

偏光観察によるパワーデバイス SiC 基板の結晶欠陥可視化

原田 俊太* 村山 健太**

1. はじめに

シリコンカーバイド(SiC)は、広いバンドギャップ、高い絶縁破壊電界強度と熱伝導率を有するため、パワーデバイス材料として有望な材料であり、新幹線 N700S 系をはじめとする電鉄車両や、一部の電気自動車に搭載されるなど、その社会実装が進んでいる⁽¹⁾⁽²⁾。SiC は、同一の組成でありながら多様な積層構造をとる結晶多形を示す物質である。3C, 4H, 6H, 15R など多数の多形が存在することが報告されているが、特に 4H-SiC はバンドギャップが 3.27 eV と大きく、移動度も比較的高いため、SiC パワーデバイスの研究開発は 4H-SiC を中心に進められている⁽³⁾。SiC パワーデバイスには、昇華法により製造された 4H-SiC 単結晶基板上に、化学気相成長(CVD)法を用いてエピタキシャル膜が成長されたものが使用されている⁽⁴⁾。パワーデバイス用 4H-SiC 基板の表面は、(0001)から $[11\bar{2}0]$ に 4°傾斜した面となっており、このようなオフ基板を用いることによって、エピタキシャル膜をステップフロー成長させ、4H 多形を安定化させることが可能である⁽⁵⁾。昇華法では、原料となる SiC 粉末を 2000°C 以上の高温において昇華させ、種結晶上に結晶成長を行う。昇華法により作製された 6 インチの基板が現在主流であり、8 インチ基板の製造も進められている。昇華法 SiC 結晶の品質は着実に向上しているが、無転位の結晶製造法が確立されている Si と比較すると、多数の結晶欠陥が含まれている。これらの結晶欠陥はエピタキシャル層に伝播し、パワーデバイスの性能や信頼性、生産性に悪影響を及ぼすことが知られている。表 1 に 4H-SiC 基板に含まれる結晶欠陥とデバイス特性への影響をまとめたものを示す。マイクロ

表 1 SiC 基板に含まれる結晶欠陥とデバイス特性への影響。

種類	バーガースベクトル	転位線	デバイスへの影響
マイクロパイプ(MP)	$nc(n>3)$	c	耐圧劣化
貫通らせん/混合転位(TSD/TMD)	$c(+a)$	c	歩留り・信頼性低下
貫通刃状転位(TED)	a	c	
基底面転位(BPD)	a	on(0001)	バイポーラ劣化

ロパイプ(Micropipe: MP)は、大きな c 成分のバーガースベクトルを持つ転位で、その転位芯が中空状になったホローコア転位であり、耐圧性の劣化を引き起こす致命的な欠陥であることが知られているが、近年の結晶成長技術の進展により、MP の密度はほぼゼロとなっている。このほかに、 c 成分のバーガースベクトルを有し、概ね c 軸方向に伝播する貫通らせん転位(Threading screw dislocation: TSD)、 a 成分のバーガースベクトルを有する貫通刃状転位(Threading edge dislocation: TED)、(0001)面上の基底面転位(Basal plane dislocation: BPD)などが存在する(図 1)。TSD については、最近の研究で、ほとんどがバーガースベクトルに刃状成分を有することが報告されており⁽⁶⁾、本稿では、 a 成分を含まないものを貫通らせん転位、 a 成分を含むものを貫通混合転位(Threading mixed dislocation: TMD)と区別して呼ぶことにする。これらの転位が基板の品質にもよるが、 $10^2 \sim 10^4 \text{ cm}^{-2}$ のオーダーで市販基板には含まれている。また、TSD、TMD はその一部がリークを引き起こす場合があり、デバイスの生産性や信頼性の低下をもたらすことが報告されている⁽⁷⁾⁻⁽¹¹⁾。また BPD は、バイポーラデバイスにおいて順方向通電時にオン抵抗が上昇するバイポーラ劣化の起点となる

* 名古屋大学 未来材料・システム研究所; 准教授(〒464-8601 名古屋市千種区不老町)

** Mipox 株式会社次世代半導体プロジェクト; 課長

Polarized Light Observation for Visualization of Crystalline Defects in SiC Wafers for Power Device Applications; Shunta Harada* and Kenta Murayama** (*Institute of Materials and Systems for Sustainability, Nagoya University, Nagoya. **Mipox Corporation, Kanuma)

Keywords: SiC, GaN, compound semiconductor, crystalline defect, dislocation, power device, polarized light observation

2024年 5月10日受理[doi:10.2320/materia.63.687]

ことが知られている⁽¹²⁾⁻⁽¹⁴⁾。このようにデバイス特性に影響を及ぼす可能性がある結晶欠陥を多数含むSiCパワーデバイスでは、Siとは異なり、基板の欠陥評価・検査技術が極めて重要となる。

パワーデバイスとしての性能において重要となるSiCエピタキシャル層の欠陥評価に関しては、フォトルミネッセンス(Photo-luminescence: PL)法による評価法が確立しており、PL法を用いた欠陥評価は標準化されている。基板の欠陥評価については、熔融水酸化カリウム(KOH)によるエッチングやX線トポグラフィ法が用いられているが、非破壊でかつ短時間の検査が求められているため、我々は偏光を用いた光学観察に着目し、研究開発を進めている。

偏光観察による結晶欠陥をはじめとする結晶中の局所的な応力分布の観察については、1956年にBondとAndrusがSiの転位の応力場を報告して以来、SiCを含む様々な結晶に対して行われている⁽¹⁵⁾⁻⁽¹⁸⁾。図2に、直交ニコルでの偏光観察の模式図を示す。偏光観察は透過光を用いて、試料の前後に偏光板を配置して行われる。試料の手前の偏光板を偏光子(Polarizer)と呼び、検出器側を検光子(Analyzer)と呼ぶ。直交ニコルでの観察では、偏光子と検光子が直交するように配置される。この場合、試料が光学的に等方的であれば、検出器に光は届かないが、光学的な異方性を有すると、複屈折

により検出器に光が届くようになる。偏光観察による応力場の観察では、応力によって生じる光学的な異方性(光弾性)によってコントラストが生成する。この方法によって、SiC結晶のマイクロパイプなど比較的大きな応力場を観察できることが報告されているが、転位による小さな応力場を観察するのは困難であり、また、強度が弱いため露光時間が長くなる。そこで、我々は直交ニコルから検光子をわずかに回転させ観察を行ったところ(図2(c))、バックグラウンドの中で転位の位置に明暗のコントラストが生じることを見出した。本稿では、これらのコントラスト生成のメカニズムについて理論的に検討した結果と⁽¹⁹⁾、検光子をわずかに回転させた偏光観察によるSiC基板中の欠陥評価⁽²⁰⁾、更には開発したSiC基板の欠陥検査システム⁽²¹⁾⁽²²⁾について解説する。

2. 偏光観察像におけるコントラストの理論的検討

前述の通り、パワーデバイスSiC基板は(0001)から[1120]に4°傾斜しているため、応力がない場合にも光学的な異方性を有し複屈折が生じる。Z軸を入射方向(基板表面に垂直方向)、X軸を[1100]、Y軸をそれに垂直にとると、応力がない場合の屈折率楕円体の入射方向に垂直な断面の方程式は、下記のように表される。

$$B_1^0 X^2 + B_2^0 Y^2 + 2B_6^0 XY = 1 \quad (1)$$

$$B_1^0 = n_o^{-2} \quad (2)$$

$$B_2^0 = n_{\text{eff}}^{-2}(\theta) \quad (3)$$

$$n_{\text{eff}}(\theta) = \frac{n_o n_e}{\sqrt{n_o^2 \sin^2 \theta + n_e^2 \cos^2 \theta}} \quad (4)$$

ここで、 B_1^0 、 B_2^0 、 B_6^0 は比誘電率テンソルの逆数を、 n_o は通常光の屈折率、 n_e は異常光の屈折率、 θ はオフ角(4°)を表している。次に、応力が印可された場合を考える。ここでは、貫通刃状転位を想定し、転位線方向がZ軸方向の刃状転位による応力場 σ を考える。刃状転位では、 $\sigma_{yz} = \sigma_{zx} = 0$ であるため、

$$\sigma = \begin{pmatrix} \sigma_{xx} \\ \sigma_{yy} \\ \sigma_{zz} \\ 0 \\ 0 \\ \sigma_{xy} \end{pmatrix} \quad (5)$$

となる。刃状転位による応力場が印可された結晶の屈折率楕円体の入射方向に垂直な断面の方程式は、下記のように表される。

$$B_1 X^2 + B_2 Y^2 + 2B_6 XY = 1 \quad (6)$$

$$B_m = B_m^0 + \Pi_{mn} \sigma_n \quad (7)$$

$$\Pi = \begin{pmatrix} p_{11} & p_{12} & p_{13} & 0 & 0 & 0 \\ p_{12} & p_{11} & p_{13} & 0 & 0 & 0 \\ p_{13} & p_{13} & p_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & p_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & p_{44} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & p_{11} - p_{12} \end{pmatrix} \quad (8)$$

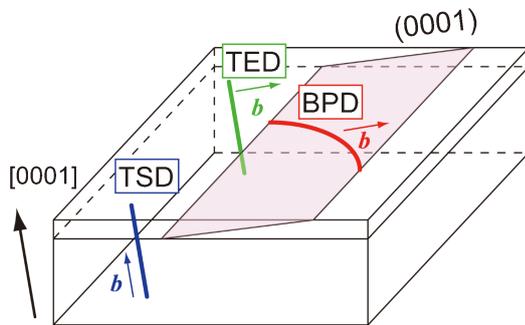


図1 SiC結晶中の転位の模式図。c成分のバーガースペクトルを有し、概ねc軸方向に伝播する貫通らせん転位(TSD)、a成分のバーガースペクトルを有する貫通刃状転位(TED)、(0001)面上の基底面転位(BPD)。(オンラインカラー)

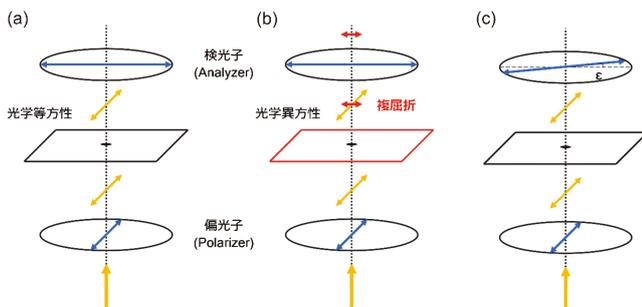


図2 直交ニコルで、(a)光学等方性結晶および、(b)光学異方性結晶を偏光観察した場合と、(c)直交ニコルから検光子をわずかに回転させた偏光観察の模式図。(オンラインカラー)

$$B_1 = B_1^0 + p_{11}\sigma_{xx} + p_{12}\sigma_{yy} + p_{13}\sigma_{zz} \quad (9)$$

$$B_2 = B_2^0 + p_{12}\sigma_{xx} + p_{11}\sigma_{yy} + p_{13}\sigma_{zz} \quad (10)$$

$$B_6 = (p_{11} - p_{12})\sigma_{xy} \quad (11)$$

Π は光弾性テンソルである。応力印可後の屈折率楕円体の主軸を決定する固有方程式は、以下のように記述される⁽²³⁾。

$$\begin{vmatrix} B_1 - \frac{1}{n^2} & B_6 \\ B_6 & B_2 - \frac{1}{n^2} \end{vmatrix} = 0 \quad (12)$$

式(12)を解くことによって、二つの屈折率 n_1 および n_2 を求めることができる。また、複屈折の大きさ $|n_2 - n_1|$ と主軸と X 軸のなす角 α は下記のように求められる⁽²⁴⁾。

$$|n_2 - n_1| = \frac{B_{\text{ave}}^{-\frac{3}{2}}}{2} [(B_2 - B_1)^2 + 4B_6^2]^{\frac{1}{2}} \quad (13)$$

$$2\alpha = \tan^{-1}\left(\frac{2B_6}{B_2 - B_1}\right) \quad (14)$$

ここで、 B_{ave} は、 B_1 と B_2 の平均である。図3は、応力印可前後の屈折率楕円体の入射方向に垂直な断面を表している。

次に、偏光子の偏光方向を X 軸方向に平行にし、検光子を ε だけ回転させ、直交ニコルからわずかにずらした条件で観察される光の強度を考えると、下記のように表される⁽²⁵⁾。

$$I = I_0 \left\{ \sin^2 \varepsilon + \sin 2\alpha \sin 2(\alpha - \varepsilon) \sin^2 \frac{\delta}{2} \right\} \quad (15)$$

ここで、 I_0 は、入射光の強度であり、 δ は、通常光と異常光の位相遅れ(レタデーション)であり、入射光の波長 λ と試料の厚さ Δl を用いて下記のように表される。

$$\delta = \frac{2\pi}{\lambda} (n_2 - n_1) \Delta l \quad (16)$$

応力印可による位相遅れは通常十分に小さいため、近似的に $\sin(\delta/2) = \delta/2$ が成り立つとすれば、式(13)、(14)、(16)より式(15)は次のように変形できる。

$$I = I_0 \left\{ \sin^2 \varepsilon + (4B_6^2 \cos^2 \varepsilon + 2B_6(B_2 - B_1) \sin 2\varepsilon) \frac{\pi^2 \Delta l^2}{4B_{\text{ave}}^3 \lambda^2} \right\} \quad (17)$$

ここで、光弾性による複屈折の変化はオフ角によって生じる

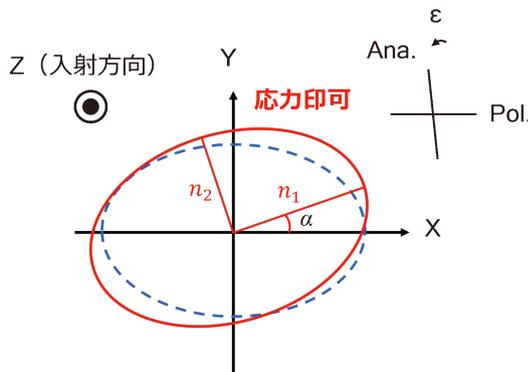


図3 応力印可前後の屈折率楕円体の入射方向に垂直な断面。(オンラインカラー)

複屈折に比べて十分小さいため、

$$B_2 - B_1 \cong B_2^0 - B_1^0 \quad (18)$$

$$B_{\text{ave}} \cong B_{\text{ave}}^0 = \frac{B_2^0 + B_1^0}{2} \quad (19)$$

$$B_6 \ll B_2^0 - B_1^0 \quad (20)$$

と考えることが可能である。最終的に検光子を直交ニコルからわずかにずらした条件における光の強度は、下記のように表される。

$$I = I_0 \left\{ \sin^2 \varepsilon + 2B_6(B_2^0 - B_1^0) \sin 2\varepsilon \frac{\pi^2 \Delta l^2}{4B_{\text{ave}}^3 \lambda^2} \right\} \quad (21)$$

式(21)の第一項は均一なバックグラウンドを生む項であり、第二項が応力に対応するコントラストの変化を生む項となる。第二項において応力に依存するのは、 B_6 のみであり、式(11)から、面内のせん断応力に比例することが分かる。したがって、直交ニコルからわずかにずれた条件では、偏光観察像は面内のせん断応力分布に対応すると考えられる⁽¹⁹⁾。

このことを確認するために、貫通刃状転位の面内せん断応力分布を計算し、実験像と比較を行った。図4にバーガースベクトルが $1/3[\bar{1}\bar{1}20]$ である貫通刃状転位の面内せん断応力分布を、異方性弾性論に基づき、報告されている弾性率から計算した結果を示す⁽¹⁹⁾⁽²⁶⁾。貫通刃状転位のバーガースベクトルの向きは、放射光 X 線トポグラフィ像におけるコントラストのパターンの違いから識別することが可能である⁽²⁷⁾。このため、同一箇所の放射光 X 線トポグラフィ像と偏光観察像を取得し、 $1/3[\bar{1}\bar{1}20]$ の貫通刃状転位の位置を特定することが可能である。図5に4°オフ SiC 基板の同一箇所の放射光 X 線トポグラフィ像と偏光観察像を示す。放射光 X 線トポグラフィは8.27 keV の単色光を用い、 $g = 11\bar{2}8$ の回折を用い、原子核乾板に結像した。X 線トポグラフィ像において(i)、(ii)の位置に貫通刃状転位のコントラストが存在する。(i)は真ん中に明点があり、その右上と左下に暗

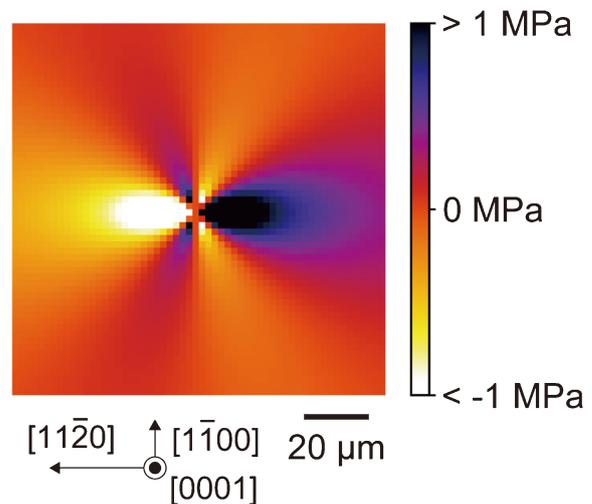


図4 バーガースベクトルが $1/3[\bar{1}\bar{1}20]$ である貫通刃状転位の面内せん断応力分布の計算結果。(オンラインカラー)

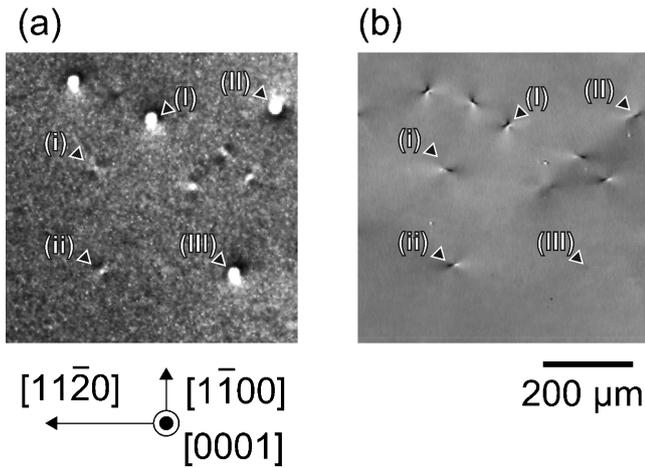


図5 4°オフ SiC 基板の同一視野における(a)放射光 X 線トポグラフィ像と(b)偏光観察像. 偏光観察と X 線トポグラフィを組み合わせることで, (I), (II) が貫通混合転位, (III) が貫通らせん転位と識別できる.

いコントラストがあるのに対して, (ii)では, 真ん中に明点があり, その左上と右下に暗いコントラストがあることが分かる. わずかな差ではあるがこのようなコントラストのパターンの違いから, (i)の貫通刃状転位のバーガースベクトルは $[\bar{1}\bar{1}20]$, (ii)は $[11\bar{2}0]$ と識別することができる. 同じ位置の偏光観察像(図5(b))を見ると, (i)は右側に暗いコントラスト, 左側に明るいコントラストであり, 図4の面内せん断応力分布とよく一致することが分かる. また, バーガースベクトルの向きが反対である(ii)の貫通刃状転位は, 右側が明るいコントラスト, 左側に暗いコントラストと, (i)を反転させたコントラスト形状となっている. 図6に6方向の貫通刃状転位の面内せん断応力分布の計算結果と, 偏光観察像を示す⁽²⁰⁾. コントラストが弱いものが一部存在するが, コントラストの形状は面内のせん断応力とよく一致していることが分かる. また, 最近の研究結果から, コントラストの強弱や一部のコントラスト形状の違いは, 貫通転位が入射方向から傾斜しているため生じていることが明らかとなっており, 転位の三次元的な配置を考慮に入れたシミュレーションを行うと, 実験像をさらによく再現することが明らかとなっている.

以上のように, 直交ニコルからわずかにずらした条件で偏光観察を行うと, 入射方向に平行な貫通転位の面内せん断応力分布を観察することが可能である. 転位の応力場を考えると貫通らせん転位では面内のせん断応力がゼロになるため, 貫通転位の刃状成分を偏光観察像のコントラストのパターンから識別できるということになる.

3. 貫通混合転位の非破壊欠陥評価

直交ニコルからわずかにずらした偏光観察では, 貫通転位の刃状成分によって特徴的なコントラストが形成し, 偏光観察像から貫通転位の刃状成分を識別することが可能であることを示してきた. 本節では, X 線トポグラフィ法と偏光観察を組み合わせた貫通転位の評価について紹介する. 図5(a)の X 線トポグラフィ像において, 大きな点状のコントラストを示すのがらせん成分のバーガースベクトルを有する貫通らせん転位あるいは貫通混合転位となる. 後述するように, (I), (II)は貫通混合転位, (III)は貫通らせん転位であるが, これらを X 線トポグラフィ像から識別することはほぼ不可能である. これは, 4H-SiC のらせん成分のバーガースベクトルが刃状成分のバーガースベクトルと比較して3倍以上大きく, 刃状成分の有無や向きによって X 線トポグラフィ像におけるコントラスト形状はほとんど変化しないためである. しかし, 偏光観察との比較をすると, その差は一目瞭然である. 図5(b)の偏光観察像において, (I), (II)の貫通転位の位置には明確なコントラストが形成しているのに対して, (III)の位置には明確なコントラストが認められない. これは, (I), (II)の貫通転位がバーガースベクトルにらせん成分に加えて刃状成分を有する貫通混合転位であり, (III)の貫通転位がバーガースベクトルにらせん成分のみを含む貫通らせん転位であるためである. また, 偏光観察におけるコントラストのパターンから刃状成分の方向も決定することが可能である. (I)の貫通混合転位のバーガースベクトルの刃状成分は $1/3[\bar{1}2\bar{1}0]$ であり, (II)の貫通混合転位のバーガースベクトルの刃状成分は $[01\bar{1}0]$ となる. さらに X 線トポグラフィ像のコントラスト形状から, バーガースベクトルのらせん成分の正負も決定することができ, 最終的には表2のように貫通らせん転位, 貫通混合転位のバーガースベク

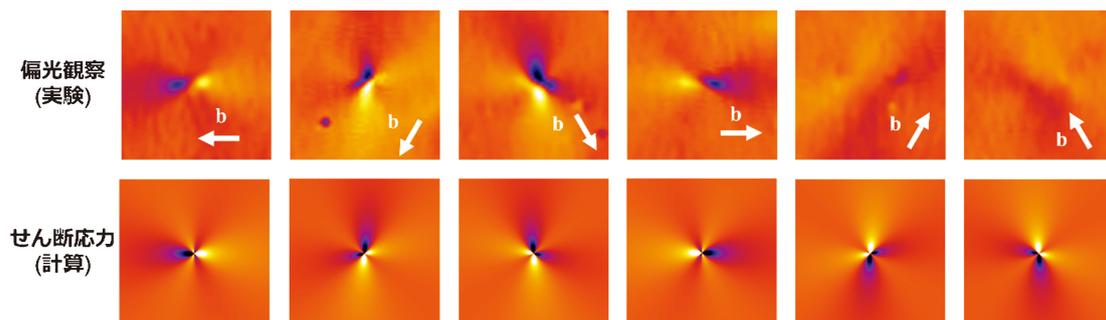


図6 6方向の貫通刃状転位の面内せん断応力分布の計算結果と偏光観察像の比較. (オンラインカラー)

表2 X線トポグラフィ像と偏光観察像から決定した、図7の貫通転位のバーガースベクトル。

貫通転位	バーガースベクトル
(I)	$\frac{1}{3} [\bar{1}2\bar{1}3]$
(II)	$[0\bar{1}11]$
(III)	$[000\bar{1}]$

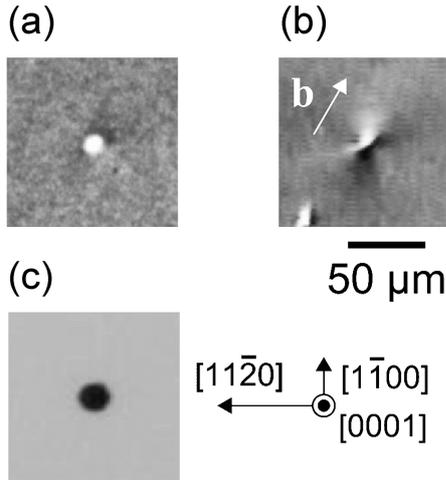


図7 検証のために選ばれた貫通混合転位の放射光X線トポグラフィ像と偏光観察像および、エッチピットの光学顕微鏡像。

トルを決定することができる。このように、放射光X線トポグラフィと偏光観察を組み合わせることによって、比較的簡便に非破壊で貫通転位のバーガースベクトルを決定することが可能である。

X線トポグラフィ観察と偏光観察を組み合わせた貫通混合転位のバーガースベクトルの決定法の検証を行うために、透過電子顕微鏡法によるバーガースベクトルの決定との比較を行った⁽²⁸⁾。図7は、検証のために選ばれた貫通混合転位の放射光X線トポグラフィ像と偏光観察像である。X線トポグラフィ像において、大きな明点の上側に暗部が観察され、これによりバーガースベクトルのらせん成分は、 $[000\bar{1}]$ であると考えられる。また、偏光観察のパターンから、バーガースベクトルの刃状成分が、 $1/3[1\bar{2}10]$ と決定され、この貫通混合転位のバーガースベクトルは、 $1/3[1\bar{2}1\bar{3}]$ であると予想される。溶融KOHエッチングによりエッチピットを形成した後、収束イオンビーム(Focus ion beam: FIB)法によってこの位置の透過電子顕微鏡試料を作製し、大角度収束電子回折法(Large-angle convergent-beam electron diffraction: LACBED)による観察を行った。図8に、図9で示された貫通混合転位から得られた3つの異なる g ベクトルで撮影された暗視野LACBEDパターンを示す。図中で、 d と記された線は転位線を示し、 l は高次ラウエゾーン(Higher order Laue zone: HOLZ)反射線を示す。転位のひず

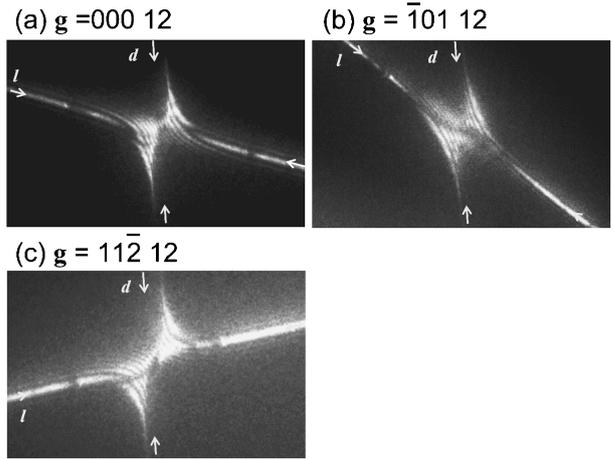


図8 3つの異なる g ベクトルで撮影された暗視野LACBEDパターン。

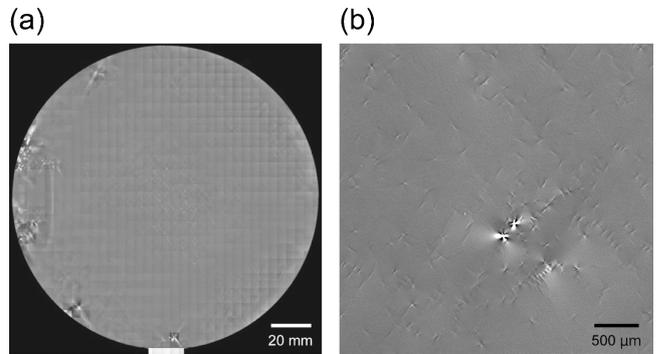


図9 6インチSiC基板の偏光観察像。

み場によってHOLZ反射線はねじれを示すが、このねじれの節の数 n とバーガースベクトル \mathbf{b} 、反射の逆格子ベクトル \mathbf{g} の間には、 $\mathbf{g} \cdot \mathbf{b} = n$ の関係がある⁽²⁹⁾。この節の数を読み取り、連立方程式を解くことでバーガースベクトル \mathbf{b} を決定することができる。表3は図8から読み取った n と g ベクトルの関係をまとめたものである。この場合、貫通混合転位の3指数でのバーガースベクトルを $\mathbf{b} = [uvw]$ と、おくと下記の連立方程式を満たす。

$$\begin{pmatrix} 0 & 0 & 12 \\ -1 & 0 & 12 \\ 1 & 1 & 12 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} u \\ v \\ w \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -12 \\ -12 \\ -13 \end{pmatrix} \quad (21)$$

この式を解くと、貫通混合転位のバーガースベクトルは、三指数で $[0\bar{1}\bar{1}]$ と決定することができ、これを4指数に直すと $1/3[1\bar{2}1\bar{3}]$ となり、X線トポグラフィと偏光観察によって決

表3 図8から読み取った n の値。

g	n
000 12	-12
$\bar{1}01$ 12	-12
$1\bar{1}\bar{2}$ 12	-13

定したバーガースベクトルと完全に一致する。以上の結果から、貫通混合転位のバーガースベクトルは、X線トポグラフィと偏光観察を組み合わせることによって、非破壊に決定できることが確認された。

Ondaらは、透過電子顕微鏡による観察結果との比較から、バーガースベクトルに特定の刃状成分を持つ貫通混合転位がSiCパワーデバイスのリークの原因となることを報告している⁽⁷⁾。本節で紹介した偏光観察とX線トポグラフィを組み合わせたバーガースベクトルの決定法を用いれば、広範囲にわたる多数の貫通混合転位のバーガースベクトルを非破壊で評価することが可能となり、SiCデバイスにおけるリークの原因を特定し、SiCパワーデバイスの信頼性、歩留りの向上に寄与することが期待される。

4. パワーデバイス SiC 基板の検査システム

直交ニコルからわずかにずれた偏光観察では、転位の応力場を直交ニコルでの観察と比べて強いコントラストで観察することが可能であるため、SiC基板の検査に応用することができると考えられる。我々は、光学系や検出システムに改良を重ねることで、6インチSiC基板全面を約15分で観察することができる検査システムXS-1 Siriusを開発した⁽²¹⁾。図9に6インチSiC基板全面の撮影画像とその一部を拡大したものを示す。全面の画像(図9(a))を見ると、マクロスケールで大きなコントラストが基板の外周部分に認められるが、これは小傾角粒界や転位クラスター、炭素粒子や結晶多形の巻き込みなどによって形成されたマクロ欠陥であると考えられる。通常、このようなマクロ欠陥は、結晶品質の良い基板には含まれていないが、偏光観察によってマクロ欠陥の有無や位置を特定することができ、SiC基板の品質管理や受入検査に用いることが可能である。また、マイクロパイプは他の貫通転位と比較して大きな応力場を形成するため、図9(b)のように転位のコントラストよりも強いコントラストを示し、容易に識別することが可能である。

このように、開発されたシステムを用いると、6インチ基板を高速かつ詳細に欠陥評価を行うことが可能である。検査用途としては、不良が発生した際に、遡ってその位置にどのような欠陥があったかを確認することも必要であるが、品質管理では、欠陥の分布や密度の情報が求められる。マイクロパイプやマクロ欠陥は明確なコントラストを示すため、画像処理によって比較的容易に欠陥の自動検出が可能である。一方で、貫通転位のコントラストは弱く、また複雑であるため、単純な画像処理では自動検出が難しい。特に、裏面の研磨の仕上がりによっては、裏面での光の乱反射によってコントラストがさらに弱くなる場合もある。そこで、我々は偏光観察像において貫通転位のコントラストを自動検出するためのアルゴリズムを検討した⁽²²⁾。

直交ニコルからわずかにずらした条件での偏光観察では、貫通転位のコントラストは常に明暗のコントラストの組み合わせとなる。これは、刃状転位の周りの面内せん断応力の分

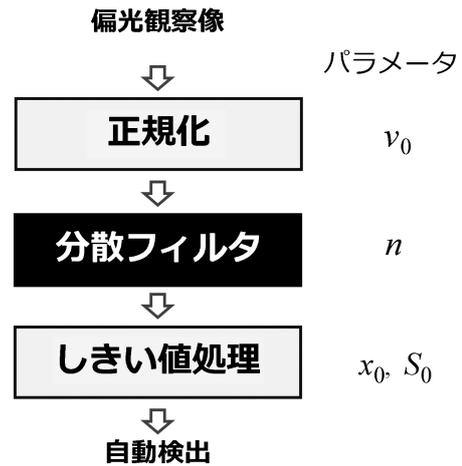


図10 貫通転位のコントラストを自動検出するアルゴリズムの流れを示すフローチャート。

布を考えると、正になる領域と負になる領域が常に組み合わせられることを考えれば理解することができる。したがって、貫通転位の近傍では、強度の変化が大きいと考えられる。そこで、我々は取得された偏光観察像に分散フィルタを適用した。分散フィルタは、画素近傍の分散の値を出力するフィルタであり、局所的なコントラストの変化を検出するのに非常に効果的で、画像中の明暗の変化が激しい部分を強調することが可能であり、貫通転位のコントラストの位置を自動検出するのに有用であると考えられる。

図10は、貫通転位のコントラストを自動検出するアルゴリズムの流れを示すフローチャートである。まず、取得された8ビットの偏光観察画像は線形に正規化され、正規化された画像の平均強度を128、分散が v_0 になるように調整される。この正規化プロセスにより、異なるコントラストレベルの画像であっても、再現性良く転位のコントラストを検出することが可能となる。次に、正規化された画像に分散フィルタを適用する。分散フィルタでは、中心の画素値を、それを囲む $n \times n$ (n は奇数)ピクセル値の分散で置き換える。その後、しきい値(x_0)を使用して画像を二値化し、白黒画像を得る。この画像では、白の画素はそれを囲む $n \times n$ の分散値がしきい値より大きいことを意味する。次に、白い画素が接続している領域をグループ化し、最後に、各領域が含まれる最小の長方形を計算して、面積がしきい値(S_0)より小さいものを除去する。

このような手順によって自動検出を行った結果を図11に示す。図11(b)に示される分散マッピングでは、貫通転位のコントラストの近くでのみ分散の値が大きいことが確認できる。また、しきい値処理の後、転位コントラストが存在しない位置にもノイズによるコントラストが現れているが(図11(c)), 矩形のサイズに対する面積のしきい値処理により、これらのノイズは図11(d)でほとんど検出されなかった。最終的に、このアルゴリズムによってほとんどすべての転位コントラストが比較的高い精度で検出されたことがわかる。

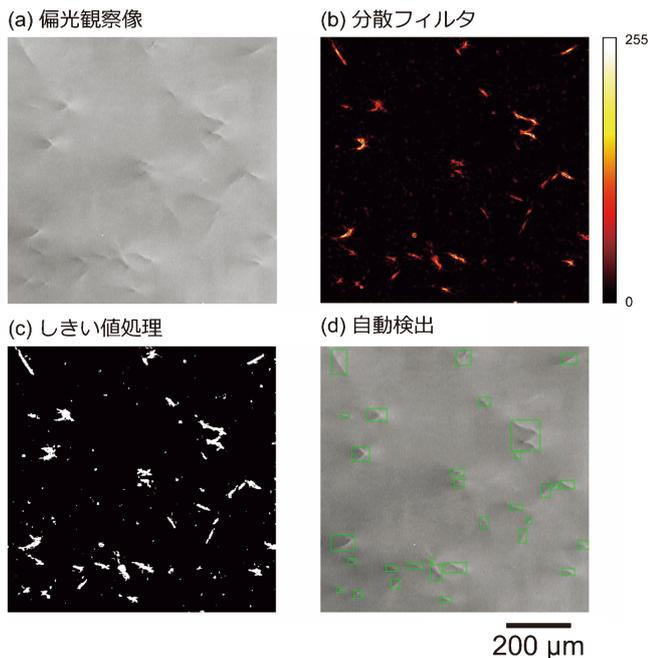


図11 偏光観察像への自動検出アルゴリズムの適用結果. (a) 元画像, (b)分散フィルタ, (c)しきい値処理, (d)自動検出の結果. (オンラインカラー)

自動検出の結果を詳しく見ると、二種類の誤検出があることが分かった。一つは複数の転位コントラストが一つの転位コントラストとして検出されるものであり、ここでは、これを「多重検出」と呼ぶ。もう一つは、非常に弱いコントラストが検出されなかった「真陰性」である。複数の自動検出の結果を確認したところ、多重検出、真陰性の割合はそれぞれ5%以下であり、転位密度の分布に大きな影響を与えるものではないことが明らかとなっている。また、多重検出については、近年の結晶成長技術の進展から、転位密度が低くなるにつれて減少しており、最近の結晶品質の良いSiC基板では多重検出による誤検出はほとんどなくなっている。また、裏面の研磨状態や観察条件の改善によって、真陰性を減少させることも可能であり、我々が設計したアルゴリズムによって、偏光観察像から転位のコントラストを高精度で自動検出することが可能である。

転位のコントラストの自動検出アルゴリズムは、欠陥検査システムに実装されており、観察したSiC基板の貫通転位の欠陥分布を確認することが可能である。図12に、自動検出アルゴリズムを用いて出力した、SiC基板の貫通転位密度の分布を示す。SiC基板の貫通転位の分布は基板の製造メーカーや製造ロットによって特徴的なものとなるが、この基板の場合、中央部分に比較的転位密度が高い領域が形成しており、また、マクロ欠陥の近傍において、貫通転位の密度が高くなっていることが見て取れる。以上のように、開発された偏光観察を用いたSiC基板の検査システムは、高速に、マクロ欠陥や転位の分布を観察することが可能であり、SiC基板の受入検査や品質管理、パワーデバイスの不良特定などに活用されることが期待される。

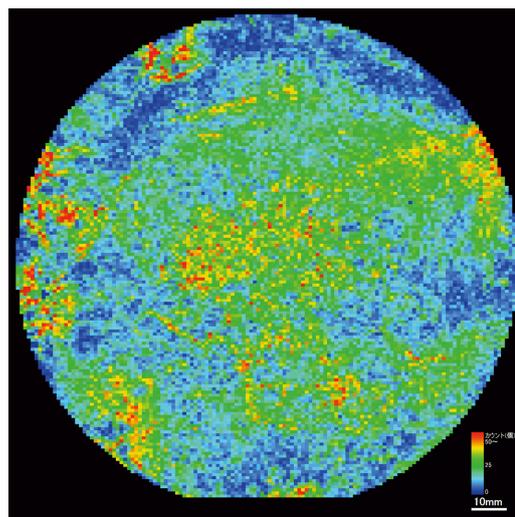


図12 自動検出アルゴリズムを用いて出力した、SiC基板の貫通転位密度の分布. (オンラインカラー)

5. おわりに

本稿では、偏光観察技術を用いてSiC基板の結晶欠陥の評価と可視化の進展について解説した。直交ニコルからわずかにずらした条件での偏光観察により、SiC基板内の貫通転位の面内のせん断応力分布が可視化されることを、理論と実験の両面から示し、X線トポグラフィと偏光観察を組み合わせることで、非破壊で貫通混合転位のバーガースベクトルの詳細な分析が可能であることを示した。さらに、開発された検査システム「XS-1 Sirius」は、6インチSiC基板を短時間で検査する能力を有し、迅速に詳細なSiC基板の欠陥検査が実現できることを示した。本稿で紹介した技術は、SiC基板やSiCパワーデバイスの研究開発、更にはSiC基板の品質管理や、パワーデバイス製造の生産性向上に寄与することが期待される。

本稿で紹介した偏光観察による半導体結晶の欠陥評価に関する研究は、Mipox株式会社と名古屋大学との共同研究の成果でありNEDO官民による若手研究者支援事業(JPNP20004)の支援を受けて行われた。共同研究者であるMipox株式会社の水谷誠二氏、水谷優也氏、水谷誠也氏、名古屋大学の松原康高氏、川瀬道夫氏、瀬尾圭介氏に感謝の意を示したい。

文 献

- (1) T. Kimoto and Y. Yonezawa: Mater. Sci. Semicond. Process., **78**(2018), 43-56.
- (2) T. Kimoto and H. Watanabe: Appl. Phys. Express, **13**(2020), 120101.
- (3) T. Kimoto: Jpn. J. Appl. Phys., **54**(2015), 040103.
- (4) T. Kimoto: Prog. Crystal Growth Charact. Mater., **62**(2016), 329-351.
- (5) H. Matsunami and T. Kimoto: Mater. Sci. Eng.: R: Rep., **20**

