# X線トポグラフ測定におけるスループットの劇的な向上

島本　憲太*

スループットを向上させた（10–20枚/hour, 3–6分/1枚）ウェーハ欠陥評価用途の高速X線トポグラフシステムをリガクは市場に投入した．発散ビームとハイブリッドピクセル検出器HyPix-3000HEの組み合わせで画像取得の高速化を実現したことにより，スループットが劇的に高いX線トポグラフ検査ツールを構築することが可能となった．本テクニカルノートでは，測定の高速化に寄与した2大要素，撮像準備工程の省略と撮像プロセスそのものの短縮について解説し，ウェーハの品質管理への利用を視野に入れた応用事例を紹介する．

## 1.　はじめに

世界的な潮流となりつつある「持続可能な開発目標」に則した工業生産活動の実現のために，エレクトロニクスやフォトニクス等の分野において各種デバイスの低損失化，高効率化が求められている．そのようなデバイスを作成するためには高品質な単結晶材料やウェーハが必須であるのは勿論だが，それら材料の品質を向上したり保証したりすることを目的とした測定・評価技法の技術向上も欠かすことができない．X線トポグラフィは，単結晶材料に潜む線欠陥・面欠陥を可視化する分析手法の一つであり，結晶構造の歪みに由来する回折強度コントラストを取得する．そのためドーピング濃度の変化など点欠陥による電子の状態の変化に対しては鈍感であるが，他の検査手法に比べて結晶の線欠陥や面欠陥を評価するのに有利である．2022年，リガクはハイブリッドピクセル検出器（HyPix-3000HE）を搭載した高速X線トポグラフ（XRT）システムの発売を開始し，単結晶材料やウェーハに内在する結晶欠陥情報を簡単かつ迅速に取得する手法を提供した．本テクニカルノートではその改善の技術的ポイントについて解説し，適用事例として4H-SiCウェーハの品質管理向け欠陥密度評価を取りあげる．

## 2.　HyPix-3000HE検出器を搭載した高速XRTシステム

XRTmicron[(1), (2)]を含む従来のラボ用XRTシステムの課題の一つはウェーハ全体のトポグラフ画像の撮影に要する時間である．ウェーハの搬送開始からトポグラフ画像撮像，ウェーハ取り出しまで数十分かかるため，品質管理に使うには時間がかかりすぎるのである．この難題を撮像準備工程の省略と撮像プロセスそのものの短縮によって克服し，10–20枚/hourの高スループットを実現した．特に検出面サイズ77.5 mm×38.5 mm，最大フレームレート120 fpsを有し，透過配置のXRT測定によく用いられる短波長のMo K$\alpha_1$線に対しても検出効率が高い，リガクのハイブリッドピクセル検出器HyPix-3000HEの利用がその実現に大きな寄与を果たした．本解説では，従来のシステムと対比させながら本システムの優位な点を説明する．

### 2.1.　撮像準備工程の省略

XRT画像取得に用いる回折信号は，X線が試料に対して回折条件を満たす適切な幾何学的方向から照射されたときにのみ得られる．従来のシステムでは，図1に示すように，X線ビームは入射スリットまたは多層膜ミラーによって平行化されているため，撮像準備として試料のアライメントが必要であった．単結晶試料のアライメントといえば，結晶試料に対する入射X線の入射角・方位角の調整（軸立て）であるが，それに加えてウェーハ全面のXRT画像を取得するには試料格子面の湾曲の影響を補償するため，上記X線入射角の調整（以下，湾曲補正と呼ぶ）をウェーハ上のX線照射位置に応じて行うことが必要である．前者においては$\omega$軸（X線の試料表面への入射角を調整）と$\phi$軸（入射X線に対する結晶の方位角を調整）の繰り返しスキャンを行い，通常1ウェーハあたり数分要する．後者はXRT画像の撮像前に試料上の様々な位置で$\omega$軸スキャンを行うため軸立て工程よりも時間がかかる．例えば150 mm径ウェーハの場合約20分の時間を要し，スループットを圧迫している．しかしながらこの工程は結晶成長，スライシング，試料自体の重量などに起因する格子面の湾曲を考慮に入れた撮像を行うために必要なものであった．

この度市場に投入した高速XRTシステムでは管球からのX線は多層膜ミラーや二重スリットを介さず，発散光として試料に照射される．そのため結晶方位が

*株式会社リガク　X線研究所

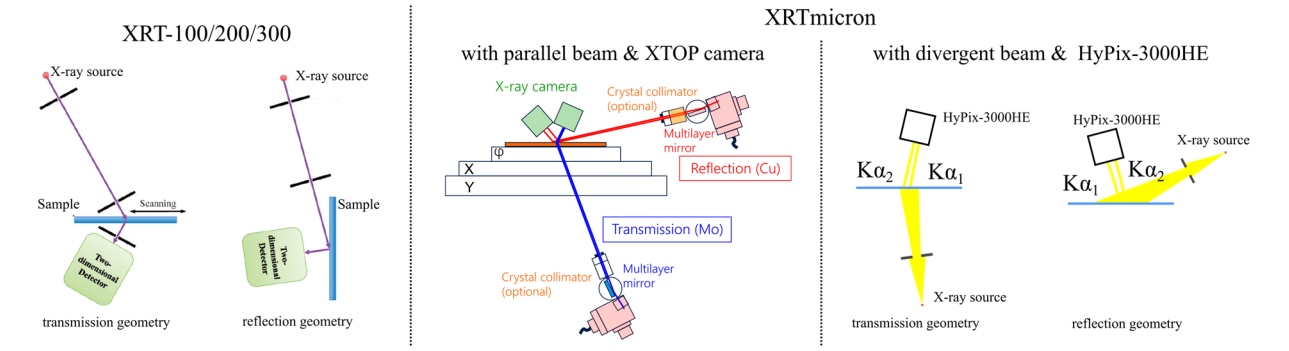


図1. リガクXRTシステムの概念図[1].

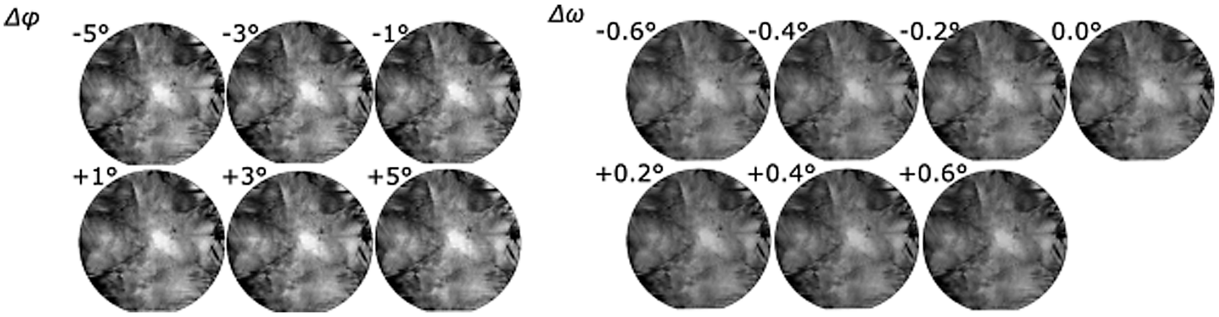


図2. 様々な$\phi$, $\omega$条件で取得した4H-SiC 150 mm径ウェーハの$11\bar{2}0$反射トポグラフ画像. Mo線源.

入射X線に対して多少ずれていても結晶からのX線回折が生じ，XRT画像を取得することができる．すなわち試料によっては軸立て工程や湾曲補正のための事前測定を大幅に短縮，あるいは省略することができるということである．例えば本解説の第三章にて紹介する応用例で挙げるような，150 mm径の4°オフ4H-SiCウェーハ1枚を$11\bar{2}0$反射で撮影した場合，理想の方向からオフカット角度，フラット／ノッチ角度に多少のバラツキが存在していてもアライメントなしでトポグラフ画像を取得することが可能であることを示す結果が得られた(図2)．自動搬送機とウェーハアライナーを使用すれば軸立てを行わずにXRT画像を一連のウェーハに対して取得することが可能であることが期待される．

一方，発散光入射ビームを絞らずに照射する場合，トポグラフ画像を作成しようとする特性X線と波長が近い別の特性X線が回折するため，いくつかの課題(例えば$K\alpha_1$線による回折信号からトポグラフ画像を構成したい場合に$K\alpha_2$線による回折が重畳してしまう問題)に対する解決策が必要になる．従来の実験システムでは，入射X線の平行化や検出器前のスリット設置等により不要な回折信号の取得を回避していた．しかし本高速XRTシステムではこれらを一切搭載しておらず，不要な回折信号が2次元検出器であるHyPix-3000HE検出器に入射することになる．不要な回折線を無視するために，本システムではトポグラフ画像を構築する前にスキャン中に撮影された全ての回折画像

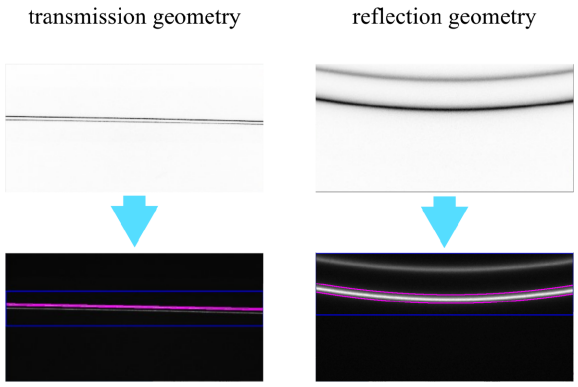


図3. 回折線像から着目する信号を抽出する「仮想スリット」(桃色線で囲まれた範囲).

から目的の信号だけを選択的に抽出するプロセス[3](図3)を設けている．この信号の抽出の方式は，検出器における「仮想スリット」機能[4]と考えることができる．この「仮想スリット」方式は，スリットの形状や大きさを柔軟に調整できるため，機械的なスリットと比較して強い優位性を持っている．例えば，反射配置かつX線入射角が小さい配置で撮影された回折信号は検出面上で湾曲しており，かつその曲率は測定配置によって変化する．「仮想スリット」機能を用いることで機械的なスリットより柔軟に曲がった回折パターン全体を抽出することができる．このように，透過から反射までの様々な測定配置で取得された回折パターン形状に対して「仮想スリット」機能を適用すること

で幅広い種類の試料や回折指数に対して撮像準備工程無しでトポグラフ画像取得を可能としている．

### 2.2. HyPix-3000HEの特性を幅広く活用した高速化

スループットの改善は撮像準備工程の省略に加え，スキャン速度自体の向上と試料全面のトポグラフ画像を得るために必要な試料の総移動距離を短縮することで達成した．この2つの要素は，リガクのハイブリッドピクセル検出器HyPix-3000HEを使用することで実現されている．ハイブリッドピクセル検出器を用いた撮像工程においてはウェーハの移動とデータの取り込みを繰り返すため，検出器の最大フレームレートはスキャン速度を制限する要素の一つである．HyPix-3000HEは最高で120 fpsでの撮像が可能であるため，本システムでは遅くとも600 mm/minのスキャン速度で回折信号を取得することができる．それに加えてHyPix-3000HEのデッドタイムなくデータを取得する機能[5]が各フレームでウェーハを停止させることなく回折線データを取得することを可能としている．また，HyPix-3000HEの検出面は従来からXRTmicronに搭載されているXTOPカメラと比べて広いため，試料全面のトポグラフ画像を得るに必要な試料の移動距離の短縮に寄与している．表1に示すように，HyPix-3000HEの幅は77.5 mmであり，XTOPカメラの4倍以上である．実際のシステムにおける試料上のプローブ幅は入射光学系の制約のためHyPix-3000HEの幅よりも小さくなるが，その欠点を差し引いても総移動距離を1/3程度に短縮することが可能であり，スループット向上に大きく寄与している．例えば，150 mm径ウェーハの全面スキャンに必要な試料の総移動距離は，XTOPカメラを用いたXRTシステムで約1700 mmであるのに対し，高速XRTシステムでは約500 mmで十分である．

本章で紹介したすべての機能を組み合わせることでトポグラフ画像の撮像速度を向上することができ，ウェーハの測定スループットを10–20枚/hourと速めることに成功した．表1は，リガクのXRTシステムの特徴をさまざまな角度から比較したものである．この表は，高速XRTシステムが，いかに従来よりもスループットで優位に立っているかを明確に示している．また，高速XRTシステムと従来の高分解能XRTシステムは，1台のシステム（XRTmicron）に統合することができ，そのシステムでは高速イメージングと高分解能イメージングの両方を行うことが可能である．

## 3. 応用例：4H-SiCウェーハの基底面転位（BPD）密度解析

昨今XRTの応用が注目を集めているトピックの一つは4H-SiCウェーハに存在するBPD密度の評価である．BPDはSiC結晶の基底面（(0001)面）に存在する完全転位であり，パワーデバイス動作時に積層欠陥生成の起源となり，その積層欠陥がデバイス劣化の原因となることが知られている[6]．そのため，BPDの低減・制御は，SiC業界の関心事の一つである．近年，Fraunhofer IISBのC. Kranertらは，$11\bar{2}0$反射のトポグラフ画像のコントラストからBPD量を評価する解析技術を開発した．彼らは4°オフ4H-SiCベアウェーハの$11\bar{2}0$反射のトポグラフ画像強度とKOHエッチングのピット数との間に相関関係があることを見いだし[7,8]，トポグラフ画像で表現されるウェーハ上各領域における回折強度とKOHエッチングで得られたBPD密度の間に検量線を作成する（図4）ことでトポグラフ画像からウェーハのBPD密度分布を導出することを可能とした．高速XRTシステムとこの解析技術を組合わせることにより，4°オフの150 mm径4H-SiCベアウェーハのBPD密度をウェーハの搬送時間を含めて5分以内に得ることができるようになることが高く期待される．

**表1.** リガクXRTシステムの特徴比較

| | XRT-100/200/300 | XRTmicron | |
|---|---|---|---|
| | | 多層膜ミラー&XTOPカメラ | HyPix-3000HE |
| 入射光学素子 | 二重スリット | 多層膜ミラー | スリット |
| 入射光学系 | 疑似平行光 | 疑似平行<br>（発散角　～0.5 mrad） | 発散光 |
| 検出器<br>（分解能） | IP（＞50 μm）<br>XTOP（5.4 μm） | XTOP（5.4 μm） | HyPix-3000HE（100 μm） |
| 検出器受光幅 | IP：＞100 mm<br>XTOP：18 mm | 18 mm | 77.5 mm |
| 利用回折線の抽出 | アライメント | アライメント | 回折像より抽出<br>「仮想スリット」 |
| データ取得 | IP：要現像<br>XTOP：デジタル画像 | デジタル画像 | デジタル画像 |

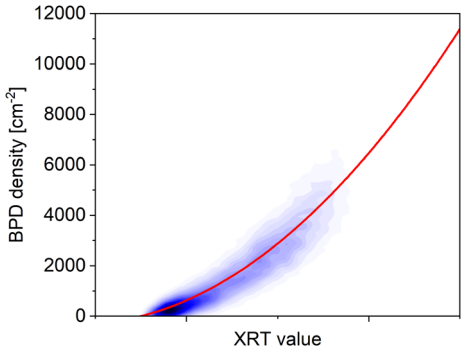


図4. 4°オフ(0001)4H-SiCウェーハのXRT画像の輝度値(横軸)と画像取得後KOHエッチングで評価したBPD密度(縦軸)との相関及び検量線.

従来の高分解能XRTシステムにおいて同等の画像を取得するために約60分要している点を踏まえると，本テクニカルノートで取り上げた高速XRTシステムはBPD密度の評価に大きな優位性を持っている．12ウェーハ/hourの検査速度はフォトルミネッセンスなどの他の非破壊転位定量化手法と同等のスループットを実現しており，4H-SiCウェーハの品管目的に利用できるような性能を持っているといえる．BPD密度分布評価も行うことが可能なSiC欠陥解析ソフトウェアはFraunhofer IISBにより開発中であり，リガクの制御ソフトウェアとの連携を予定している．

## 4. まとめ

本テクニカルノートでは，X線トポグラフ画像撮像のスループットを改善(10–20枚/hour)した技術的背景を解説し，そのSiCウェーハへの応用例を示した．発散ビームとハイブリッドピクセル検出器HyPix-3000HEの採用により高速な画像取得を実現し，回折信号から目的の信号を抽出する「仮想スリット」アプローチにより様々な試料・回折条件においてトポグラフ画像を撮る際の準備工程が不要となったことが時間短縮の鍵となった．Fraunhofer IISBが開発した4°オフ4H-SiCウェーハにおけるBPDの定量化は，トポグラフ画像撮像スループットの劇的な向上と合わせてXRTが4H-SiCウェーハの品質管理に利用できる道筋をつけたといえる．また，本テクニカルノートに記載されている高速XRTシステムは，リガクの従来の高分解能XRTシステムに同時に装備することができることにも着目されたい．1台でサンプルのスクリーニングと詳細な調査とを行うことができ，研究開発を志向するユーザーや個々の欠陥による影響を追う目的で使用するユーザーに於いてもメリットがあるシステムとなっている．本テクニカルノートでは，SiCウェーハへの応用例を示したが，それ以外にも，Si，サファイア，石英などの単結晶試料や薄膜の載った基板(例えばGaN on SiのSi基板)といった様々な材料系の欠陥評価に本システムが活用されることを期待している．

## 謝辞

図4に示したXRT画像の輝度値と画像取得後のKOHエッチングで評価したBPD密度との相関を示したグラフはFraunhofer IISB C. Kranert氏のご厚意で掲載いたしました．この場を借りて御礼申し上げます．

## 参考文献

(1) 表和彦：リガクジャーナル，**43**(2012), No. 2, 12–18.
(2) リガクジャーナル，**44**(2013), No. 2, 44–46.
(3) D. K. Bowen, M. Wormington, P. Feichtinger and D. E. Joyce: *AIP Conf. Proc.*, **683**(2003), 284.
(4) S. Kobayashi, T. Mitsunaga, K. Kajiyoshi and K. Arai: 日本特許　第5944369号，(2015).
(5) T. Sakumura, Y. Nakaye, M. Maeyama and K. Matsushita: 日本特許　第6182758号，(2017).
(6) A. Tanaka, H. Matsuhata, N. Kawabata, D. Mori, K. Inoue, M. Ryo, T. Fujimoto, T. Tawara, M. Miyazato, M. Miyajima, K. Fukuda, A. Ohtsuki, T. Kato, H. Tsuchida, Y. Yonezawa and T. Kimoto: *J. Appl. Phys.*, **119**(2016), 095711.
(7) C. Kranert, C. Reimann, R. Weingärtner, J. Friedrich, M. Fehrentz, E. Sörman and A. Ellison: "Non-destructive, Cost-efficient, and Fast Full Wafer Defect Quantification for SiC by X-ray Topography," presented at 13th European Conference on Silicon Carbide and Related Materials (ECSCRM 2021) We-P-64, (2021).
(8) C. Kranert, C. Reimann, Q. Cheng, B. Baghothamachar, M. Dudley, A. Soukhojak, V. Pushkarev and M. Gave: "Application of X-Ray Topography for Dislocation Analysis of 4H-SiC in an Industrial Environment," presented at 19th International Conference on Silicon Carbide and Related Materials (ICSCRM 2022) Ind-Poster.2, (2022).