最近の研究

放射光を利用したベルク・バレット法による 4H-SiC 中の転位の観察

松畑洋文11山口博隆21

1. はじめに

地球温暖化抑制を目的とした電力エネルギーの効率の良い 利用が社会的に要請されている.日本全国の電力変換器を Siによるものから4H-SiCに置き換えると約580万kW,原 子炉約5から6基分の電力の節約が見込まれ、4H-SiCパワ ーデバイスの開発が期待されている(1).しかしながら,現在 の4H-SiC ウエハは格子欠陥を含んでおり、またデバイスプ ロセスにより格子欠陥組織が変化したり、新たに格子欠陥が 導入されることがある. デバイスプロセスによる格子欠陥組 織の変化や、それらのデバイス特性への影響を調べることは 重要である.X線トポグラフ法は、ウエハの全面やデバイ ス全体に含まれている転位や積層欠陥などの格子欠陥の観察 が容易に可能な手法である.我々は、単色化したX線を用 いて図1に示す様な斜入射のブラッグ・ケースのX線トポ グラフ法,いわゆるベルク・バレット法により,4H-SiCウ エハの表面近傍、エピ膜成長に伴う欠陥構造の変化、デバイ ス内部の転位や積層欠陥とデバイスの特性との関係の調査を 行ってきた. ベルク・バレット法の利点は, ウエハの表面近



図1 放射光を利用したベルク・バレット法の実験の 配置図.

傍やエピ膜中のみ,あるいはウエハ表面に作製されたパワー デバイスの内部の格子欠陥を選択的に観察することが可能 で,ウエハの内部に多量に存在している転位や積層欠陥など のコントラストに妨げられないことである⁽²⁾.本手法では, 転位などの格子欠陥の観察を目的としており像の分解能を向 上させるため,ある程度平行性の良い入射 X 線を必要とし ている.平行性を高めると入射 X 線の強度が落ちてしま う.また斜入射のブラッグ・ケースで実験を行う場合,構造 因子が比較的小さな反射を利用しており反射強度が通常の透 過の回折条件の場合と比較すると弱い.これらの実験の要請 を満たすには,光源の強度が強いほど有利であり,放射光の 利用が現実的である.

我々は SiC テクノロジーの産業化で問題となっている幾 つかの課題についてベルク・バレット法を応用して,有意義 な示唆を得ることができた.それらの仕事の過程で,ベル ク・バレット法で観察される転位のコントラストについて整 理し,転位コントラストについてのルールをまとめたので本 稿で解説する.

2. 実 験

実験は、高エネルギー加速器研究機構フォトンファクトリ ー、あるいは九州シンクロトロン光研究センターで行い、 Si(111) 2 結晶分光器による単色化を行った X 線を用い、コ ンピューター制御による 4 軸回転機構、3 方向平行移動機構 を持つゴニオメーターを用いた。斜入射の条件では、X 線 の波長と反射面を選択して、ウエハ表面からの X 線の侵入 深さの調節が可能である⁽²⁾.放射光を利用すると X 線の波 長を任意に選択できるので、侵入深さが調節可能という意味 においても便利である。実験で利用した典型的な波長は

* 国立研究開発法人産業技術総合研究所 先進パワーエレクトロニクス研究センター;1)上級主任研究員 2)主任研究員(〒305-3568 つ くば市梅園 1-1-1 中央第2事業所)

Observation of Dislocations by Synchrotron Berg-Barrett X-ray Topography; Hirofumi Matsuhata and Hirotaka Yamaguchi (Advanced Power Electronics Research Center, National Institute of Advanced Industrial Science and Technology, Tsukuba) Keywords: *Berg-Barrett X-ray topography, 4H–SiC, dislocation, Burgers vecters, synchrotron* 2014年11月25日受理[doi:10.2320/materia.54.279] 0.15 nm 前後,利用した反射は $\bar{1}\bar{1}28$, 11 $\bar{2}8$, 1 $\bar{2}18$, $\bar{2}118$,1 $\bar{1}08$,0 $\bar{1}18$,10 $\bar{1}8$,0008などである. これらの条 件では,X線の侵入深さは5 μ m-80 μ m 程度で変化してい る⁽²⁾.本稿のX線トポグラフでは,X線強度の強い部分が 暗いコントラスト,X線強度の弱い部分が明るいコントラ ストとして示されている.4H-SiCのウエハには第一オリエ ンテーションフラットが[1 $\bar{1}00$]方向,第二オリエンテーシ ョンフラットが[$\bar{1}\bar{1}20$]方向に付けられている.また, [11 $\bar{2}0$]方向へのステップフローによるエピ膜成長に適した 形状にするため,Si面側のウエハ表面は[0001]方向から [11 $\bar{2}0$]方向へ8度または4度あるいは微傾斜の角度でずれ るように切り出されている.このため結晶方位は一意的に定 義されていて,また容易に回折条件を合わせることが可能で ある.実験の詳細については文献(2),(6)に記載されている.

転位の観察結果

(1) 基底面転位半ループのコントラスト

図2(a),(b),(c)は,8度傾斜のウエハのSi面で観察され た半ループ状の転位を示す.図2(d)にこの転位の模式図を 示す. 点Aには貫通刃状転位が存在し,残りの部分は基底 面上に載っている基底面転位の半ループであり、点Dで表 面終端していると考えられる.転位の向き ζ を $A_1 \rightarrow A_2 \rightarrow B$ →C→Dと時計回りに定義した. 図2(c)のg= $\overline{1}108$ のS と表示している部分で転位のコントラストの消失が観察され る.図2(c)の点Sは、基底面転位の半ループのらせん転位 部と考えられg·b=0の条件を満たし、コントラストの消失 が $\mathbf{g} = \overline{1}108$ で観察されている.このことより、図2の半 ループ状の転位のバーガース・ベクトルは±1/3[1120]の いずれかであることが分かる. また図 2(a) $g = \overline{1} \overline{1} 2 8$, (b) g=1128では、点Sでは転位線に沿って非対称なコントラ ストが観察され、この非対称コントラストの逆転が観察され る. 図 2(a) $\mathbf{g} = \overline{1} \overline{1} 28$ では右側が暗く左が明るい. 図 2(b) g=1128では右側が明るく左が暗い.このことより、基底 面らせん転位部では転位に沿って非対称なコントラストが現 れ,その非対称コントラストは,g·b>0あるいはg·b<0 に依存して逆転が観察されることが分かる.図2の転位半 ループのAの部分とDの部分はバーガース・ベクトルの向 きにほぼ直交しているので、これらの部分は基底面刃状転位 である. 基底面刃状転位部はg·b=0を満足していても $\mathbf{g} \cdot (\mathbf{b} \times \zeta) = 0$ を満たしていないので、 $\mathbf{g} = \overline{1} 1 0 8$ でもコント

ラストが現れている⁽³⁾⁽⁷⁾. これらのコントラストの現れ方は 透過型電子顕微鏡の転位コントラストの消失や残留コントラ ストの議論と同じである. 点A付近では転位の向き $(\bar{1}100)$ 方向を向く基底面刃状転位部であり,gを変化させ ても常に暗いコントラストを示している. 点D近傍では転位 の向き ζ は[$1\bar{1}00$]方向を向いている基底面刃状転位部であ り,gを変化させても常に明るいコントラストを示している.

バーガース・ベクトル **b**=1/3[1120]か,あるいは **b**= 1/3[1120]に依存して,これらの点A,あるいは点D近傍 での基底面刃状転位部のうちいずれかの刃状転位部が extra-half-planeの先端部にSi原子が並ぶSiコア刃状転位部 であり、もう一つの基底面刃状転位部が extra-half-planeの 先端部にC原子が並ぶCコアの刃状転位である.

ベルク・バレット法で暗く観察される基底面刃状転位部 を、集束イオンビーム装置(FIB)で切り出し、透過型電子顕 微鏡高分解能像法で観察すると、extra-half plane は表面側 にはなくウエハの奥側に位置していることが分かった.この ことより、暗いコントラストを示す基底面刃状転位はCコ アの基底面刃状転位であり、一方、明るいコントラストを示 す基底面刃状転位はSiコアの基底面刃状転位であることが 分かった⁽⁴⁾. Hirth and LotheのFS/RH conventionのバー ガース・ベクトルの定義⁽⁵⁾⁽⁷⁾を用いると、図2で観察され る半ループ状の基底面転位のバーガース・ベクトルは**b**= 1/3[1120]と一意的に決定できる.

以上より,放射光を用いたベルク・バレット法では、Cコ ア基底面刃状転位,Siコア基底面刃状転位,転位の向きが バーガース・ベクトルと平行および反平行ならせん転位には コントラストに違いがあり、これらより基底面転位のバーガ ース・ベクトルの向きを比較的容易に決定できることが分か った.図3に、b=1/3[1120]の基底面転位のコントラス トを示す.図3(b)のバーガース・ベクトルと転位の向きが 反平行な基底面らせん転位のコントラストは、転位の向きを 図3(a)の場合と同じに設定し、逆向きのバーガース・ベク トルをもつ基底面らせん転位と同一である.上記のルールを 用いると、任意のバーガース・ベクトルのコントラストを推 察することが可能なので、g・b解析を行うことなく、一つあ るいは二つの回折条件、例えばg=1128、と1128の観 察で、バーガース・ベクトルを一意的に決めることが可能な 場合もあることが分かった⁽⁶⁾.



図2 (a) $\mathbf{g} = \overline{1} \overline{1} 28$, (b) $11\overline{2}8$, (c) $\overline{1}108$ の回折条件で撮影したベルク・バレット法による観察像⁽⁶⁾. 図中の白 矢印は回折を起こしている逆格子ベクトルのウエハ表面に投影した向きを示す.

(2) コントラストのメカニズム

上述の議論より,基底面らせん転位では基底面に平行な格子の歪みがコントラストを与えていることが考えられ,基底面刃状転位では主に c 軸方向の歪みがコントラストを与えていると考えられる.さらに, c 軸方向の歪みの向きが C コアと Si コアの基底面刃状転位では逆になっていることが考えられる.

図4はCコアとSiコアの基底面刃状転位の回りの歪みの 状態を模式的に示す. c 軸方向の歪みの向きが逆になるよう に描いている. ベルク・バレット法に現れるこれらの基底面 転位の回りの明暗の歪みの成因について Huang らは結晶格 子の湾曲の効果で説明している⁽⁸⁾.湾曲の効果の他にも結晶 面間隔の変化や、X線の吸収の効果なども取り入れて、な だらかに変化する歪みの効果として議論可能である⁽⁹⁾.図5 はなだらかに歪みが変化する場合の分散面,発散点,ブロッ ホ波の励起の状態を示している.図5(a)は結晶に歪みが無 いときの $\mathbf{g} = \overline{1}\overline{1}28$ がブラッグ条件を満たしている状態を 示している. C コア基底面刃状転位の回りの歪み場では局所 的に図5(b)に示すようにブロッホ波1の励起が大きくなる と推察される.Siコア基底面刃状転位の回りの歪み場では 局所的に図5(c)に示すようにブロッホ波2の励起が大きく なると推察される.X線回折ではブロッホ波2では吸収の 効果が大きく,ブロッホ波1は吸収の効果が小さい.これ



図3 $g = \bar{1}\bar{1}28$ の回折条件を満たしている時の $b = 1/3[11\bar{2}0]$ の基底面転位ループの各部分のコントラストの模式図. (a)バーガース・ベクトルと転位の向きが平行な基底面らせん転位部, (b)バーガース・ベクトルと転位の向きが反平行な基底面らせん転位部, (c)Siコア基底面刃状転位, (d)Cコア基底面刃状転位.これらは観察像のスケッチ⁽²⁰⁾.

らの吸収の効果の違いによってもバックグラウンドより回折 強度が強くなったり、弱くなったりすることが考えられ る⁽⁹⁾.以上は基底面転位のコントラストについての定性的な 考察である.

上記の基底面転位のコントラストとその考察はすべてウェ ハの Si 面側での観察を議論している.4H-SiC ウェハの C 面側での観察では,Si コア基底面刃状転位と C コア基底面 刃状転位のコントラストは逆転すると考えられる.

(3) 基底面転位と貫通刃状転位のコントラスト

両端に貫通刃状転位を持つ基底面転位の観察像をそれぞれ 6つの異なるバーガース・ベクトルについて図6に示す.転 位の模式図を(g)に示す.転位の向きは $A_1 \rightarrow A_2 \rightarrow B \rightarrow C_1 \rightarrow C_2$ とする.図中の黒矢印はバーガース・ベクトルの向き.白矢 印はウエハ表面への投影した $g=\bar{1}\bar{1}28$ の向きを示す.各 図で観察されている貫通刃状転位は独特のコントラストを示 している.図6(b) $b=1/3[\bar{1}\bar{1}20]$ の基底面転位の右端の点 Dの貫通刃状転位部では明るい点の左上と右下に暗い小さ



 図4 (a) Cコア基底面刃状転位と(b) Siコア基底面刃 状転位のベルク・バレット法による観察像.g= 1128での観察像.格子変位の模式図.図中の 白矢印はウエハ表面へ投影したgベクトルの向 きを示している⁽⁶⁾.



図5 (a)結晶に歪みが無く g=1128 がブラッグ条件を満たしている場合の分散面,発散点,ブロッホ波の励起の 状態.(b) Si コア基底面刃状転位の回りの歪み場.ブロッホ波1の励起が大きくなると推察される.(c) Si コ ア基底面刃状転位の回りの歪み場.ブロッホ波2の励起が大きくなると考えられる⁽⁶⁾.



図6 基底面転位とその両端に貫通刃状転位が付いてい る転位.転位の模式図を(g)に示す.転位の向き は $A_1 \rightarrow A_2 \rightarrow B \rightarrow C_1 \rightarrow C_2$ とする.それぞれ6つの 異なるバーガース・ベクトルについて示してい る.図中の黒矢印はバーガース・ベクトルの向 き.白矢印はウェハ表面へ投影した $g = \bar{1}\bar{1}28$ の向き.(a) $b = 1/3[11\bar{2}0]$,(b)b = 1/3[$\bar{1}\bar{1}20$],(c) $b = 1/3[2\bar{1}\bar{1}0]$,(d)b = 1/3[$\bar{2}110$],(e) $b = 1/3[\bar{1}2\bar{1}0]$,(f)b = 1/3[$1\bar{2}10$]の例⁽⁶⁾.

なフリンジが観察される.また左端の点Fの貫通刃状転位 では明るい点の右上と左下に暗い小さなフリンジが観察され る.同じバーガース・ベクトルを持つ貫通刃状転位だが,転 位の向きの違いにより点Dと点Fでの貫通刃状転位のコン トラストは異なっている.図6(a) **b**=1/3[1120]の基底面 転位の右端についている点A部貫通刃状転位の向きは紙面 に侵入する方向に定義されている.一方,図6(b) **b**=1/3 [120]の基底面転位の左端の点Fの貫通刃状転位の向き は紙面から飛び出す方向に定義されている.これらの2つ の貫通刃状転位は転位の向きが逆でバーガース・ベクトルの 向きも逆なので,転位の周りの歪み場は同じであり同様なコ ントラストを示している.同様に,点Cと点Dの貫通刃状 転位のコントラストも同じものが観察されている.

同様に図 6(c)の $b=1/3[2 \bar{1} \bar{1} 0]$ の点 G での貫通刃状転位 と図 6(d) $b=1/3[\bar{2} 1 1 0]$ の点 L での貫通刃状転位のコント ラストはバーガース・ベクトルが逆であるにもかかわらず似 ている.また,点 I の貫通刃状転位と点 J の貫通刃状転位の コントラストは似ている.点G,L の貫通刃状転位のコント ラストは点J,I のものとは似ていない.

同様な特徴が図6(e)と図6(f)の間でも観察される.基底



図7 貫通刃状転位のコントラストの模式図. それぞれ 6つの異なるバーガース・ベクトルについてのス ケッチ.貫通刃状転位の向きは[0001]方向,紙 面から飛び出す方向とする.図中の黒矢印はバー ガース・ベクトルの向き.白矢印はウエハ表面へ の投影した $\mathbf{g} = \overline{1}\overline{1}28$ の向き.(a) $\mathbf{b} = 1/3$ [1120],(b) $\mathbf{b} = 1/3[\overline{1}\overline{1}20]$,(c) $\mathbf{b} = 1/3$ [2 $\overline{1}\overline{1}0$],(d) $\mathbf{b} = 1/3[\overline{2}110]$,(e) $\mathbf{b} = 1/3$ [$\overline{1}2\overline{1}0$],(f) $\mathbf{b} = 1/3[\overline{1}\overline{2}10]$ の例⁽⁶⁾.

面転位に接続していない孤立した貫通刃状転位においても, 転位の向きを定義した場合バーガース・ベクトルをそのコン トラストより議論できることを図6は示している.

Si 面側の観察では貫通刃状転位の向きを[0001]方向, っまり結晶の深い位置から表面,紙面から飛び出す方向に定 義すると, $g=\bar{1}\bar{1}28$ の回折条件では,6つの異なるバーガ ース・ベクトルをもつ貫通刃状転位のコントラストは図7の ように整理可能である.この回折条件では,(a)b=1/3[11 $\bar{2}0$]と(e) $b=1/3[\bar{1}2\bar{1}0]$ のコントラストは類似してお り、また,(b) $b=1/3[\bar{1}\bar{1}20]$ と(d) $b=1/3[\bar{2}110]$ のコン トラストも残念ながら,類似している.これらのまぎらわし い貫通刃状転位のバーガース・ベクトルを分類するには、さ らに他の回折条件での観察が必要である. $g=11\bar{2}8$,g= $\bar{1}\bar{1}28$ のコントラストを比較すると,明確に区別が可能で ある⁽⁶⁾.

(4) 貫通らせん転位

本稿中では、 $\mathbf{b} = \pm [0001], \mathbf{b} = \pm [0001] + 1/3 \langle 11\bar{2} \rangle$ 0〉、 $\mathbf{b} = \pm [0001] + \langle 1\bar{1}00 \rangle$ などの巨大なバーガース・ベ クトルを持ち⁽¹⁰⁾⁻⁽¹²⁾、4H-SiCのc軸に近い方向に向きを持 つ転位を貫通らせん転位と呼ぶことにする.

Siの224非対称反射によって平行化されたX線,波長 0.065 nm を,透過の配置つまりラウエーケースで2020反 射を利用し,ブラッグ条件をすこしはずしたオフブラッグ条 件で,撮影したトポグラフを図8に示す⁽¹²⁾.透過型電子顕 微鏡像と類似の転位の像が観察されている.

図8のS1およびS2は、貫通らせん転位と考えられる転 位のコントラストである.S1ではg・b=0を満たすため貫 通らせん転位の転位線そのもののコントラストは消失してい るが、貫通らせん転位の両端のウエハ表面終端部では、転位 の回りの弾性応力が解放され格子歪みが新たに発生し暗いコ ントラストが観察されている.この表面での応力解放による コントラストは数10ミクロンの範囲に及んでいる.TEはウ エハの両面の終端部では、転位の回りの弾性応力の解放によ る歪みのコントラストは明瞭には観察されていない.この転 位は貫通刃状転位であると考えられる.BPは基底面転位で ある.S2と表示された転位はウエハの両面の終端部で弾性 応力の解放による格子の歪みによるコントラストがついてい る.また,同時にTEと同じ線状のコントラストがついてい ることより,S2の転位のバーガース・ベクトルは**b**=



図8 透過の配置, ラウエーケースのX線トポグラフ. 2020の反射での観察.回折条件は2020反射 がブラッグ条件を満たす条件よりすこしはずし た状態で撮影している.線状のコントラストの 両端に暗いコントラストがついている貫通らせ ん転位 S2,暗いコントラストのみ観察され線状 のコントラストがついていない S1.両端に暗い コントラストがついていない線状のコントラス トの TE(貫通刃状転位),長い線状の BP(基底面 転位)などが観察される. ±[0001]+1/3 $\langle 1120 \rangle$ であると考えられる⁽¹²⁾. このよう なバーガース・ベクトル**b**=±[0001]+1/3 $\langle 1120 \rangle$ を持 つ転位の存在は,透過型電子顕微鏡を用いた収束電子回折法 によっても確認されている⁽¹⁰⁾. この転位は,1本の貫通ら せん転位と1本の貫通刃状転位が反応して形成されたもの と考えられる.貫通らせん転位と呼ばれている転位の中に は,かなりの割合でこの転位が混在している.

図9のA, B, C, D…はベルク・バレット法によるg= 1128の反射で観察された貫通らせん転位のコントラスト を示す. 直径約20から数ミクロン程度の白いコントラスト が観察されている. これらの貫通らせん転位のコントラスト は, 図8に観察されている貫通らせん転位のウェハ表面終 端部で観察される格子の歪みを観察していると考えられる. これらのコントラストより貫通らせん転位の存在の確認は可 能だが, それらのバーガース・ベクトルを求めることは困難 だと考えられる.

また,図9に示すように回折条件を変化させると貫通ら せん転位のコントラストは複雑な変化を示す.それぞれの貫 通らせん転位は一般に正確にc軸方向を向いておらず,貫通 らせん転位の向きのc軸方向からのずれが,ウエハ表面終端 部の歪み場へ影響を与えていると考えられ,それらの効果が ベルク・バレット法での貫通らせん転位のコントラストの違 いに影響を与えていると推察される.

(5) ショックレー型基底面部分転位

4H-SiC 結晶で作製されたバイポーラ系デバイスでは順方向に電流を流した時に,30度 Si コア基底面部分転位は電子



図 9 貫通らせん転位のコントラストの変化. (a) g=1128, (b) g=1128, (c) g=1108, (d) g=1018, (e) g=0118. 図中の白矢印はウエハ表面に投影した回折ベクトルの向き. 図のA, B, C, D, E, F. G. H. I, J は貫通らせん転位のコントラストを示す.

ホール対の消滅場所として働き消滅時のエネルギーにより 30度 Si コア基底面部分転位が運動し、ショックレー型積層 欠陥の拡大が起こり、電気抵抗が増大し、特性が劣化すると 言われている⁽¹³⁾⁻⁽¹⁹⁾.バイポーラ系デバイスの特性劣化と 転位構造との関係を調べる上で、ショックレー型部分転位が どのようにベルク・バレット法で観察されるかを調べておく ことは重要である.

b=1/3[1120]のバーガース・ベクトルを持つ基底面螺 旋転位は、 $g=1\bar{1}08$ の回折条件では $g\cdot b=0$ を満たすため コントラストの消失が観察されるのは図2で示した.一 方、基底面らせん転位部の拡張幅が広くなると $g=1\bar{1}08$ の回折条件でも明るいコントラストと暗いコントラストの転 位のペアの観察が可能である.図10は、Hg-Xe ランプを利 用して、L字状の基底面転位のらせん転位部に光をあて、基 底面らせん転位を2つの部分転位に分解させた状態をベル ク・バレット法で観察した例を示す⁽²⁰⁾.

図10で観察される転位の向きを $A_1 \rightarrow B_1 \rightarrow E_1 \rightarrow F_1$ あるいは $A_1 \rightarrow B_1 \rightarrow C_1 \rightarrow D_1$ と時計回り方向に定義すると本L字状の基 底面転位はb=1/3[1120]のバーガース・ベクトルを持つ. $A_1 \rightarrow B_1$ はCコア刃状転位部である. $g=1\overline{1}08$ では $E_1 \rightarrow F_1$ に沿っておおよそ暗いコントラストを示している. $C_1 \rightarrow D_1$ に沿っておおよそ明るいコントラストを示している. $E_1 \rightarrow F_1$ は $b=1/3[10\overline{1}0]$ のバーガース・ベクトルを持つCコア の30度部分転位, $C_1 \rightarrow D_1$ は $b=1/3[01\overline{1}0]$ のバーガース・ ベクトルを持つSiコアの30度部分転位であると推察され る.二つの部分転位に囲まれた部分がショックレー型積層欠 陥である.

同じバーガース・ベクトルを持つ基底面転位のもう一つの 拡張の例を次に示す.図11で観察される転位の向きを $D_2 \rightarrow C_2 \rightarrow B_2 \rightarrow A_2$ あるいは $F_2 \rightarrow E_2 \rightarrow B_2 \rightarrow A_2$ と時計回り方向に定 義すると本逆L字状の基底面転位のバーガース・ベクトル は $b=1/3[11\bar{2}0]$ である. $B_2 \rightarrow A_2$ はCコア刃状転位部であ る.図9と同様の議論により $D_2 \rightarrow C_2$ は $b=1/3[10\bar{1}0]$ のバ ーガース・ベクトルを持つSiコアの30度部分転位, $F_2 \rightarrow E_2$ は $b=1/3[01\bar{1}0]$ のバーガース・ベクトルを持つCコアの 30度部分転位と考えられる.図10と図11で観察される転位 は拡張前の完全転位の状態では、いずれも $b=1/3[11\bar{2}0]$ のバーガース・ベクトルを持つ.図10では、らせん転位が



図10 (a) L字状のb=1/3[1120]基底面転位のらせん転位部の拡張した状態.4H-SiC エピ膜つきウエハ4度オフ基板,Si面の観察.図中の白矢印は表面に投影したgベクトルの向き.(b)模式図⁽²⁰⁾.

拡張した後のSi コア30度部分転位は左側, C コア30度部分 転位は右側に位置している.一方,図11では,らせん転位 が拡張した後のSi コア30度部分転位は右側,C コア30度部 分転位は左側に位置している.図10,11は,同じb=1/3[11 $\bar{2}0]のバーガース・ベクトルを持つ基底面らせん転位には拡$ 張の仕方が2種類存在することを示唆している.

図12に **b**=1/3[1120]のバーガース・ベクトルを持つ転 位ループの2つの拡張構造を示す.図12(a)の $c_1 \rightarrow d_1$ 部はシ ョックレー型積層欠陥の左側に Si コア30度部分転位が位置 し $e_1 \rightarrow f_1$ 部はショックレー型積層欠陥の右側に C コア30度 部分転位が位置している.この関係は,図12(a)の $j_1 \rightarrow i_1$ 部, $h_1 \rightarrow g_1$ 部も同じ位置関係になっている.図12(b)の $f_2 \rightarrow e_2$ 部 はショックレー型積層欠陥の左側に C コア30度部分転位が 位置し $d_2 \rightarrow c_2$ 部はショックレー型積層欠陥の右側に Si コア 30度部分転位が位置している.この関係は,図12(b)の $i_2 \rightarrow j_2$ 部, $g_2 \rightarrow h_2$ 部も同じ位置関係になっている.図10で観察 される $E_1 \rightarrow F_1$ あるいは $C_1 \rightarrow D_1$ は図12(a)の $e_1 \rightarrow f_1$ 部, $c_1 \rightarrow d_1$ に対応すると考えられる.図11で観察される $D_2 \rightarrow C_2$ ある いは $F_2 \rightarrow E_2$ は図12(b)の $d_2 \rightarrow c_2$, $f_2 \rightarrow e_2$ に対応すると同様に 考えられる.

4H-SiC の結晶構造では ABA'C'の 4 層の積層構造より成 り立っている. この積層構造では A 層の上下のすべり面に **b**=1/3[1120]のバーガース・ベクトルを持つ完全転位の



図11 (a) 逆L字状のb=1/3[1120]基底面転位のらせん転位部の拡張した状態.4H-SiCエピウエハ4度オフ基板,Si面の観察.図中の白矢印は表面に投影したgベクトルの向き.(b) 模式図⁽²⁰⁾.



図12 b=1/3[1120]のバーガース・ベクトルを持つ 転位ループの2種類の拡張の構造⁽²⁰⁾.転位の向 きくは時計回りとする.

拡張によりショックレー型積層欠陥が導入される時には図 12(a)のタイプの構造が導入される. A'層の上下のすべり面 にb=1/3[1120]のバーガース・ベクトルを持つ転位の拡 張によりショックレー型積層欠陥が導入される時には図12 (b)のタイプの構造が導入される⁽²⁰⁾. b=1/3[1120]のバー ガース・ベクトルを持つ転位の拡張した転位ループが2種 類存在するので6方向のバーガース・ベクトルの基底面転 位に対応して,拡張を考慮した基底面転位ループは12種類 存在する.

上記で議論されたバーガース・ベクトルと部分転位のコン トラスト,およびショクレー型積層欠陥の形状との関係を事 前に把握しておくと,バイポーラ系デバイスで問題となって いる順方向特性劣化の原因となっている基底面部分転位のバ ーガース・ベクトルの同定も可能になる.バーガース・ベク トルから各基底面転位を分類し,どのプロセスで導入された 基底面転位かの議論に示唆を与えると考えられる.

4. まとめ

放射光を用いたベルク・バレット法を用いて4H-SiC 結晶 中の基底面転位,貫通刃状転位,貫通らせん転位,ショック レー型基底面部分転位などを観察し,バーガース・ベクト ル,転位の向き,転位コントラストの関係を議論した.基底 面転位では,Siコア刃状転位,Cコア刃状転位,バーガー ス・ベクトルと転位の向きが平行な基底面らせん転位,反平 行な基底面らせん転位のコントラストを整理した.また貫通 刃状転位のバーガース・ベクトルとコントラストの関係につ いても整理した.貫通らせん転位のコントラストについて議 論した.ショックレー型部分転位のコントラストについても Siコア,Cコア成分を持つ部分転位を整理することができ た.さらに4H-SiCのABA'C'の積層の中のどの積層部に部 分転位が存在するかを議論することができた.

ベルク・バレット法を SiC テクノロジーの産業化におい て問題となっている技術課題に応用し、本稿で示された知見 をもとに、問題解決のためのいくつかの示唆を得てい る⁽²¹⁾⁻⁽²⁶⁾.

本稿は、新エネルギー・産業技術総合開発機構プロジェクト「パワーエレクトロニクスインバーター基盤技術の開発」 (2006-2008)の報告書より抜粋し加筆したものである.本内容の一部は、加藤丈晴(JFCC)、幾原雄一(JFCC・東大)諸氏との共同の研究の成果を含んでいる.

文 献

- (1) 石井 格:工業技術, 38(1997), 18-21.
- (2) 大野俊之:博士論文,東京工業大学,(2006).
- (3) B. K. Tanner: X–ray Diffraction Topography, Pergamon Press, (1976), 100–102.
- (4) H. Matsuhata, T. Kato, S. Tsukimoto and Y. Ikuhara: Philos. Mag., 92(2012), 3780–3788.

- (5) J. P. Hirth and J. Lothe: Theory of Dislocations, MacGraw-Hill, (1968), 19–21.
- (6) H. Matsuhata, H. Yamaguchi and T. Ohno: Philos. Mag., 92 (2012), 4599–4617.
- (7)坂 公恭:結晶電子顕微鏡学,内田老鶴圃(1997),159.
- (8) X. R. Hunag, D. R. Black, A. T. Macrander, J. Mj, Y. Chen and M. Dudley: Appl. Phys. Lett., 91(2007), 231903.
- (9) L. V. Azaroff, R. Kaplow, N. Kato, R. J. Weiss, A. J. C. Willson and R. A. Young: X–ray Diffraction, McGraw–Hill, New York, (1974), 407–427.
- (10) Y. Sugawara, M. Nakamori, Y-Z. Yao, Y. Ishikawa, K. Danno, H. Suzuki, T. Bessho, S. Yamaguchi, K. Nishikawa and Y. Ikuhara: Appl. Phys. Express., 5 (2012), 081301.
- (11) S. Onda, H. Watanabe, Y. Kito, H. Kondo, H. Uehigashi, N. Hosokawa, Y. Hisada, K. Shiraishi and H. Saka: Philos. Mag. Lett., 93 (2013), 439–447.
- (12) H. Yamaguchi and H. Matsuhata: Mat. Sci. Forum, **725** (2012), 7–10.
- (13) S. I. Maximenko, P. Pirouz and T. S. Sudarshan: Appl. Phys. Lett., 87 (2005), 033503.
- (14) A. Galeckas, J. Linnros and P. Pirouz: Phys. Rev. Lett., 96 (2006), 025502.
- (15) B. Chen, T. Sekiguchi, T. Ohyanagi, H. Matsuhata, A. Kinoshita and H. Okumura: J. Appl. Phys., **106**(2009), 074502.
- (16) B. Chen, H. Matsuhata, T. Sekiguchi, T. Ohyanagi, A. Kinoshita and H. Okumura: Appl. Phys. Lett., 96 (2010), 212110.
- (17) M. Skowronski, J. Q. Liu, W. M. Vetter, M. Duddley, C. Hallin and H. Lendenmann: J. Appl. Phys., 92 (2002), 4699–4704.
- (18) M. Skowronski and S. Ha: J. Appl. Phys., **99**(2006), 011101.
- (19) Z. Zhang, S. I. Maximenko, A. Shirvastava, P. Sadagopan, Y. Gao and T. S. Sudarashan: Appl. Phys. Lett., 88(2006), 062101–3.
- (20) H. Matsuhata, H. Yamaguchi, T. Yamashita, T. Tanaka, B. Chen and T. Sekiguchi: Philos. Mag., 94(2014), 1674–1685.
- (21) M. Sasaki, K. Tamura, H. Sako, M. Kitabatake, K. Kojima and H. Matsuhata: Mat. Sci. Forum, 778–780 (2014), 398–401.
- (22) T. Ohno, H. Yamaguchi, S. Kuroda, K. Kojima, T. Suzuki and K. Arai: J. Cryst. Growth, 260(2004), 209–216.
- (23) T. Ohno, H. Yamaguchi, S. Kuroda, K. Kojima, T. Suzuki and K. Arai: J. Cryst. Growth, **271**(2004), 1–7.
- (24) H. Matsuhata, H. Yamaguchi, I. Nagai, T. Ohno, R. Kosugi and A. Kinoshita: Mat. Sci. Forum, 600–603 (2009), 309–312.
- (25) T. Suzuki, H. Yamaguchi, H. Hatakeyama, H. Matsuhata, J. Senzaki, K. Fukuda, T. Shinohe and H. Okumura: Mat. Sci. Forum, **717–720** (2012), 477–480.
- (26) T. Tsuji, T. Tawara, R. Tanuma, Y. Yonezawa, N. Iwamuro, K. Kosaka, H. Yurimoto, S. Kobayashi, H. Matsuhata, K. Fukuda, H. Okumura and K. Arai: Mat. Sci. Forum, 645–648 (2010), 913–917.

★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★ 松畑洋文

1984年 九州大学大学院総合理工学研究科材料開発工学専攻 博士後期課程 修了

現在,国立研究開発法人産業技術総合研究所先進パワーエレクトロニクス研 究センター所属,2013年4月より現職

専門分野:電子顕微鏡、機能性化合物の微細構造



松畑洋文

山口博隆