

パワーデバイス特集③

SiC ウェーハの結晶欠陥と新型X線トポグラフ装置

表 和彦*

1. はじめに

SiCはバンドギャップがSiの3倍程度あり、さらに、10倍近い絶縁破壊電界強度を持つ物質である。これは、結晶内の原子間の結合が極めて強いことの結果である。しかし一方、このような強固な結合力により、SiCは高温においてもそのままの組成では融解せず、2800℃以上、100気圧においても、Cを約19%含んだSi融液と固体グラファイトが共存する相となる。したがって、Siのように、融液から直接結晶を成長させる方法が適用できず、デバイス化に必要な大口径の単結晶育成に大きな困難が伴う。そのような中、現在では主に昇華再結晶法⁽¹⁾によって単結晶の成長が行われている。この方法では原料となるSiCを2500℃程度の高温で昇華させ、それを2200℃程度の領域に置いた種となる単結晶上に成長させるものである。このとき、結晶成長速度は、昇華速度によって律速される。また、非常に高温でのプロセスのため、基板結晶への不純物の取り込みや熱応力による結晶欠陥の発生が常に問題となる。しかもSiCは結晶形の異なる多くの多形を含むため、結晶形の制御や双晶の混入にも注意を払う必要がある。近年の開発の進展によってこれら多くの問題が解決され、マイクロパイプと呼ばれるデバイス性能に決定的な影響を及ぼす結晶欠陥をほぼゼロにまで低減し、大口径6インチウェーハの供給も行われるまでに至った。それでも、このような高温における結晶成長は、依然として大きなコストのかかる難しいプロセスであり、結晶中には多くの転位などの欠陥が含まれている。そのため、他の溶液成長法やガス成長法などの検討を含め、さらなる技術的進歩が求められている。

結晶成長がこのような高温でのプロセスのため、バルク単結晶成長時に半導体デバイス製作に必要な不純物濃度の制御は容易ではない。そこで、実際のデバイス製作においては、バルクウェーハ上にCVD法によ

りホモエピタキシャル成長層を形成する。特に、六方晶のSiC結晶におけるC面に対し4°から8°程度傾けてカットした基板を用いることにより、原子面のステップに沿って結晶成長が起こるステップフロー機構『ステップ制御エピタキシー』⁽²⁾が提案された。これにより、単結晶成長温度より低い1500℃においても、良質の結晶性を持つエピタキシャル層を得ることができるだけでなく、p, n両伝導性の精密制御も可能であることが示された。このような粘り強い研究により、SiCを用いたデバイスの実用化が現実のものとなった。また、このような技術的進展において、日本の果たして来た役割は極めて大きく、現在でも世界をリードする立場にある⁽³⁾。

2. SiCの結晶構造と結晶欠陥

すでに述べた通りSiC結晶には多くの多形が存在するが、その中でデバイス応用が期待される典型的な結晶形には、立方晶系の3C-SiCおよび六方晶系でc軸方向の繰り返しパターンが異なる4H-SiCおよび6H-SiCがある。これらは、SiとC原子の積層順序が図1に示すように、それぞれ、ABCA, ABCBA および AB-

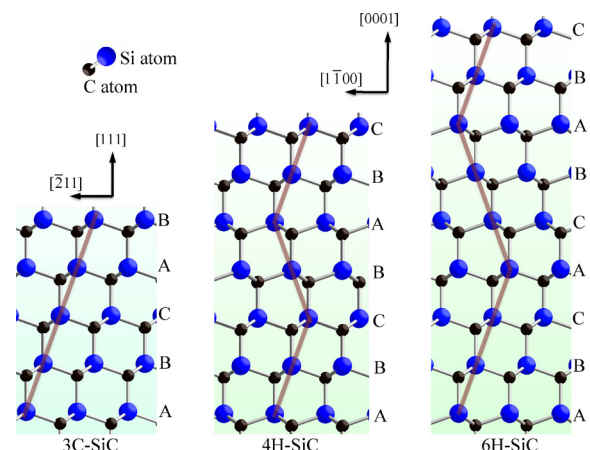


図1. 3C-, 4H- および 6H-SiCの結晶構造。それぞれ、最密充填面の積層順序が異なっている。

*株式会社リガク X線研究所

CACBAの繰り返しパターンを持っている。このように積層順序のみが異なる多くの結晶多形を持つことから、結晶成長時に積層パターンの異なる、積層欠陥と呼ばれる欠陥が生じやすい。先に述べたステップ制御エピタキシー⁽²⁾は、 c 軸方向だけでなく、 ab 軸方向への成長を伴うため、積層順序が正しく制御され積層欠陥の少ないエピタキシャル膜の成長が可能になる。現在最もデバイスへの応用が進んでいる4H-SiC ウェーハのオリエンテーションフラットと結晶方位関係および c 軸のオフ角の関係を図2に示す。これはSEMI規格⁽⁴⁾によって決められており、市販のウェーハは通常これに従って作られている。

前節で述べたように、SiCの結晶成長は非常に高温下の難しい条件で行われ、現状のウェーハには多くの結晶欠陥が存在する。ここで、六方晶のSiC結晶における転位欠陥を表1にまとめた⁽⁵⁾。貫通らせん転位のバーガースベクトルの大きさは、 c 軸長に一致するが、結晶成長条件によって、この整数倍の大きなバーガースベクトルを持つ転位が発生する。これをマイクロパイプ⁽⁶⁾と呼び、転位中心に直径10数 μm の微細孔を伴う。これはデバイス特性に致命的な悪影響を及ぼすものであることがわかっている。ただし最近では成長制御技術の進歩により、マイクロパイプがほぼゼロの4インチウェーハが得られるようになってきた。

さらに、SiCデバイスにおける活性領域は、バルク成長によって得られるウェーハに直接作られるのではなく、基板上に、ステップ制御エピタキシーによって得られる膜上に形成される。このことにより、基板内

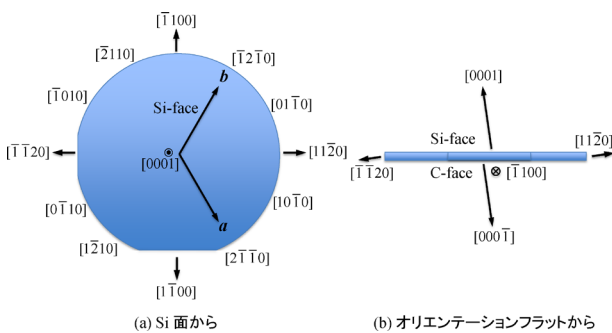


図2. SEMI規格で定められた4H-SiC ウェーハのオリエンテーションフラットと結晶方位の関係。
(a) Si面から見たもの、(b) 第1オリエンテーションフラットの側から見たもの。

の貫通らせん転位と貫通刃状転位はほとんどそのままエピタキシャル膜内に引き継がれる一方、基底面転位の95%以上は貫通刃状転位に変換されることが知られている⁽⁷⁾。また、一部の貫通らせん転位は、積層欠陥や「キャロット欠陥」と呼ばれる大型欠陥の起点となることがある⁽⁸⁾。

以上のように、SiC ウェーハは依然多くの転位などの結晶欠陥を含み、デバイスもそれらの欠陥の存在する結晶中に作らざるを得ない。したがって、「結晶欠陥とデバイス特性」の関係を明らかにすることは、製造された素子の歩留まり向上や長寿命化といった観点からも、極めて重要な課題となる。しかし、通常のエッチング等による結晶欠陥検査法は破壊検査であり、欠陥の存在とデバイス特性を一対一で対応させることができない。一方、X線による測定は、基板やエピタキシャル膜を壊すことなく評価ができるという大きな特徴がある。特にX線トポグラフ法によりウェーハ上における欠陥の位置やその種類を測定することによって、同じ場所に作られたデバイス特性と結晶欠陥を比較検討することが可能となる。さらに、製品となるウェーハそのものを測定することも可能であるため、ウェーハやエピタキシャル膜の品質管理ツールとしても有効であると期待される。

3. X線トポグラフによるSiC結晶の欠陥測定

図3に、典型的なX線トポグラフにおける測定配置

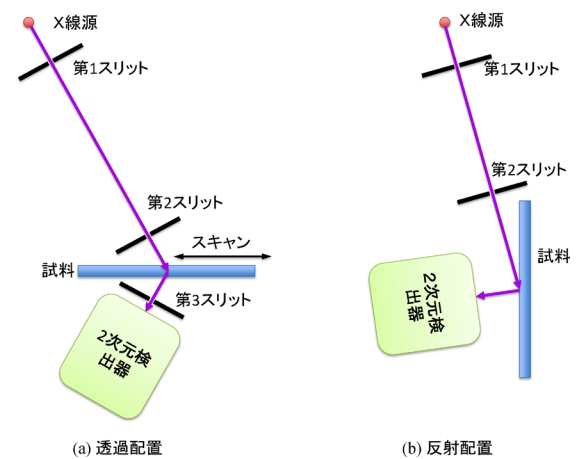
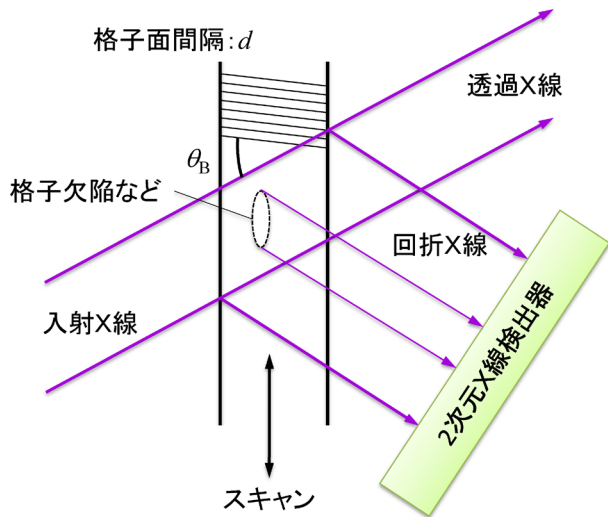


図3. X線トポグラフの光学系概念図。
(a) 透過配置、(b) 反射配置。

表1. 六方晶SiCに発生する転位の種類と市販ウェーハの典型的転位密度⁽⁵⁾

	転位の方向	すべり面	バーガースベクトル	転位密度(cm^{-2})
貫通らせん転位	$\langle 0001 \rangle$	-	$\langle 0001 \rangle$ あるいは 2 倍	10^2 - 10^3
貫通刃状転位	$\langle 0001 \rangle$	($1\bar{1}00$)	$1/3 \langle 11\bar{2}0 \rangle$	10^3 台- 10^4 台
基底面転位	(0001)面内で任意安定方位： $\langle 11\bar{2}0 \rangle$	(0001)	$1/3 \langle 11\bar{2}0 \rangle$	10^3 台- 10^4 台



ラングトポグラフの概念

図4. ラングトポグラフの概念図。試料を図の上下方向にスキャンすることにより、試料の広い領域にわたって内部の結晶欠陥の様子が映し出される。

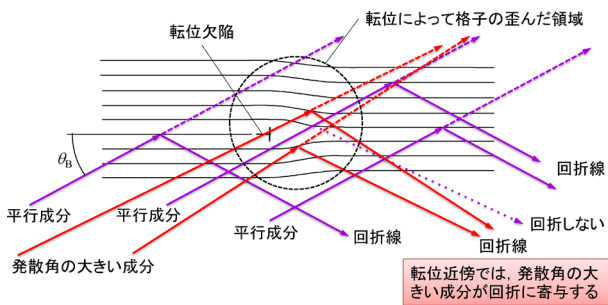


図5. 結晶内部に転位が存在し、結晶格子面が歪んだ場合に生じるX線回折に対する影響。

を示す。(a)で示す透過配置は、ラング法⁽⁹⁾と呼ばれ、結晶内部の転位や積層欠陥を測定する手段として最も一般的に使われている方法である。図4で示すように透過配置で適当な格子面に対しブラッグ条件を満たす角度でX線を入射し、回折したX線像を撮影する。もともとのラング法では、2次元検出器にX線フィルムを用い、試料とフィルムを同時にスキャンすることにより、広い範囲（結晶全体）のX線回折像をフィルム上に記録する。このとき、試料内部に格子欠陥などが存在すると、X線回折像の乱れとして検出される。その理由を図5によってもう少し詳しく説明する。欠陥のない完全に近い結晶の場合、数arc secから10 arc sec程度の極めて平行なX線成分はほぼ確率1で回折を起こすのに対し、それ以外の角度成分のX線が入射しても、そのまま試料を素通りしてしまう。一方、結晶内に転位欠陥が存在するとその周辺の結晶格子面に歪みが生じ、100 arc secあるいはそれ以上の角度発散を持った入射X線も回折に寄与することができる。通常のラング法の測定では、ある程度大きな発散成分を持

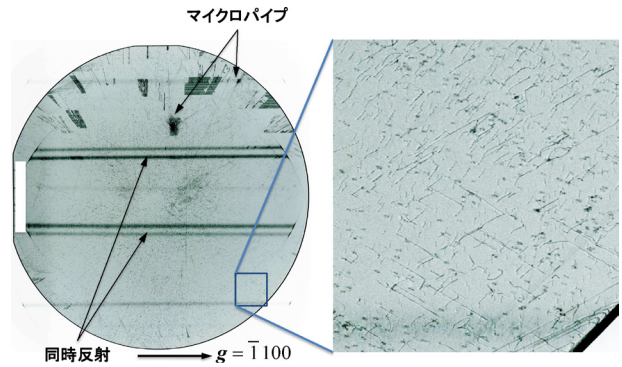


図6. ラング法によって測定された3インチ径の4H-SiC ウェーハの $\bar{1}100$ 反射透過トポグラフ像。1本1本の転位が明瞭に観察される。従来の封入管装置で写真フィルムによる測定、測定時間は10時間以上。

つX線を入射するため、それらが回折に寄与することにより、転位の存在する部分の回折強度が強く観測される。それに対し、結晶コリメータを用いた場合や放射光において結晶の回折幅に近い数arc sec程度の平行度を持つX線を入射した場合は、転位近傍はブラッグ条件を満たさないため、逆に回折強度が弱く観測される。いずれの場合も、転位間の距離が10 μm から数10 μm 程度離れて存在していれば、それぞれの転位を独立なものとして、分離して観測することが可能となる。

図6に実験室において $\text{MoK}\alpha_1$ 線を用い、 $\bar{1}100$ 反射を用いて測定した3インチSiCウェーハ全面をスキャンして得られた透過トポグラフ像を示す（強度の強い部分を黒く表示＝ネガ）。ここでは、2次元検出器としてX線フィルムを用い、図3(a)に示す配置において、試料とX線フィルムを同時にスキャンして測定した。右の拡大図に示すように、線状の黒い転位像が1本1本独立に観測されている。これらは、表1で分類した基底面転位あるいは貫通刃状転位の像である。また、点状に写っているのは、貫通らせん転位が表面に出て来た点であると考えられる。これらの転位像が黒く写っている理由は、図5で説明したように、入射X線の発散角成分が回折に寄与し、結果として転位像近傍の回折強度が増大したためである。

このように、最近のSiCウェーハは結晶性がかなり向上し、一つ一つの転位像を明確に区別して観測できるまでになってきている。ただし、図6中に、転位が集中し、黒い塊となって現れている部分が2カ所ほど見られる。これは前節で述べたマイクروパイプであると考えられる。また、横方向に2本の線が対になって現れているのは、同時反射と呼ばれ、本来の $\bar{1}100$ 反射と別の指数の反射が同時にブラッグ条件を満足して生じたもので、それぞれ、 Mo の $\text{K}\alpha_1$ 、 $\text{K}\alpha_2$ 線に対応している。これは、トポグラフ測定においてはバックグラウンドであって好ましくないものであるが、広い面

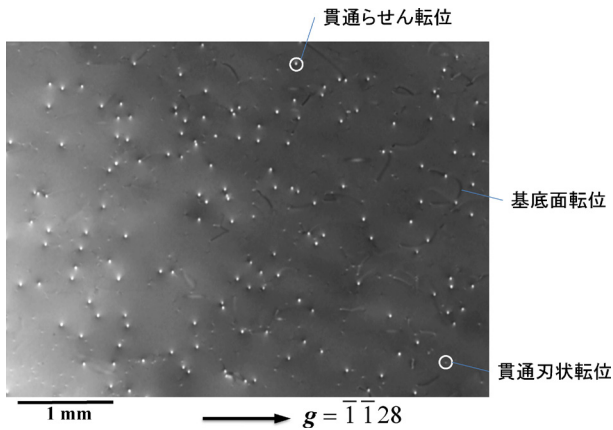


図7. 放射光源 (PF BL-15C) において測定した反射配置での $\bar{1}\bar{1}28$ 反射による SiC ウェーハのトポグラフ像。原子核乾板使用。基底面転位、貫通らせん転位および貫通刃状転位が観測される。

積を同時に測定する写真フィルムを用いたラング法の測定では、ある意味避けることのできないものである。本測定では、X線源に 40 kV-50 mA の封入管を用い、露光に 10 時間以上を要している。このように、従来の写真フィルムを用いた方法は、どうしても測定時間が長くなる問題点があった。

先述したように、SiC デバイスの活性層は、基板上に形成されたエピタキシャル膜上に作られる。したがって、エピタキシャル層における結晶性を評価することがさらに重要である。そのためには、図3(b)で示される反射配置の測定が有効である。図7にフォトンファクトリー BL-15C において測定した、3 インチウェーハ上のエピタキシャル膜に対する反射トポグラフ測定結果を示す。この測定では、モノクロメータに Si 111 を用い、波長 $1.5 \text{ \AA}$ の X 線を取り出している。また、X 線画像の検出には、分解能の極めて高い ($1 \mu\text{m}$ 以下) 測定が可能な原子核乾板を用いている。測定した基板のオフ角は 4° であるため、 $\bar{1}\bar{1}28$ 反射における X 線入射角は約 9° となる。この角度によって X 線侵入 (分析) 深さが決められ、今の場合は $10 \mu\text{m}$ 程度である。得られたトポグラフ像には、SiC 結晶における 3 種の転位像が認められる。まず、大きく白く抜けた点状の像は、貫通らせん転位で、周囲に大きな歪みを伴っているため、周辺部にも白黒のコントラストが認められる。基底面転位は、線状の白または黒いラインとして現れている。また、わずかに認められる非常にコントラストの弱い小さな点が、貫通刃状転位である。放射光においては、平行ビームを用いているため、転位近傍の格子歪みが大きい部分からの回折強度が弱く、白く抜けた像として観測されている。

以上、透過配置および反射配置の X 線トポグラフによって実際に得られる SiC の転位像について見て来た。このようにして、非破壊で転位密度等の定量的計

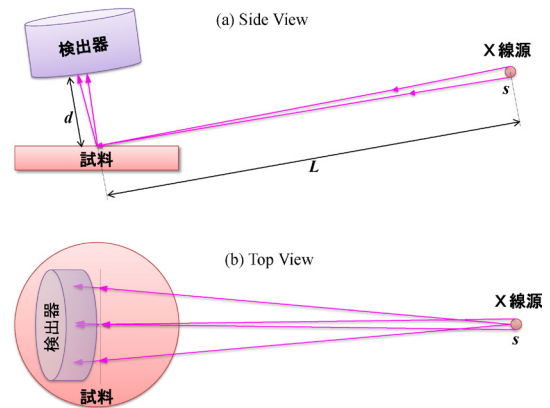


図8. トポグラフの分解能を決める幾何学的要素。(a) side view から見る方向では、結晶の回折幅、(b) top view から見る方向では、光源サイズ S 、光源-試料間距離 L および試料-検出器間距離 d の関係で決まる。

測が可能であり、結晶欠陥とデバイス特性との関連を研究する上でも有効な手段となる。

4. 新型 X 線トポグラフ装置

X 線トポグラフ法は半世紀以上の歴史を持っているが⁽⁹⁾、他の X 線回折装置と同様、放射光の登場によって、非常に大きな進歩を遂げた⁽¹⁰⁾。また、実験室の装置においても、近年の要素技術の進歩を取り入れることにより、大きく性能を向上することが可能になってきた。その大きな要素は、1) X 線源、2) 光学素子、3) 2 次元検出器である。実験室の発散光源を使ってトポグラフ測定を行うためには、特性線の $K\alpha_2$ 成分が試料によって回折しないよう、入射側にコリメーターを配置する必要がある。通常そのために、図3で示したようなスリットを挿入する。しかし近年、表面を放物面形状とし、そこに X 線を回折する多層膜を形成したモノクロメーター・コリメーターが開発され、X 線回折の分野で広く使われるようになってきた⁽¹¹⁾。これにより、機械的なスリットを用いることなく、 $K\alpha_1$ 成分のみを用いた試料による回折像を得ることが可能となった。ただし、この素子の性能を活かすためには、X 線源の微小点化・高輝度化が不可欠であったため⁽¹²⁾、その目的にあった回転対陰極型の高輝度線源である MicroMax-007HF や FR-E SuperBright などが開発されてきた。

X 線源の高輝度・微小点化はトポグラフ測定においても大きな意味を持つ。検出器の位置分解能を別にすれば、トポグラフの分解能を決めているのは、図8に示すように、主に X 線源の大きさとビームの平行度である。入射・回折線が含まれる面内 (Side View) では、回折した後の X 線の角度発散を δ とすれば、試料-検出器間距離を d として、検出器上での広がり δd となる。通常、結晶の回折幅は数 arc sec であるので、 $\delta d \sim$



図9. 従来方式の300 mm ウェーハ用トポグラフ装置.

$1\text{ }\mu\text{m}$ は容易に達成される. 一方, それと直交する方向 (Top view) では, 検出器上での広がり は純粋に幾何学的な配置によって決まり, X線源の大きさを S , X線源-試料間距離を L とすれば, $d/L \times S$ である. MicroMax-007HFの光源サイズは直径 $70\text{ }\mu\text{m}$ であるので, $L=800\text{ mm}$, $d=20\text{ mm}$ の場合, $d/L \times S < 2\text{ }\mu\text{m}$ となる. 以上のように, X線光学的には, 分解能 $1\sim 2\text{ }\mu\text{m}$ の測定が可能であることがわかる.

トポグラフのようなイメージングに求められる性能は, 単にX線の平行性や単色性だけでなく, ビームの一様性 (均一性) が重要となる. つまり, 多層膜ミラーからのX線ビームに不均一性があると, それが試料による回折 (欠陥) 像と重なってしまう. この点についても, 最近の精密形状制御法の開発により, 極めて均一なX線ビームが得られるようになった. 具体的には, 表面形状の設計値からの誤差 (figure error) を角度に換算して 4 arc sec (条件が良ければ 2 arc sec) 以下に抑えることが可能となった. この角度誤差は, 通常の結晶の回折幅を下回り, 後のデータで示すように, トポグラフ像にほとんど影響を与えないレベルとなっている.

検出器に関しては, 近年X線回折の分野でも, 2次元的な画像を取り込むことのできるCCDやピクセル検出器が非常な進歩を遂げている. X線トポグラフ測定においては, 特に位置分解能が重要な特性となる. この点に関しては, 従来から使われているX線フィルムで数 μm , 原子核乾板を用いれば, $1\text{ }\mu\text{m}$ という分解能が得られており, 現状ではそれを超えるのは容易ではない. しかし, 後で見るように, われわれの開発したCCDを用いた2次元検出器も, 転位像を十分に分離して測定することが可能なレベルに達している. 測定後のデータ処理を考えると, このような新しい検出器によって, オンラインでデータを取り込むことの利点は非常に大きく, 今後, さらなる分解能と検出感度の向上が図られていくことが期待されている.

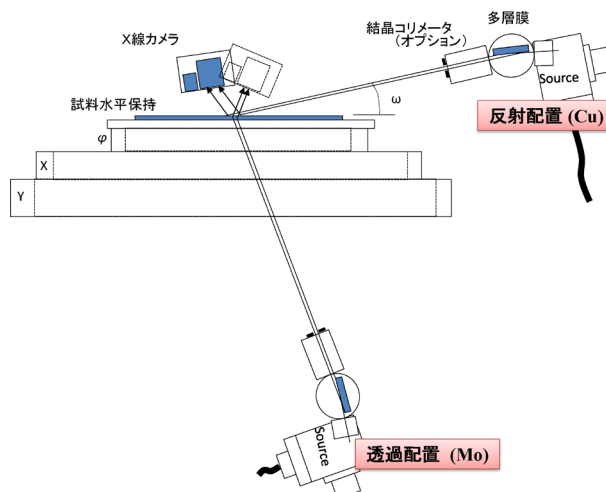


図10. 新型X線トポグラフ装置の概念図. 透過配置および反射配置に適した位置にX線源と光学系が移動する.

図9に, 従来のラング法を基本コンセプトとした300 mm ウェーハまで測定可能なトポグラフ装置 (XRT-300) を示す. 検出器にはイメージングプレート (IP) を用いており, 300 mmの高さ方向全体を測定視野に入れるために, X線源-試料間 1.4 m にもおよぶ非常に大型の装置となっている. このとき試料は2枚のフィルムに挟んで固定し, それを手動で試料カセットに取り付けているため, 試料自動搬送等には全く対応できていない. また, データの取り込みも, オフラインでIPを読み取るシステムとなっている. それらの問題点を克服するため, 先述した要素技術の進歩を取り入れ, 新型X線トポグラフ装置を開発した. その概念図を図10に示す. 試料は水平に保持し, 線源と多層膜を試料の回折条件を満たすよう, 一体に回転させる. 多層膜によって単色・平行なX線ビームが得られるため, 試料の近くのスリットは不要となる. また, 試料を水平に保持しているため, 試料の自動搬送にも容易に対応できる. さらに, 透過配置におけるMo線源と反射配置におけるCu線源をコンピュータ制御で切り替える機構を採用し (MicroMax-007HF(DW), 1.2 kW), 結晶内部を観測する透過トポグラフと表面付近の欠陥を観測する反射トポグラフを, 容易に切り替えて測定することができる.

図11および図12に, 以上述べてきた考え方によって開発した装置の内部構造および外観を示す. ここでは, 反射トポグラフにおけるゴニオメータの状態を表している. 透過トポグラフの測定には, θ_s が下方 (マイナス側) に移動し, 試料の下側からX線を照射して, 回折像を2次元検出器にて測定する. 2次元検出器に関しては, 現在のところ, ピクセルサイズが $5.4\text{ }\mu\text{m}$ の高感度カメラと, 同じく $2.16\text{ }\mu\text{m}$ の高分解能カメラの2つを同時に搭載できるようになっている. この試料ステージは, 最大試料サイズ300 mm, 自動搬送対

応となっているが、Z（試料上下）軸付き反射トポグラフ専用ステージや450 mm Si ウェーハステージへの変更も可能である。

本装置で測定した $\text{MoK}\alpha_1$ によるSiC ウェーハの透過トポグラフ像を図13に示す。図6に示した写真フィルムの像と同様、個々の転位が分離して観測されていることがわかる。測定に使ったのは、ピクセルサイズが $5.4\ \mu\text{m}$ の高感度カメラである。しかしこの検出器は、ウェーハ全面をカバーするほどの検出面積を持ってない。そこで試料を、図3(a)で示すようにスキャンするとともに、2次元検出器自身は固定したまま、検出器の各ピクセルのデータを試料の移動と同期してスキャンするTDI (Time-delay integration) という方法で

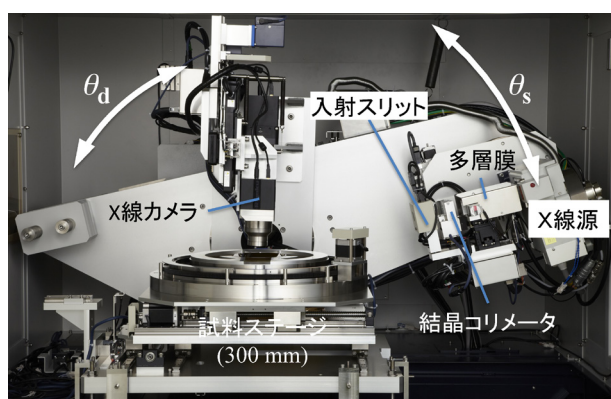


図11. 新型X線トポグラフ装置のゴニオメータ、試料ステージ部等の内部構造。

測定した。実際に1回のスキャンで得られる領域は、X線カメラの窓幅分（高さ約18 mm）の細長いリボン状となる。したがって、広い面積の測定には、試料をカメラの窓幅分ずつ移動しながら複数回スキャンする必要がある。図13の測定におけるスキャン速度は2 mm/sec、3インチウェーハ全体の測定に要した時間は全体で4分程度であった。これは、2 kW 封入管を用いた従来の装置におけるに比べて約100倍、18 kW 回転対陰極型（ローター）線源を使った場合に比しても

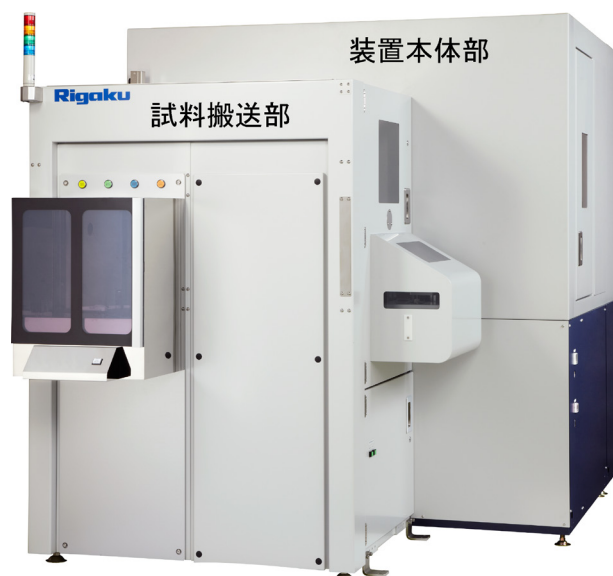


図12. 新型X線トポグラフ装置外観図。

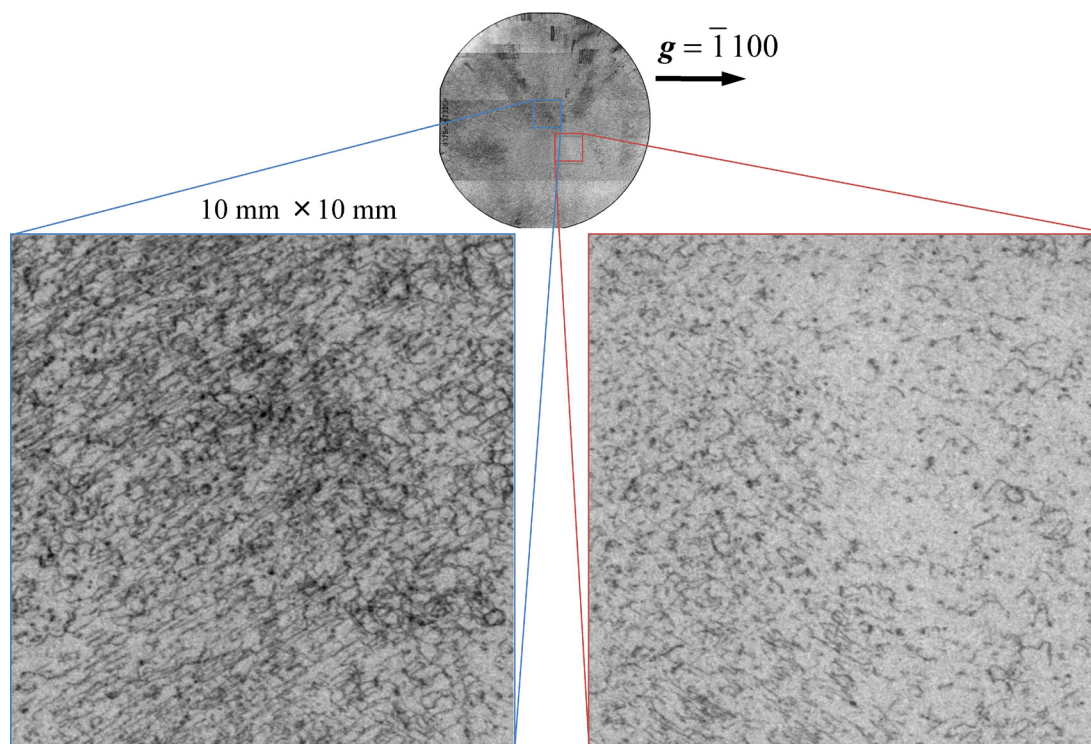


図13. 高感度X線カメラで測定した4H-SiC $\bar{1}100$ 反射による透過トポグラフ像。2 mm/secのスキャンスピードでも十分なコントラストで転位像がとらえられている。

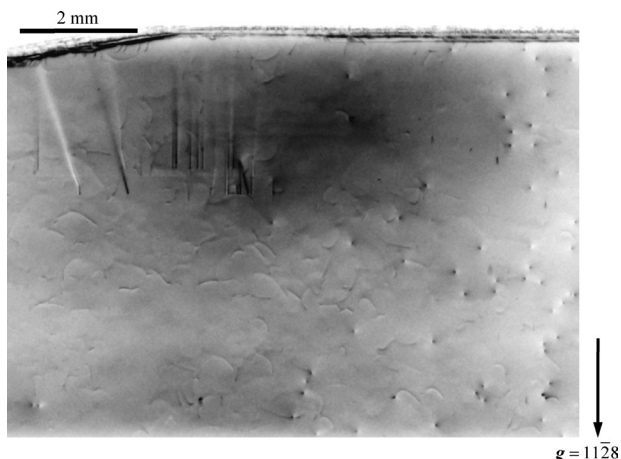


図 14. Si 440 二結晶反射による結晶コリメータを用いた 4H-SiC 11 $\bar{2}$ 8 反射による平行ビームトポグラフ。転位像が高いコントラストでとらえられている。

10倍以上高速である。ただし、ウェーハサイズが大きくなると、必要なスキャン回数が増えるため、300 mm ウェーハでは、この比は 1/3 程度に低下する。それでも、従来の実験室でのトポグラフの測定時間に対する常識を覆すほどの高速測定が可能である点は特筆すべきである。

次に反射配置によってエピタキシャル層を成膜したウェーハの 11 $\bar{2}$ 8 反射によるトポグラフの測定結果を図 14 に示す。ここでは、CuK α_1 線を用い、また微細な歪みに対する感度を高める目的で、入射側に Si 440 反射を用いた 2 結晶コリメータを挿入し、(+, -) 配置による測定を行った。Si 440 の CuK α_1 におけるブラッグ角は 53.36°、一方 4H-SiC の 11 $\bar{2}$ 8 反射のそれは 52.36°と両者は非常に近く、波長分散の少ない高い分解能の測定が可能である（疑似平行配置）。特にここでは、結晶のブラッグピーク角度ではなく、そこから回折条件をわずかにずらして測定を行っている。これによって回折強度の変化が強調され、線状に伸びた基底面転位および白黒のコントラストを伴った点状の貫通らせん転位が明瞭に観測されている。ただし、測定に用いた試料におけるエピタキシャル層の厚さは 10 μ m 程度であり、X 線が約 17°で入射していることを考慮すると、X 線はエピタキシャル膜だけでなく基板まで届いており、基底面転位に関しては、エピタキシャル層内でなく基板内部に存在している可能性もある。ちなみに、このウェーハの 0004 反射のロッキングカーブを測定すると、半価幅は約 10 arc sec であり、理論値に非常に近い値となっている。それでも、図 14 のように多くの転移像が観測されていることから、このレベルのウェーハ評価にはロッキングカーブ測定は十

分ではなく、トポグラフによる転位測定が有効であることが分かる。

5. おわりに

本稿では、主に次世代のパワーデバイスの主役となるであろう SiC に関し、結晶構造や結晶欠陥の種類およびそれに対するトポグラフ測定例を紹介した。また、このような新しいデバイスの開発や品質管理に役立つことを念頭において開発した新型トポグラフ装置の構成や測定結果も合わせて紹介した。ところで、従来良質な単結晶の育成が難しかった結晶で、新しいデバイス材料として注目を浴びているものに、GaN や AlN が挙げられる。GaN はすでにサファイヤ基板上に成膜した結晶を使って LED 照明などが実用化されているが、パワーデバイス等への応用に関しては、高い品質のバルク単結晶基板への要求が高まっている。GaN も同組成の液相を得るためには、1 万気圧、1500°C もの高温・高圧が必要である。そのため、SiC 同様、気相成長法や溶液成長法などによってバルク単結晶の成長が試みられている⁽¹³⁾。その意味では、結晶品質に関し、SiC と全く同様な問題点を抱えており、今後、GaN 系のデバイスにおいても、X 線トポグラフによる結晶評価の必要性が高まってくるものと考えられる。

参考文献

- (1) Yu. M. Tairov and V. F. Tsvetkov: *J. Cryst. Growth*, **43** (1978), 209–212.
- (2) H. Matsunami and T. Kimoto: *Mater. Sci. Eng.*, **R20** (1997), 125–166.
- (3) 松波弘之, 大谷 昇, 木本恒暢, 中村孝編著: 半導体 SiC 技術と応用, 日刊工業新聞社, (2011).
- (4) SEMI (Semiconductor Equipment and Materials International) International Standards M55-0308.
- (5) 星野泰三: 金属, **79** (2009), 960–964.
- (6) N. Otani, J. Takahashi, M. Katsuno, H. Hoshino and M. Kanaya: *Mater. Res. Sic. Symp. Proc.*, **510** (1998), 37–45.
- (7) H. Hara, Y. Sano, H. Mimura, K. Arima, A. Kubota, K. Yagi, J. Murata and K. Yamauchi: *J. Electron. Mater.*, **35** (2006), L11–L14.
- (8) H. Tsuchida, M. Ito, I. Kamata and M. Nagano: *Phys. Status Solidi*, **B246** (2009), 1553–1568.
- (9) A. R. Lang: *Acta Cryst.*, **12** (1959), 249–250.
- (10) 日本結晶学会誌 (特集 X 線トポグラフィの進展), **54**, No. 1 (2012).
- (11) M. Shuster and H. Gobel: *Adv. X-Ray Anal.*, **39** (1997), 57–71.
- (12) 清水一明, 表和彦: リガクジャーナル, **39** (2008), 1–9.
- (13) 天野浩: 応用物理, **81** (2012), 455–463.