

# X線マイクロビーム3Dトポグラフィによる 4H-SiCの転位解析

電力中央研究所 材料科学研究所 田 沼 良 平

## X線マイクロビーム3Dトポグラフィによる 4H-SiCの転位解析

2014/10/24

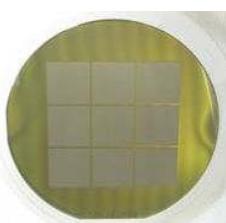
田沼 良平

一般財団法人電力中央研究所

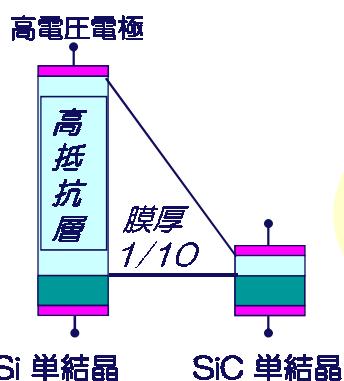
© CRIEPI



## SiCパワー半導体



SiC 単結晶 → 従来の Si 単結晶に比べて  
絶縁破壊電界強度, 高温動作性, 热伝導性  
などで数倍の性能を有する。



電気利用機器の高効率化

低損失な電力制御機器による  
系統安定制御, 再生可能  
エネルギー導入

© CRIEPI

## SiCバイポーラ素子(IGBTなど) における結晶欠陥制御

- 基底面転位(BPD)がオン抵抗増大の原因となる。
- BPDを無害なTEDに変換する技術が注目されている。
- 大部分(>90%)のBPDはTEDに変化するが一部は変化しない。

違いは何か?

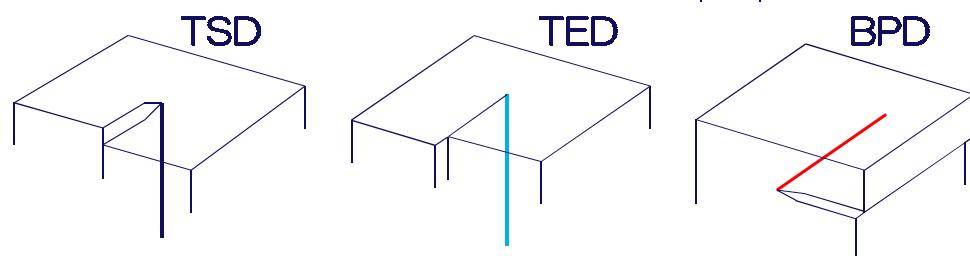
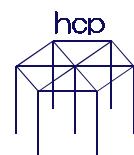
BPD-TED変換  $\longleftrightarrow$  エビ層へ伝播



## X線マイクロビーム3Dトポグラフィー

- 深さ方向に分解能を有する測定方法—半導体結晶に適用。
- 貫通らせん転位(TSD)への適用 [1]。
- 貫通刃状転位(TED)、基底面転位(BPD)への適用 [2, 3]。

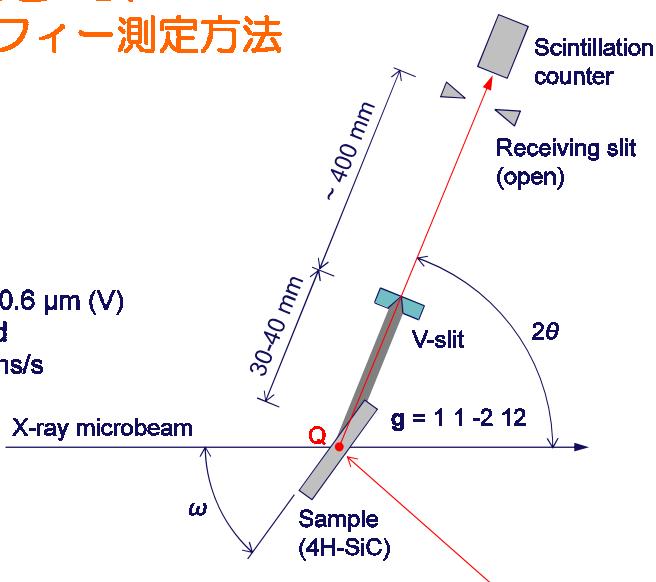
[1] Material Sci. Forum 615-617 (2009) 251.  
 [2] Appl. Phys. Express 5 (2012) 061301.  
 [3] J. Appl. Phys. 114 (2013) 023511.



## X線マイクロビーム 3Dトポグラフィー測定方法

BL24XU  
SPring-8

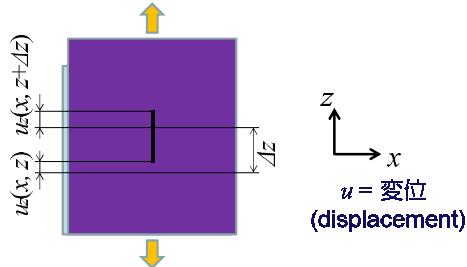
Energy = 15 keV  
Diameter = 1.9 (H) × 0.6 μm (V)  
Divergence = 25 μrad  
Flux =  $5 \times 10^6$  photons/s



■ 点Qにおけるピンポイント測定とサンプルスキャン  
により3Dトポを測定する。

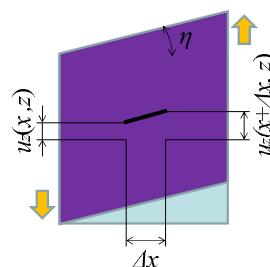
## 伸び変形とせん断変形

### 伸び変形



$$\frac{u_z(x, z + \Delta z) - u_z(x, z)}{\Delta z} \Rightarrow \frac{\partial u_z}{\partial z} = \frac{\Delta d}{d}$$

### せん断変形



$$\frac{u_z(x + \Delta x, z) - u_z(x, z)}{\Delta x} \Rightarrow \frac{\partial u_z}{\partial x} = \eta$$

### ロッキング角ピークシフト (effective misorientation)

$$\Delta\omega = -\eta - \frac{\Delta d}{d} \tan\theta = -\frac{\partial u_z}{\partial x} - \frac{\partial u_z}{\partial z} \tan\theta$$

## 転位周辺の変形テンソル

$$\mathbf{D}(x, y, z) = \begin{bmatrix} \frac{\partial u_x}{\partial x} & \frac{\partial u_x}{\partial y} & \frac{\partial u_x}{\partial z} \\ \frac{\partial u_y}{\partial x} & \frac{\partial u_y}{\partial y} & \frac{\partial u_y}{\partial z} \\ \frac{\partial u_z}{\partial x} & \frac{\partial u_z}{\partial y} & \frac{\partial u_z}{\partial z} \end{bmatrix}$$



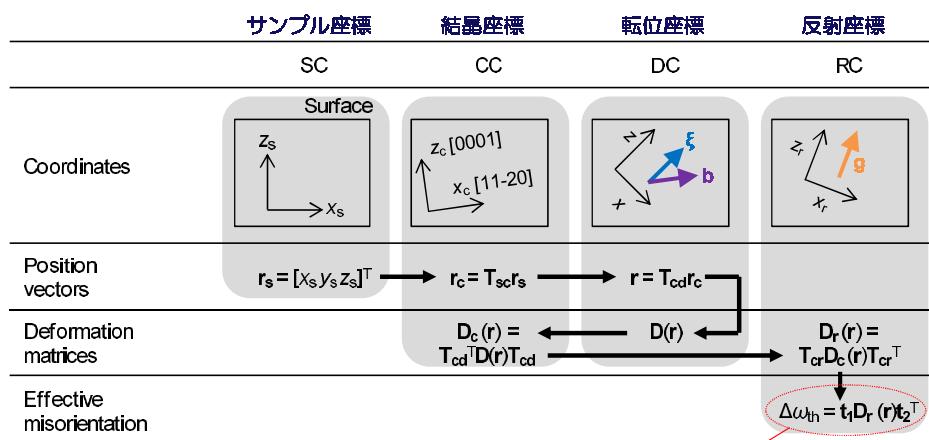
$\nu = \text{Poisson's ratio}$

© CRIEPI

CRIEPI  
Central Research Institute of Electric Power Industry

## シミュレーションフロー

SAGA-LS実験技術セミナー



$r_s, r_c, r$  = 位置ベクトル  
 $T_{sc}, T_{cd}, T_{cr}$  = 変換行列  
 $t_1 = [0 \ 0 \ 1], \ t_2 = [c_{HL} \ 0 \ -\tan\theta]$   
 $c_{HL}$  = 入射因子

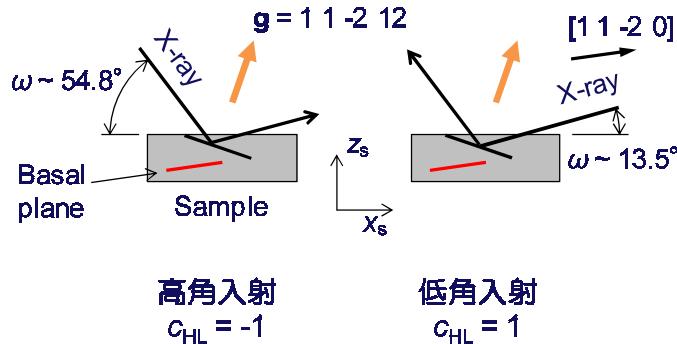
$$\begin{aligned} \Delta\omega_{lh} &= t_1 D_r(r) t_2^T \\ &= c_{HL} \frac{\partial u_{zx}}{\partial x_r} - \frac{\partial u_{zx}}{\partial z_r} \tan\theta = c_{HL}\eta - \frac{\Delta d}{d} \tan\theta, \end{aligned}$$

© CRIEPI

8

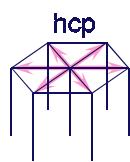
CRIEPI  
Central Research Institute of Electric Power Industry

## 高角入射と低角入射



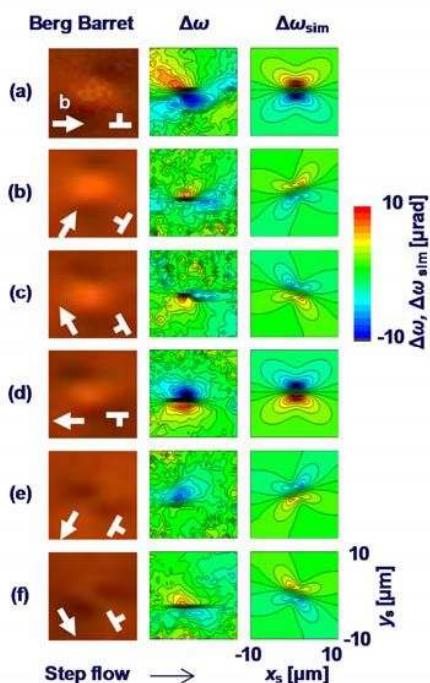
$$\begin{aligned}\Delta\omega_{th} &= \mathbf{t}_1 \mathbf{D}_r \mathbf{t}_2^T \\ &= c_{HL} \frac{\partial u_x}{\partial x_r} - \frac{\partial u_{zr}}{\partial z_r} \tan\theta = c_{HL} \eta - \frac{\Delta d}{d} \tan\theta,\end{aligned}$$

## TEDの歪みマップ (高角入射)

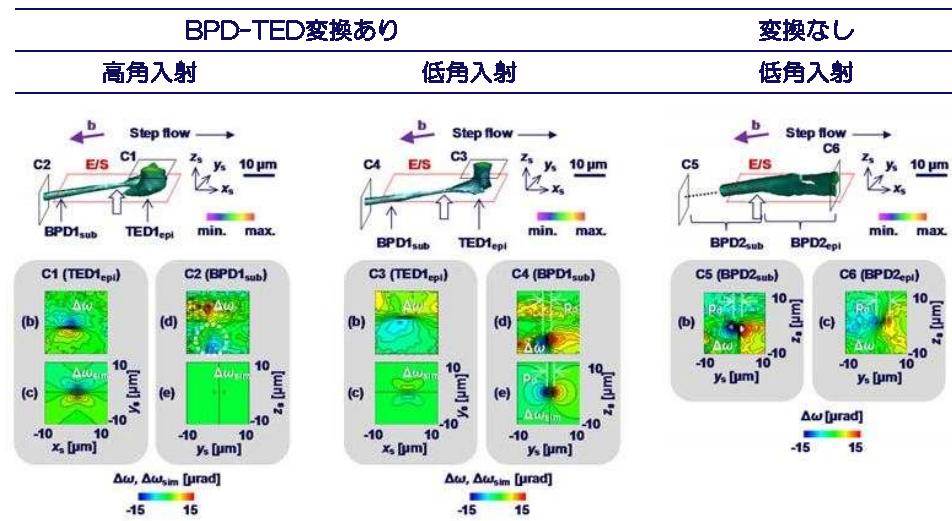


■ 6方向のバーガースペクトルを有するTEDの解析

J. Appl. Phys. 114 (2013) 023511



## BPD-TED変換部の解析



## まとめ

- X線3Dトポグラフィーは半導体結晶の3D結晶解析を目的としている。
- Vスリットの微細スリット効果、X線マイクロビームとの組み合わせ
- 変形テンソルの座標変換によるシミュレーション
- 4H-SiCのTEDおよびBPDの解析
- X線3Dトポグラフィー
  - X線回折を用いた新しい解析手法

## 謝辞

■毎回の実験においてX線マイクロビームの高度な調整を遂行して頂いている兵庫県立大学の津坂佳幸准教授に感謝致します。

■本研究の一部は、総合科学技術会議により制度設計された最先端研究開発支援プログラムにより、日本学術振興会を通して助成されたものです。

