SEIテクニカルレビュー. 2018, No.192, p.97-101.
- 4) 土田秀一ほか. 日本結晶成長学会誌. 2013, Vol.40, No.1, p.33-41.
- 5) 佐々木美幸ほか. こべるにくす. 2021, No.52, p.17-20.
- 6) Thermo Fisher Scientific Inc. EMPAD-application-note. 2017, <https://assets.thermofisher.com/TFS-Assets/MSD/Application-Notes/empad-application-note.pdf>, (参照2022-04-13).
- 7) 近藤行人ほか. 顕微鏡. 2014, Vol.49, No.3, p.226-230.