

# 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<sup>1)</sup> 山口 博隆<sup>2)</sup>

## 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<sup>(1)</sup>。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 線トポグラフィ法は, 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 線トポグラフィ法, 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

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<sup>(2)</sup>。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<sup>(2)</sup>。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

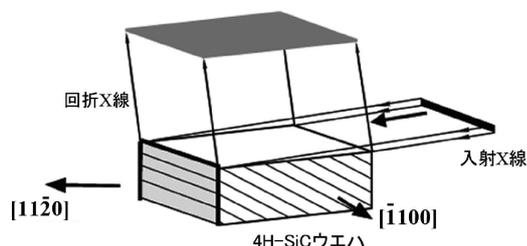


図 1 放射光を利用したベルク・バレット法の実験の配置図。

\* 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 Hiroataka 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 vectors, 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  $5\ \mu\text{m}$ – $80\ \mu\text{m}$  程度で変化している<sup>(2)</sup>. 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.

### 3. 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. 転位の向きを  $A_1 \rightarrow A_2 \rightarrow B \rightarrow C \rightarrow D$  と時計回りに定義した. 図 2(c) の  $\mathbf{g} = \bar{1}108$  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  $\mathbf{g} \cdot \mathbf{b} = 0$  の条件を満たし, コントラストの消失が  $\mathbf{g} = \bar{1}108$  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  $\pm 1/3[11\bar{2}0]$  のいずれかであることが分かる. また図 2(a)  $\mathbf{g} = \bar{1}\bar{1}28$ , (b)  $\mathbf{g} = 11\bar{2}8$  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)  $\mathbf{g} = \bar{1}\bar{1}28$  では右側が暗く左が明るい. 図 2(b)  $\mathbf{g} = 11\bar{2}8$  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,  $\mathbf{g} \cdot \mathbf{b} > 0$  あるいは  $\mathbf{g} \cdot \mathbf{b} < 0$  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ため, 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  $\mathbf{g} \cdot \mathbf{b} = 0$  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,  $\mathbf{g} = \bar{1}108$  でもコント

ラストが現れている<sup>(3)(7)</sup>. 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は  $[\bar{1}100]$  方向を向く基底面刃状転位部であり,  $\mathbf{g}$  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は  $[1\bar{1}00]$  方向を向いている基底面刃状転位部であり,  $\mathbf{g}$  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  $\mathbf{b} = 1/3[\bar{1}\bar{1}20]$  か, あるいは  $\mathbf{b} = 1/3[11\bar{2}0]$  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.

ペルク・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<sup>(4)</sup>. Hirth and Lothe の FS/RH convention のバーガース・ベクトルの定義<sup>(5)(7)</sup>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  $\mathbf{b} = 1/3[11\bar{2}0]$  と一意的に決定できる.

以上より, 放射光を用いたペルク・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の違いがあり, 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,  $\mathbf{b} = 1/3[11\bar{2}0]$  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,  $\mathbf{g} \cdot \mathbf{b}$  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  $\mathbf{g} = \bar{1}\bar{1}28$ , と  $11\bar{2}8$  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<sup>(6)</sup>.

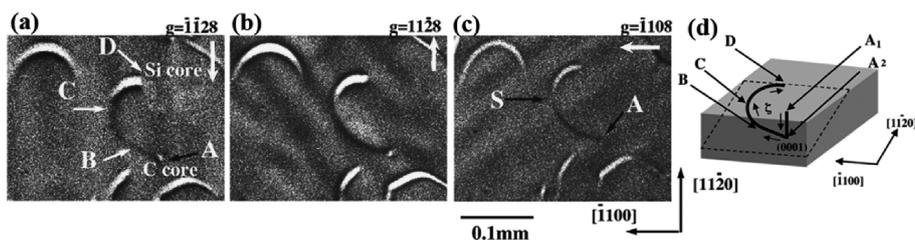


図 2 (a)  $\mathbf{g} = \bar{1}\bar{1}28$ , (b)  $11\bar{2}8$ , (c)  $\bar{1}108$  の回折条件で撮影したペルク・バレット法による観察像<sup>(6)</sup>. 図中の白矢印は回折を起こしている逆格子ベクトルのウエハ表面に投影した向きを示す.

## (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<sup>(8)</sup>．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<sup>(9)</sup>．図 5 はなだらかに歪みが増加する場合の分散面，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  $g = \bar{1}\bar{1}28$  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

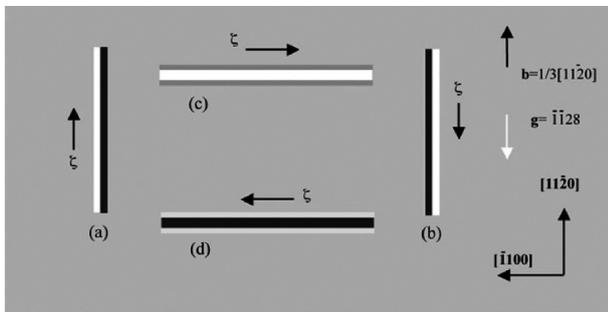


図 3  $g = \bar{1}\bar{1}28$  の回折条件を満たしている時の  $b = 1/3[11\bar{2}0]$  の基底面転位ループの各部分のコントラストの模式図．(a) バーガース・ベクトルと転位の向きが平行な基底面らせん転位部，(b) バーガース・ベクトルと転位の向きが反平行な基底面らせん転位部，(c) Si コア基底面刃状転位，(d) C コア基底面刃状転位．これらは観察像のスケッチ<sup>(20)</sup>．

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<sup>(9)</sup>．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エハの Si 面側での観察を議論している．4H-SiC ウエハの 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

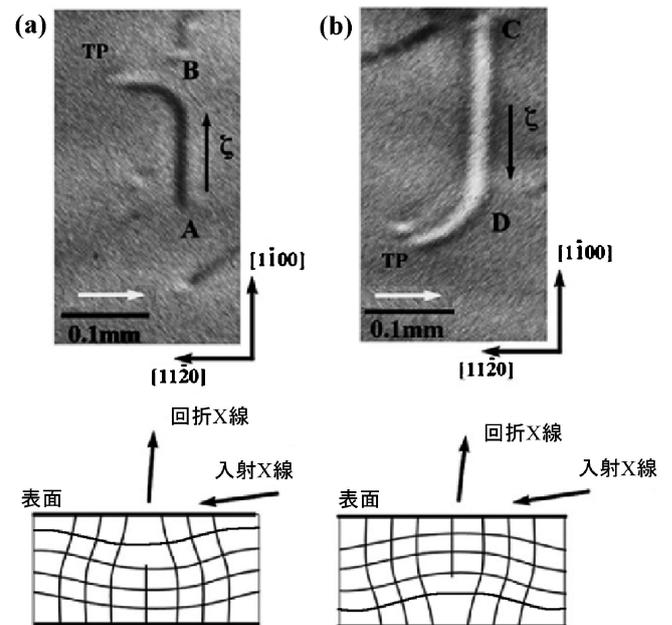


図 4 (a) C コア基底面刃状転位と (b) Si コア基底面刃状転位のベルク・バレット法による観察像． $g = \bar{1}\bar{1}28$  での観察像．格子変位の模式図．図中の白矢印はウエハ表面へ投影した  $g$  ベクトルの向きを示している<sup>(6)</sup>．

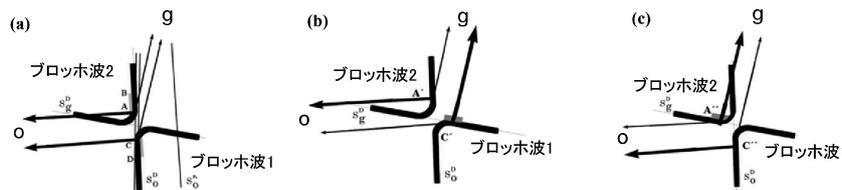


図 5 (a) 結晶に歪みが無く  $g = \bar{1}\bar{1}28$  がブラッグ条件を満たしている場合の分散面，発散点，ブロッホ波の励起の状態．(b) Si コア基底面刃状転位の回りの歪み場．ブロッホ波 1 の励起が大きくなると推察される．(c) Si コア基底面刃状転位の回りの歪み場．ブロッホ波 2 の励起が大きくなると考えられる<sup>(6)</sup>．

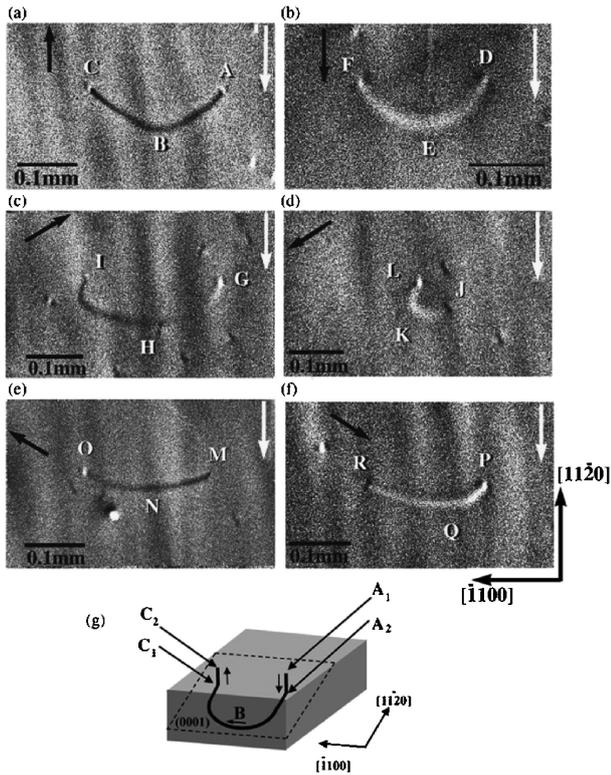


図6 基底面転位とその両端に貫通刃状転位が付いている転位の模式図を(g)に示す。転位の向きは  $A_1 \rightarrow A_2 \rightarrow B \rightarrow C_1 \rightarrow C_2$  とする。それぞれ6つの異なるバーガース・ベクトルについて示している。図中の黒矢印はバーガース・ベクトルの向き。白矢印はウエハ表面へ投影した  $g = \bar{1}\bar{1}28$  の向き。(a)  $b = 1/3 [11\bar{2}0]$ , (b)  $b = 1/3 [\bar{1}\bar{1}20]$ , (c)  $b = 1/3 [2\bar{1}\bar{1}0]$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

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)  $b = 1/3 [11\bar{2}0]$  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)  $b = 1/3 [\bar{1}\bar{1}20]$  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)  $b = 1/3 [\bar{2}110]$  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

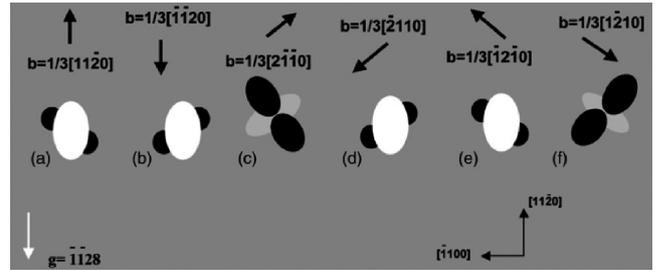


図7 貫通刃状転位のコントラストの模式図。それぞれ6つの異なるバーガース・ベクトルについてのスケッチ。貫通刃状転位の向きは  $[0001]$  方向、紙面から飛び出す方向とする。図中の黒矢印はバーガース・ベクトルの向き。白矢印はウエハ表面への投影した  $g = \bar{1}\bar{1}28$  の向き。(a)  $b = 1/3 [11\bar{2}0]$ , (b)  $b = 1/3 [\bar{1}\bar{1}20]$ , (c)  $b = 1/3 [2\bar{1}\bar{1}0]$ , (d)  $b = 1/3 [\bar{2}110]$ , (e)  $b = 1/3 [\bar{1}2\bar{1}0]$ , (f)  $b = 1/3 [1\bar{2}10]$  の例<sup>(6)</sup>。

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、つ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<sup>(6)</sup>。

#### (4) 貫通らせん転位

本稿中では、 $b = \pm [0001]$ ,  $b = \pm [0001] + 1/3 \langle 11\bar{2}0 \rangle$ ,  $b = \pm [0001] + \langle 1\bar{1}00 \rangle$  などの巨大なバーガース・ベクトルを持ち<sup>(10)-(12)</sup>, 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<sup>(12)</sup>。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  $g \cdot b = 0$  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 $\mathbf{b} =$

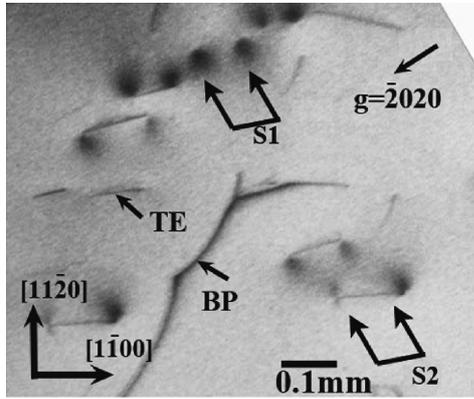


図8 透過の配置，ラウエケースのX線トポグラフ。 $2020$ の反射での観察。回折条件は $2020$ 反射がブラッグ条件を満たす条件よりすこしはずした状態で撮影している。線状のコントラストの両端に暗いコントラストがついている貫通らせん転位S2，暗いコントラストのみ観察され線状のコントラストがついていないS1。両端に暗いコントラストがついていない線状のコントラストのTE(貫通刃状転位)，長い線状のBP(基底面転位)などが観察される。

$\pm[0001]+1/3\langle 11\bar{2}0 \rangle$ であると考えられる<sup>(12)</sup>。このようなバーガース・ベクトル $\mathbf{b} = \pm[0001]+1/3\langle 11\bar{2}0 \rangle$ 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<sup>(10)</sup>。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・パレット法による $\mathbf{g} = \bar{1}\bar{1}28$ 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エ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・パ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結晶で作製されたパ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コバ基底面部分転位は電子

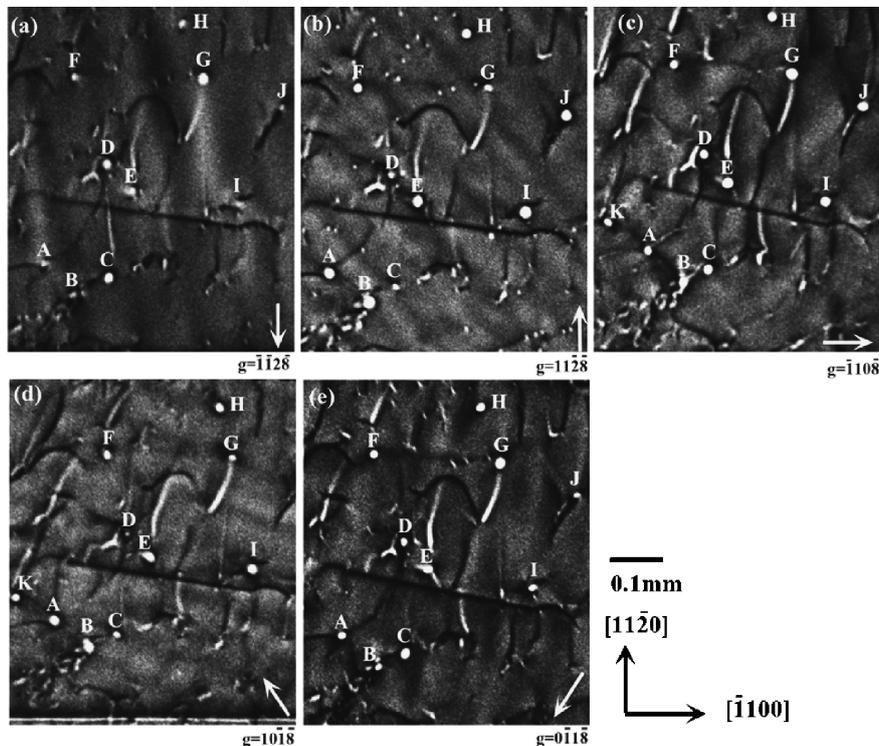


図9 貫通らせん転位のコントラストの変化。(a)  $\mathbf{g} = \bar{1}\bar{1}2\bar{8}$ , (b)  $\mathbf{g} = 11\bar{2}\bar{8}$ , (c)  $\mathbf{g} = \bar{1}\bar{1}0\bar{8}$ , (d)  $\mathbf{g} = 10\bar{1}\bar{8}$ , (e)  $\mathbf{g} = 0\bar{1}1\bar{8}$ 。図中の白矢印はウエハ表面に投影した回折ベクトルの向き。図のA, B, C, D, E, F, G, H, I, Jは貫通らせん転位のコントラストを示す。

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、特性が劣化と言われている<sup>(13)-(19)</sup>。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。

$\mathbf{b} = 1/3[11\bar{2}0]$  のバーガース・ベクトルを持つ基底面螺旋転位は、 $\mathbf{g} = 1\bar{1}08$  の回折条件では  $\mathbf{g} \cdot \mathbf{b} = 0$  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がると  $\mathbf{g} = 1\bar{1}08$  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<sup>(20)</sup>。

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  $\mathbf{b} = 1/3[11\bar{2}0]$  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。 $\mathbf{g} = 1\bar{1}08$  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  $\mathbf{b} = 1/3[10\bar{1}0]$  のバーガース・ベクトルを持つCコアの30度部分転位、 $C_1 \rightarrow D_1$  は  $\mathbf{b} = 1/3[01\bar{1}0]$  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  $\mathbf{b} = 1/3[11\bar{2}0]$  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  $\mathbf{b} = 1/3[10\bar{1}0]$  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  $\mathbf{b} = 1/3[01\bar{1}0]$  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  $\mathbf{b} = 1/3[11\bar{2}0]$  のバーガース・ベクトルを持つ。図10では、らせん転位が

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  $\mathbf{b} = 1/3[11\bar{2}0]$  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  $\mathbf{b} = 1/3[11\bar{2}0]$  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  $d_2 \rightarrow c_2$ 、 $f_2 \rightarrow e_2$  に対応すると同様と考えられる。

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  $\mathbf{b} = 1/3[11\bar{2}0]$  のバーガース・ベクトルを持つ完全転位の

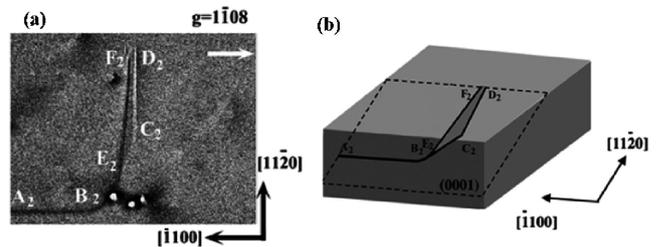


図11 (a) 逆L字状の  $\mathbf{b} = 1/3[11\bar{2}0]$  基底面転位のらせん転位部の拡張した状態。4H-SiC エピウエハ4度オフ基板、Si面の観察。図中の白矢印は表面に投影した  $\mathbf{g}$  ベクトルの向き。(b) 模式図<sup>(20)</sup>。

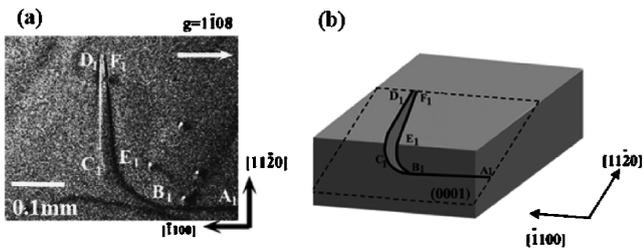


図10 (a) L字状の  $\mathbf{b} = 1/3[11\bar{2}0]$  基底面転位のらせん転位部の拡張した状態。4H-SiC エピ膜つきウエハ4度オフ基板、Si面の観察。図中の白矢印は表面に投影した  $\mathbf{g}$  ベクトルの向き。(b) 模式図<sup>(20)</sup>。

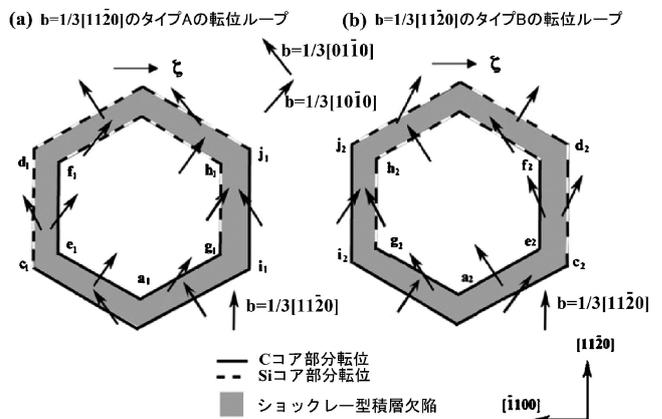


図12  $\mathbf{b} = 1/3[11\bar{2}0]$  のバーガース・ベクトルを持つ転位ループの2種類の拡張の構造<sup>(20)</sup>。転位の向きは時計回りとする。

