

SiC レクチャーシリーズ

5. SiC の結晶欠陥

SiC の結晶欠陥

SiC の結晶中には様々な欠陥が存在し、デバイスの特性に影響を与えるものがあります。SiC の欠陥の主なものとして、マイクロパイプ、結晶粒界、ポリタイプインクルージョン^{※1}、カーボンインクルージョンなどの大形欠陥、積層欠陥(SF、Stacking Fault)および刃状転位(TED、Threading Edge Dislocation)、螺旋転位(TSD、Threading Screw Dislocation)、基底面転位(BPD、Basal Plane Dislocation)とこれらの複合体の混合転位があります。密度は、最近の比較的品质の良いもので、マイクロパイプが1~10個/cm²、転位の密度が10³~10⁴個/cm²程度の値であり、いまだSiと比較してSiCの欠陥密度は大きいという認識です。

マイクロパイプは変位の非常に大きな螺旋転位と考えられ、中心に空洞が存在します。また、カーボンインクルージョンはバルク結晶の成長の過程で異物の炭素埃が埋め込まれたもので、高密度の転位の発生源となります。これらはデバイスにとって致命的な欠陥です。

図1に8°オフ(0001)4H SiC基板の表面を溶融した水酸化カリウム(溶融 KOH)によりエッチングし、結晶欠陥部分にピットを形成したものの顕微鏡写真を示します。転位線が表面に対し垂直方向に伸びているものは結晶の対称性を反映し、エッチングにより六角形状のピットが現れます。他方、基底面転位は(0001)面内(表面に並行方向)で転位線が様々な方向に伸びたものであり、現れるピットは長円形となります。螺旋転位には結晶のずれの大きさが異なるものが複数存在します。結晶のずれの大きな螺旋転位や混合転位はデバイスにリーク電流を発生させることがあります。小形の転位についてはデバイスの特性に影響を与えないものが多数を占めています。

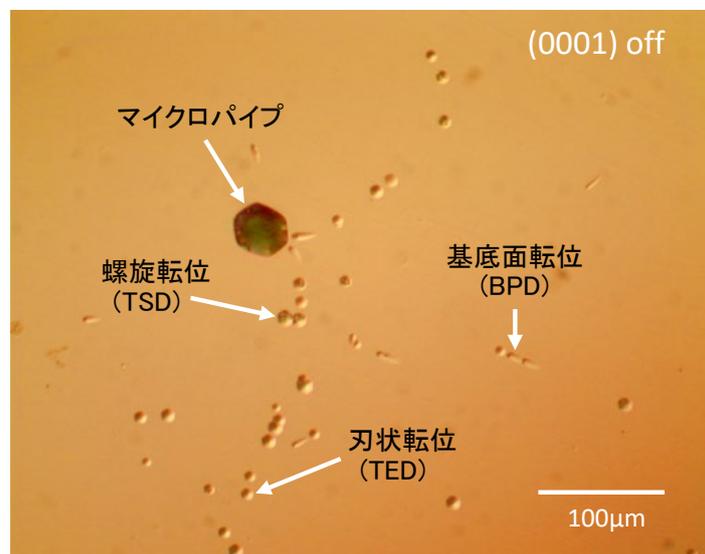


図1 SiC基板表面の溶融した水酸化カリウム(溶融 KOH)によるエッチピット^{※2}写真

基底面転位の構造を詳しく見ると、二本の部分転位(ショックレー部分転位^{※3})に囲まれた線状の構造を持っています。基底面転位については、SiCデバイスにバイポーラ電流が流れた際に、二本の部分転位で囲まれた領域が積層欠陥として拡張し、抵抗の増加などのデバイス特性の劣化を生じさせる原因となります。

図 2 により、バイポーラ電流が流れた際の積層欠陥の拡張の様子を説明します。

- (1) SiC 基板中に存在する基底面転位がドリフト層中にも引き継がれて存在します。
- (2) バイポーラ電流が流れることによりドリフト層中の電子と正孔が基底面転位に捕獲されます。
- (3) 捕獲された電子と正孔が再結合し、エネルギーを放出します。放出されたエネルギーにより部分転位が移動し、移動した部分に積層欠陥が形成されます。積層欠陥部分は、さらに電子と正孔を捕獲するため、部分転位の移動(積層欠陥領域の拡張)が続きます。積層欠陥が形成された領域は高抵抗領域として作用します。

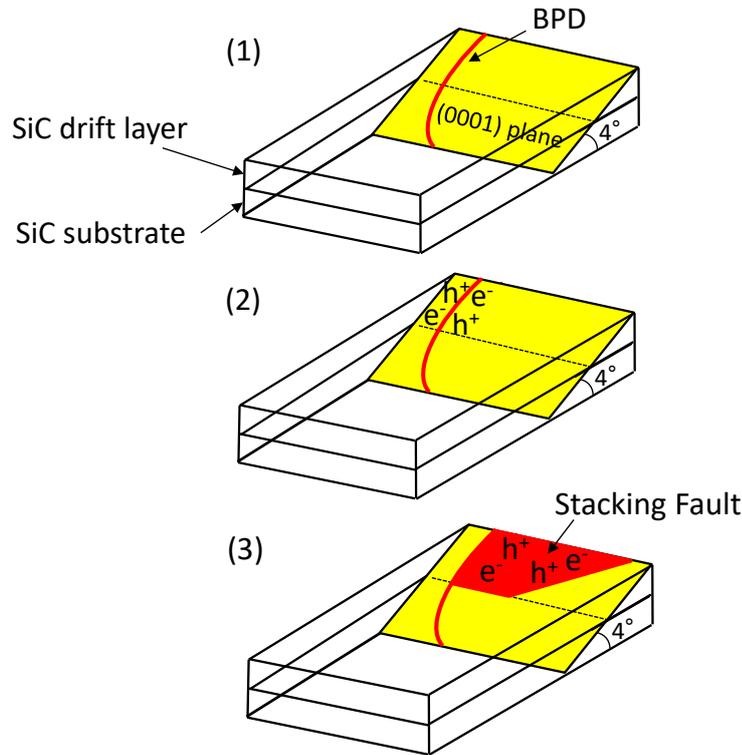


図 2 基底面転位から積層欠陥が形成される様子

高濃度の n 型領域では、電子、正孔の再結合寿命が短いため、バッファ層や基板の正孔密度は小さくなります。このため、積層欠陥の拡張はドリフト層中で生じます。また、積層欠陥には結晶学的に安定な(移動しない)境界が存在します。このため拡張した積層欠陥領域は特徴的な矩形あるいは三角形状となることが多いです。

ドリフト層中の基底面転位はエピ成長の条件を適切に設定することにより、大幅に低減することが可能です。今日の SiC エピウエハは適切なバッファ層を形成することによってドリフト層中の基底面転位の密度は大幅に低減されています。

SiC にイオン注入を行った際にも結晶欠陥が生成されます。図 3 に SiC に高濃度の Al をイオン注入し、アニールを行った後の断面 TEM 像を示します。図 3 の(1)に見られるように Al を注入した領域に歪により黒く見える欠陥が高密度で存在していることがわかります。高温アニール後も結晶は完全には回復していません。図 3 の(2)に欠陥部分を拡大した高分解能 TEM 像(格子像)を示します。

4層で一周期(周期は1nm)の構造が認められ、4H型SiCであることを示します。図の矢印で示した箇所に一層分の余分な層が挿入されており、フランク型の積層欠陥^{※4}が形成されています。この部分については、注入元素のAlなどが層状に集まり、積層欠陥を形成していることが分かっています。

イオン注入による欠陥はキャリアの再結合中心として作用することが知られており、例えばSiCのpnダイオードでは蓄積電荷を減少させリカバリー電流を低減します。最近、イオン注入による欠陥をSiC MOSFETのボディダイオードの通電劣化を抑制するための手段として用いる試みもなされています。

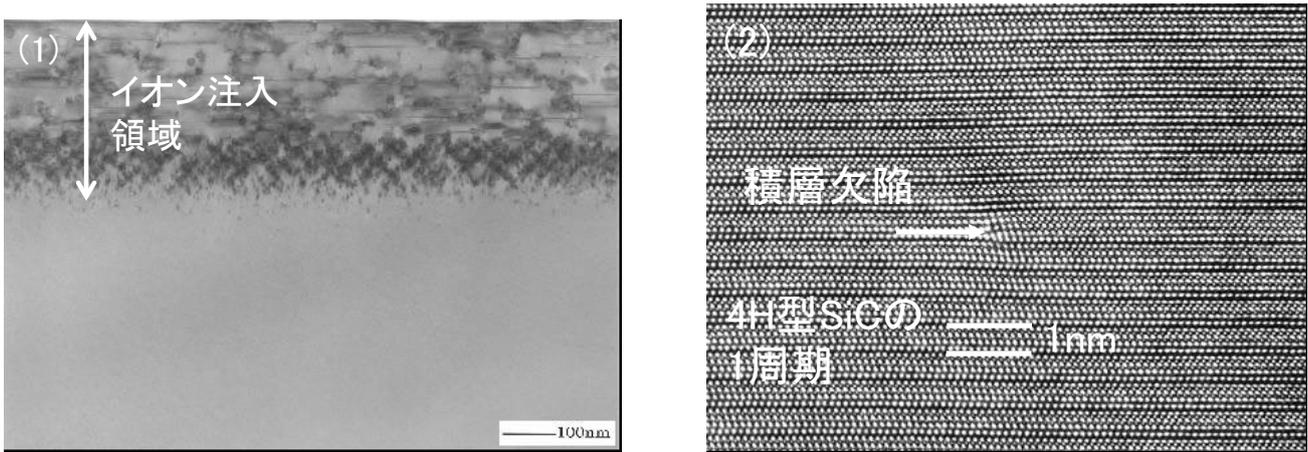


図3 イオン注入により形成された結晶欠陥のTEM像(左)、欠陥部の高分解能像(右)

以上
2025年1月

[用語の解説]

※1: ポリタイプインクルージョン

SiC単結晶中に、その単結晶とは異なる形の結晶(異種ポリタイプ)が部分的に混入し、欠陥を形成しものをいいます。

※2: エッチピット

結晶表面を化学薬品でエッチング処理することで、転位などの欠陥部分に現れる表面のピットです。

※3: ショックレー部分転位

面欠陥の一種である、ショックレー型の積層欠陥の周囲に現れる線状の欠陥のことをいいます。

完全転位よりも原子の変位が小さく、結晶内で動きやすい性質をもちます。

※4: フランク型の積層欠陥

面欠陥である積層欠陥の一種で、原子層の挿入、あるいは、欠損により、原子の積層順が周囲とは異なる欠陥をいいます。

ショックレー型の積層欠陥とは異なり、通常は動きません。