



半導体材料の解析について～ワイドギャップ材料を中心に～

1. 半導体材料の現状と展望

Si半導体のLSI製造プロセスが10nmルールに近づき、ムーアの法則が限界を迎える中、3次元構造化など新たな取り組みが始まっています。一方でブロックチェーン技術や自動運転技術の発展に伴い、膨大な量の半導体デバイスが要求される時代に突入しつつあり、21世紀はまさに“半導体の世紀”と言っても過言ではありません。表1には各種半導体材料の物性値を示しました。Si以外では、SiC、GaN、AlNなどのワイドギャップ半導体材料が、大きな絶縁破壊電圧や優れた熱伝導性能を有し、Siに替わる次世代半導体材料として注目されています。近年特にSiC半導体のパワー制御への応用技術開発が進み、鉄道やEV、HEVの電力制御分野などでSiCパワーイ

ンバーターの適用が見込まれています。

ワイドギャップ半導体は図1に示す閃亜鉛型とウルツ鉱型構造を基本とし、両者が一定の周期で様々に積層することで多様な結晶多形を示します。特にSiCでは数十種に上る多形が報告されており、その中でも図2に示す4Hと呼ばれる4層周期の六方晶構造が、その優れた電気特性(高耐圧、高電子移動度)から再重要なワイドギャップ半導体材料と言えます。図3は4H-SiCの高分解能顕微鏡像で、実際に図2に示した積層構造が原子レベルで確認できます。NSSTでは、Si半導体の微量不純物分析やデバイスの性状解析、欠陥評価をはじめとし、最近ではSiCの解析にも注力しています。本稿ではSiCを中心に最近の取り組みを紹介します。

2. 半導体の解析ツール

NSSTでは、FIB(集束イオンビーム加工)とTEM/STEM(透過型/走査透過型電子顕微鏡)を組み合わせた局所構造解析、ラマン分光、AFM(原子間力顕微鏡)をはじめとする各種の解析技術で総合的にSiCの解析に取り組んでいます。TEMはデバイスの界面性状や転位や積層欠陥の解析に、ラマン分光は多形の同定や歪の解析に、SPMは結晶成長表面のモロロジーの解析に使用できます。他にもX線光電子分光(XPS)、オージェ電子分光(AES)などの表面分析装置や二次イオン質量分析(SIMS)も半導体の界面構造の解析に活用できます。以下SiCへの適用事例の一部を紹介します。

表1 各種半導体材料の物性値

材料	Si	4H-SiC	GaN	AlN
バンドギャップ(eV)	1.12	3	3.39	6.2
電子移動度(cm ² /Vs)	1400	1000	900	300
絶縁破壊電界強度(V/cm)	3.0x10 ⁵	2.5x10 ⁶	3.3x10 ⁶	1.2x10 ⁷
熱伝導度(W/cmK)	1.5	4.9	2	2.9
飽和速度(cm/s)	1.0x10 ⁷	1.9x10 ⁷	2.7x10 ⁷	1.9x10 ⁵
デバイス応用	全般	縦型パワー素子	発光素子横型パワー素子	紫外発光素子

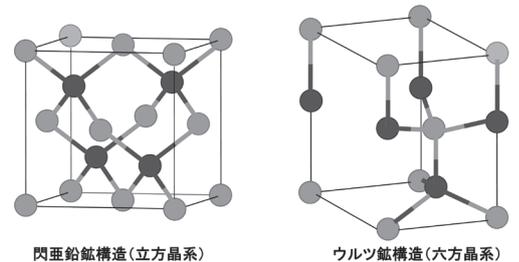


図1 ワイドギャップ半導体の基本構造

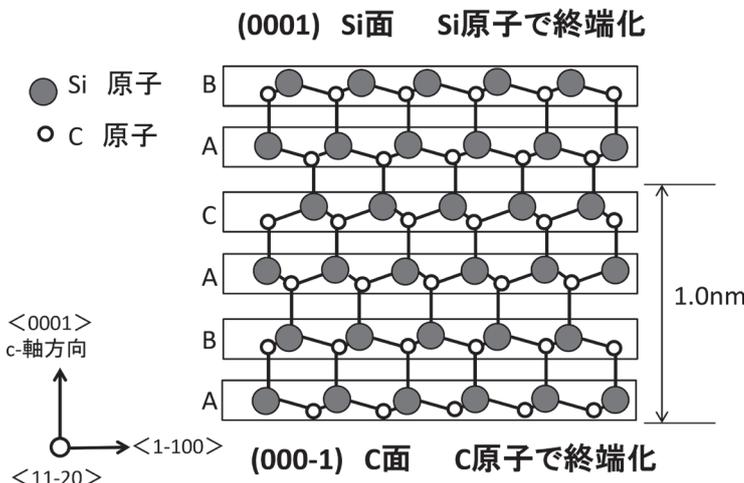


図2 4H-SiCの結晶構造
(0001)面には化学的性質の異なるSi面とC面が存在し、結晶成長挙動も両面で異なる。

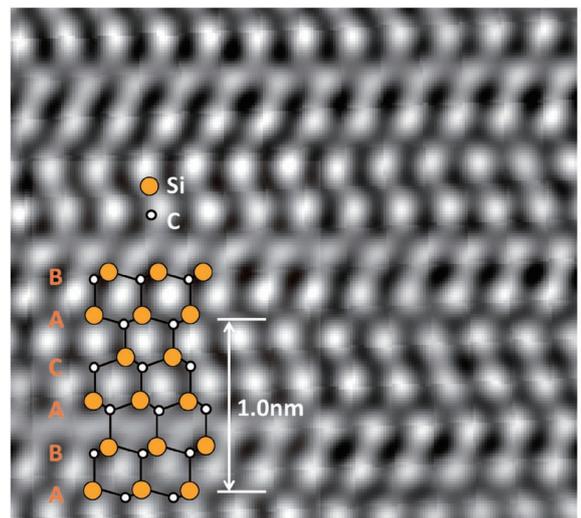


図3 4H-SiCの高分解能透過型電子顕微鏡像
4層の周期構造が確認できる。

3. SiC 半導体の事例

・ SiC 研磨面のラマン分光による歪分布解析

図4には昇華法で合成した4H-SiC結晶Si面の解析結果を示しました。4H構造に起因するラマンピークとその一つのピークシフト量のマッピング像で、研磨傷周辺にピークシフトが大きく歪が大きい領域が存在することがわかります。このような基板の歪はその後のエピ成膜品質に影響するので、その把握は重要となっています。

・ SiC結晶成長初期過程の断面TEM観察

図5は溶液成長において種結晶基板と成長結晶の界面をTEM観察した結果です。これは種結晶基板の表面清浄度が悪く、成長結晶の結晶性が低下した場合の界面で、基板の汚染により周期構造を成長結晶が引き継げず成長初期に層状に多形の乱れた領域が存在することがわかります。その後の検討で成長初期に種結晶表面をわずかに溶

かさせ清浄面を出すことで、多形の乱れが解消されることが判明しました。

・ オーミックコンタクト界面性状のTEM観察

図6は溶液成長法で作成した4H-SiC基板のC面にNi(5nm)を堆積し、RTA(急速熱処理)でオーミックコンタクトを形成した素子の界面構造です。FIB加工により界面を薄膜化しTEM観察を行った結果を示したものです。NiがSiCと反応し界面にNi₂Siと同定できるNiシリサイドが形成されていることがわかります。図7は図6と同様な場所のSTEM-EDS(エネルギー分散分光)分析結果で、Ni元素およびSi元素の分布を示したものです。分布の偏りから、Niシリサイドの形成がある程度不均一であることがわかります。こうしたシリサイド形成挙動がオーミック特性に影響を与えると考えられています。

・ SiC結晶成長表面のAFM観察

高品質のSiC結晶を得る上で、成長表面

のナノスケール観察から成長の機構を推定することは重要です。昇華法、溶液法、気相成長問わずSiCはc面上のステップフローにより成長していることが知られています。図8は溶液成長結晶の表面観察結果で、らせん成長中心近傍でのステップ構造が明確に表れています。結晶成長はらせん中心を有するいくつかのドメインの合体・消滅を経て進行することが知られていますが、個々の成長中心の性質や合体・消滅の詳細な機構は未だ明らかになっておらず、このようなナノスケールでの観察により知見を集積していくことが重要です。

4. 今後の展望

NSSTではSi半導体をはじめ、今後ますます重要性を増す各種のワイドギャップ半導体材料の評価・解析サービスに積極的に取り組む予定です。ご要望をお気軽にご相談下さい。

(亀井 一人)

kamei-kazuhito@nsst.jp

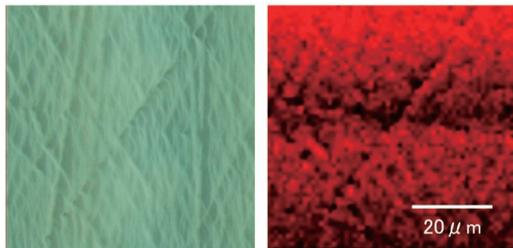


図4 ラマン分光によるSiC研磨面の歪マッピング
(a)光学顕微鏡像、(b)776cm⁻¹に中心を持つ主ピーク位置の平均値からのズレを視覚化したもの、研磨傷の位置で大きなコントラスト変化がある。

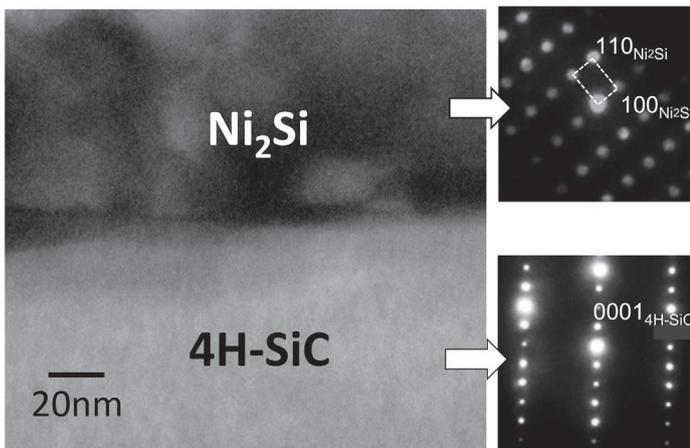


図6 Ni/SiC オーミックコンタクト界面の断面TEM像と対応する電子線回折図形熱処理によるNi₂Siの形成が観察できる。

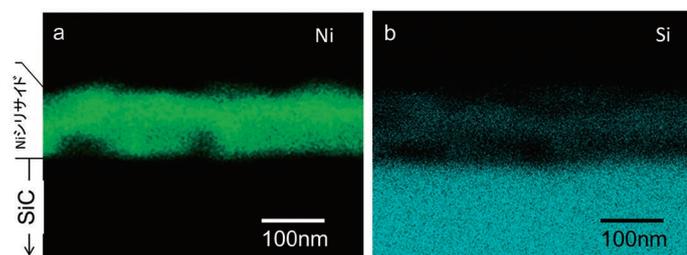


図7 Ni/SiC オーミックコンタクト界面のSTEM-EDSマッピング像
(a)Niの分布、(b)Siの分布、Niシリサイドの形成が不均一であることがわかる。

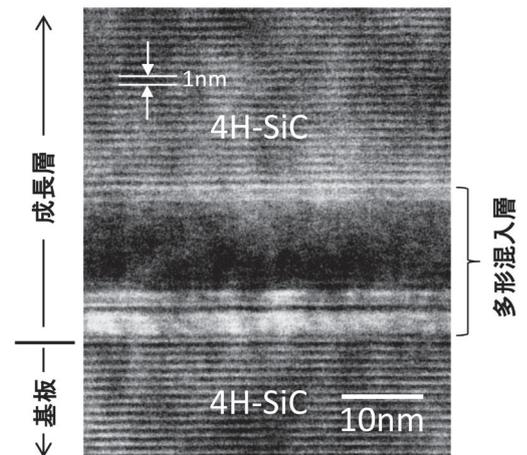


図5 溶液成長界面の断面TEM像
基板のメルトバックないと成長層/基板界面に多形が混入。(格子像は(0001)_{4H-SiC} 面間隔1nmに対応)

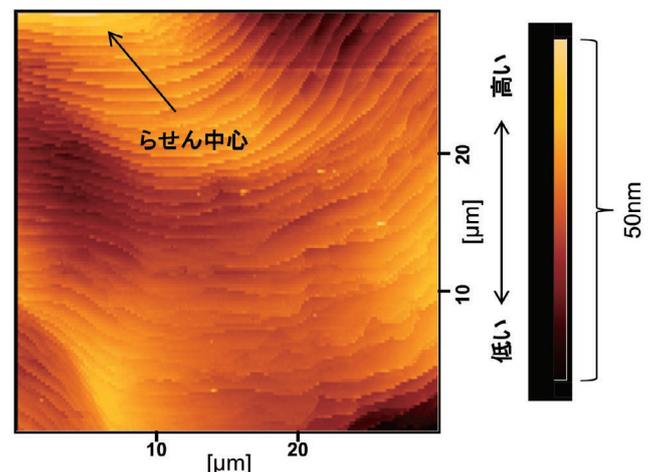


図8 溶液成長SiC結晶表面のステップのAFM観察事例
画像左上方向に存在するらせん中心から放出されたステップを観察したもの