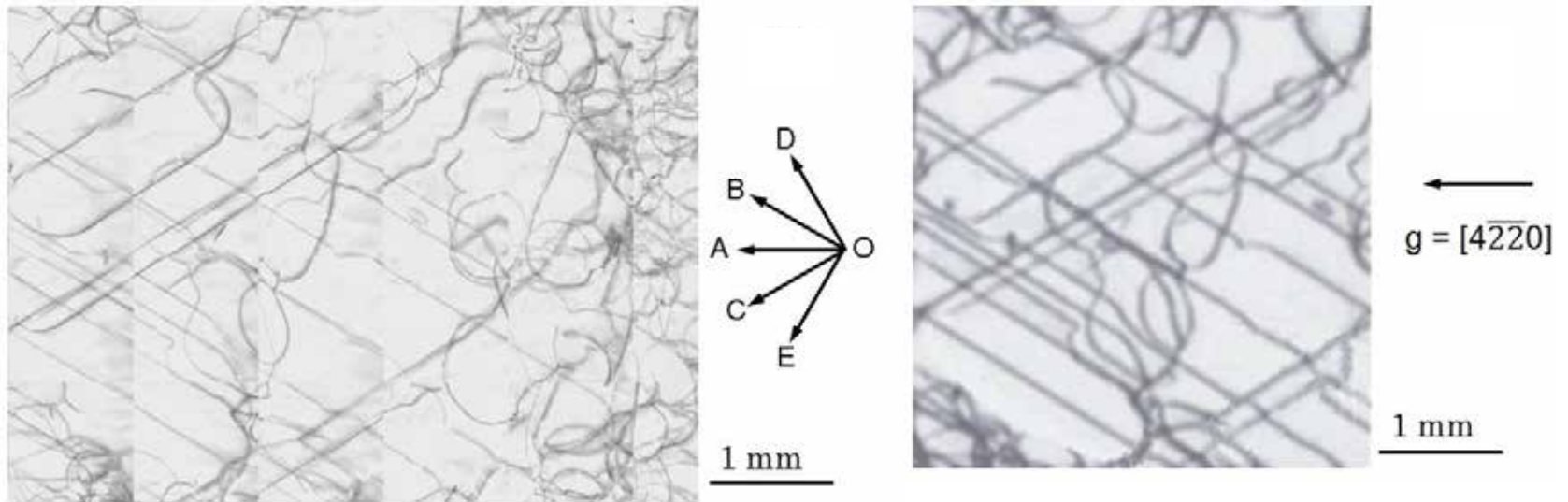


同時回折条件近傍での明視野トポグラフィ



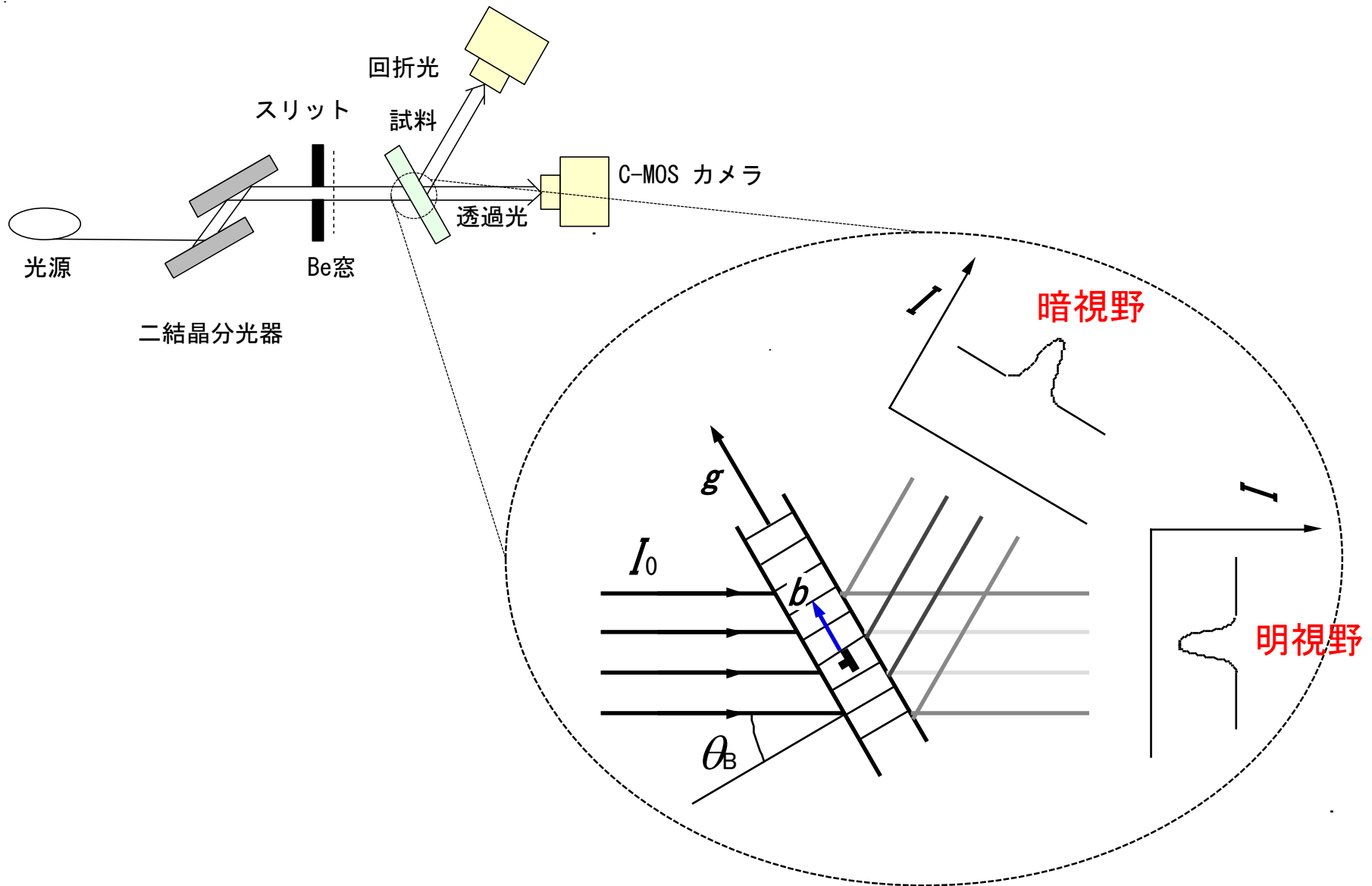
○津坂 佳幸¹, 鶴丸 哲也¹, 竹田 晋吾², 松井 純爾³

1. 兵庫県立大学大学院 物質理学研究科

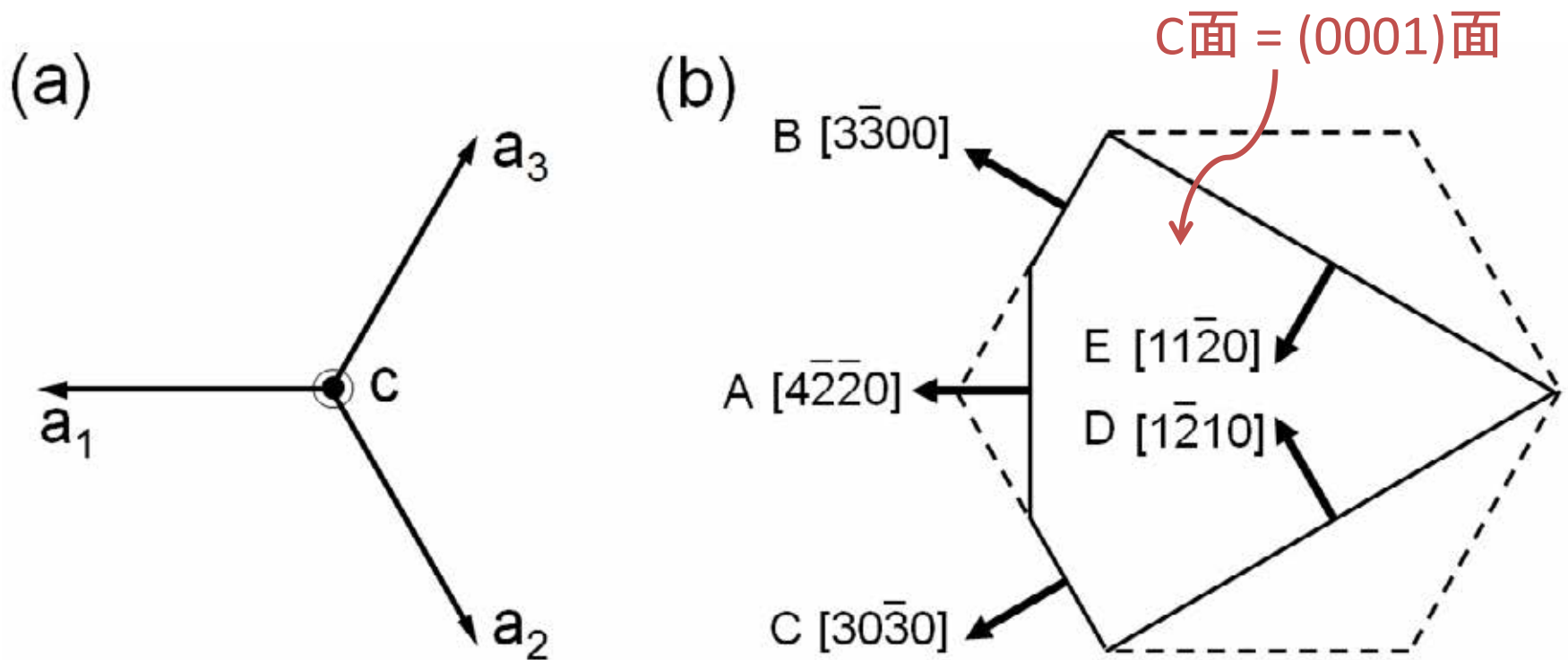
2. スプリングエイトサービス(株)

3. 兵庫県立大学 産学連携機構 放射光ナノテクセンター

回折光と透過光のトポグラフ($\mu t < 1 \sim 2$)

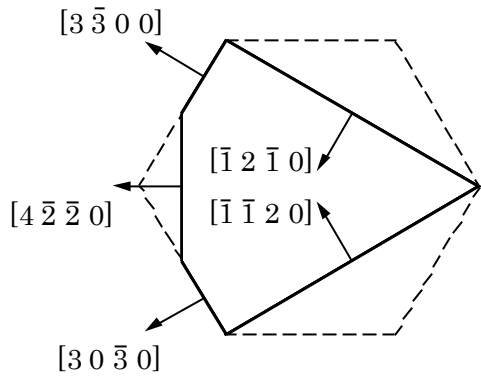


X線の多波回折-六方晶の場合



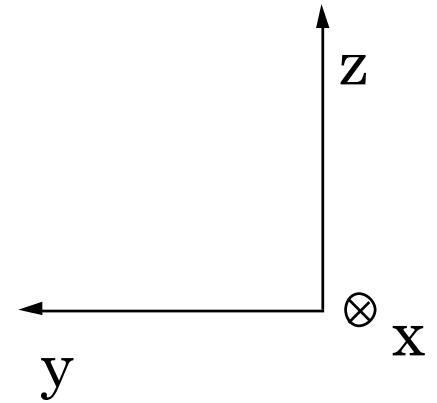
C面に垂直な $(2\bar{1}\bar{1}0)$ 面からの二次反射 $4\bar{2}\bar{2}0$ 反射(A)が起きるように設定すると, 格子面間隔の異なる $3\bar{3}00$ 反射(B), $30\bar{3}0$ 反射(C), $1\bar{2}10$ 反射(D), $11\bar{2}0$ 反射(E)も同時に起きる.

X線の多波回折-六方晶の場合

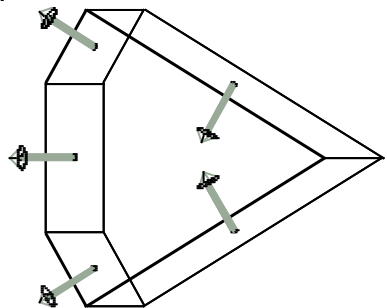


$$\mathbf{n}_{4\bar{2}\bar{2}0} : (0, 1, 0)$$

$$\mathbf{n}_{3\bar{3}00} : (0, \cos 30^\circ, \sin 30^\circ)$$



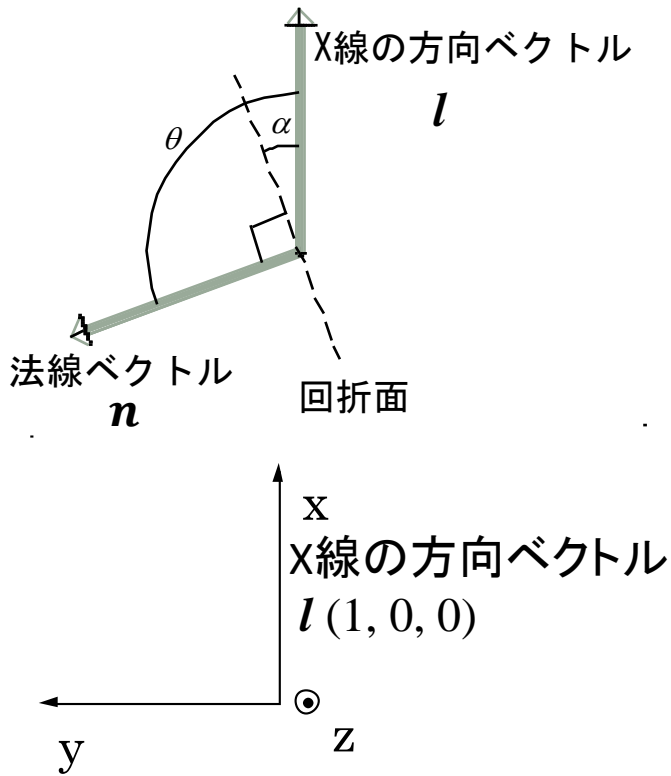
z軸まわりに $\theta_{4\bar{2}\bar{2}0}$ だけ回転



$$\mathbf{n}_{4\bar{2}\bar{2}0} : (-\sin \theta_{4\bar{2}\bar{2}0}, \cos \theta_{4\bar{2}\bar{2}0}, 0)$$

$$\mathbf{n}_{3\bar{3}00} : (-\sin \theta_{4\bar{2}\bar{2}0} \times \cos 30^\circ, \cos \theta_{4\bar{2}\bar{2}0} \times \cos 30^\circ, \sin 30^\circ)$$

X線の多波回折-六方晶の場合



一般に、方向ベクトル l と法線ベクトル n との内積(方向余弦)は、

$$l \cdot n = \cos \theta = -\sin \theta$$

X線方向ベクトルと $(4\bar{2}\bar{2}0)$ 面、 $(3\bar{3}00)$ 面の法線ベクトルとの内積は、

$$l \cdot n_{4\bar{2}\bar{2}0} = -\sin \theta_{4\bar{2}\bar{2}0}$$

$$l \cdot n_{3\bar{3}00} = -\sin \theta_{4\bar{2}\bar{2}0} \times \cos 30^\circ$$

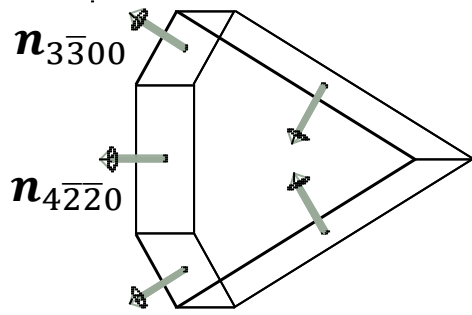
ブラッグの法則 $\sin \theta_{4\bar{2}\bar{2}0} = (\lambda/2d_{4\bar{2}\bar{2}0})$ を上式に代入すると、

$$l \cdot n_{3\bar{3}00} = -\left(\frac{\lambda}{2d_{4\bar{2}\bar{2}0}}\right) \times \left(\frac{\sqrt{3}}{2}\right)$$

六方晶では、 $d_{4\bar{2}\bar{2}0} = \left(\frac{\sqrt{3}}{2}\right)d_{3\bar{3}00}$ なので、

$$l \cdot n_{3\bar{3}00} = (\lambda/2d_{3\bar{3}00})$$

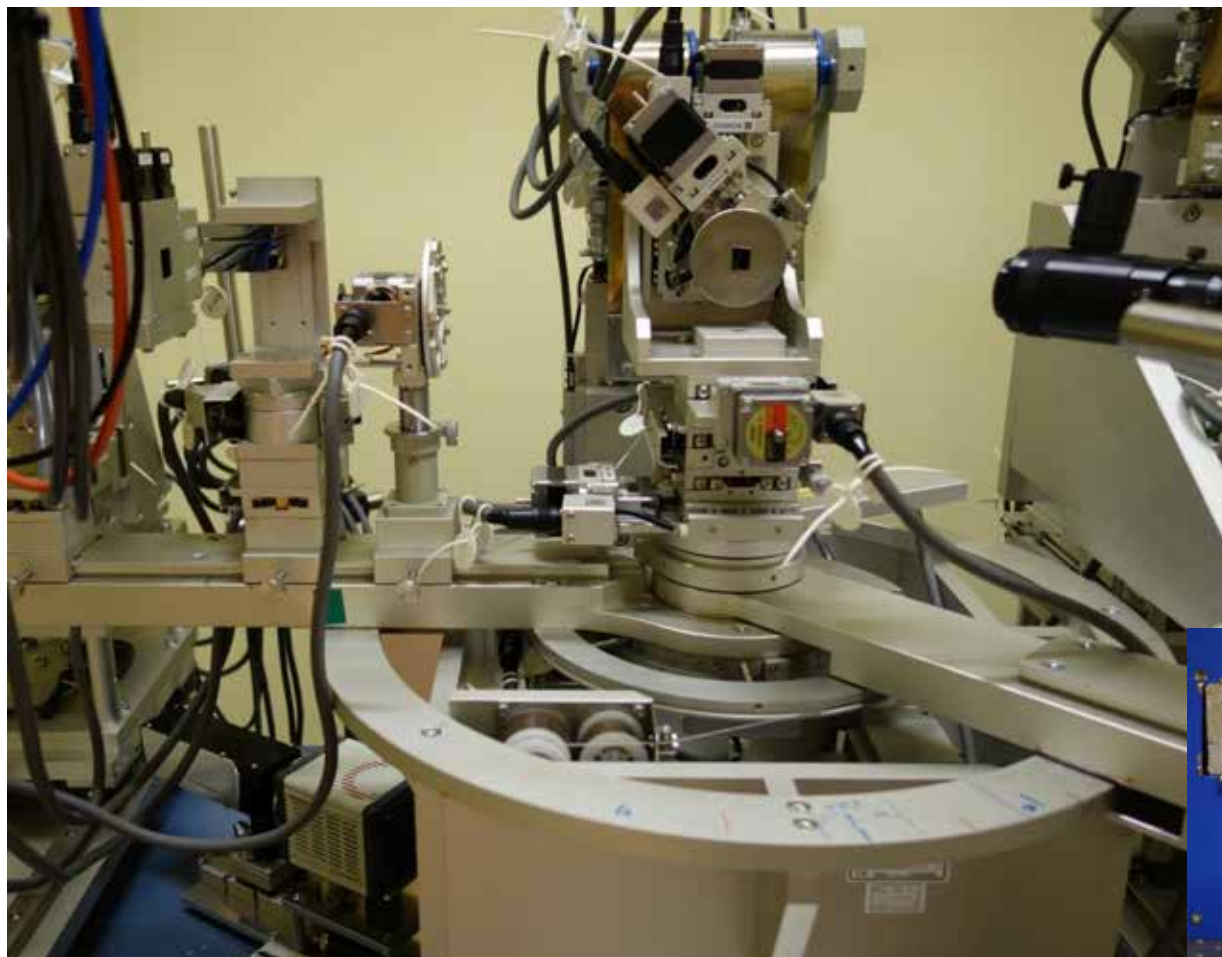
を得る。



$$n_{4\bar{2}\bar{2}0} : (-\sin \theta_{4\bar{2}\bar{2}0}, \cos \theta_{4\bar{2}\bar{2}0}, 0)$$

$$n_{3\bar{3}00} : (-\sin \theta_{4\bar{2}\bar{2}0} \times \cos 30^\circ, \cos \theta_{4\bar{2}\bar{2}0} \times \cos 30^\circ, \sin 30^\circ)$$

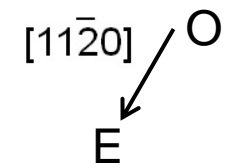
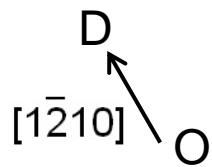
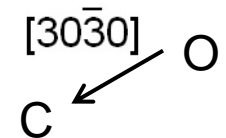
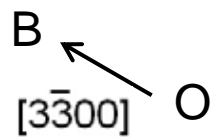
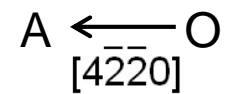
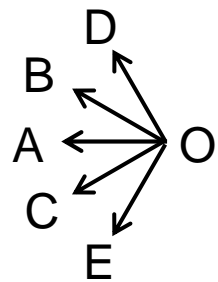
放射光による多波回折X線トポグラフィ実験



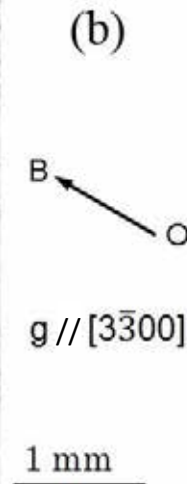
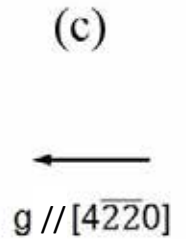
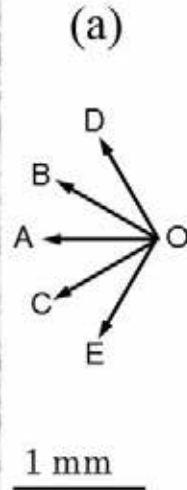
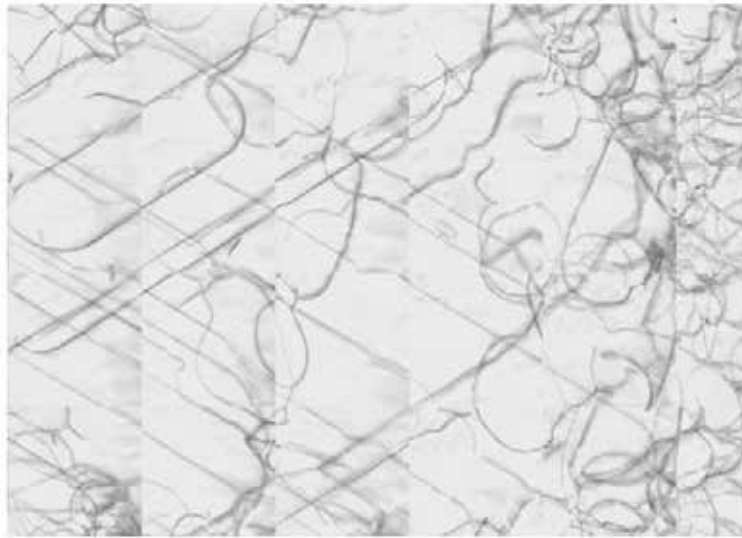
トポグラフィには、
「X線マイクロビーム
回折装置」
(局所歪み測定など)
を使用した。

トポグラフィの撮像に
使用したX線センサー
(Hamamatsu C11440-22CU)





サファイヤ結晶の多波回折X線トポグラフィ



通常のX線トポグラフィ(Lang法)

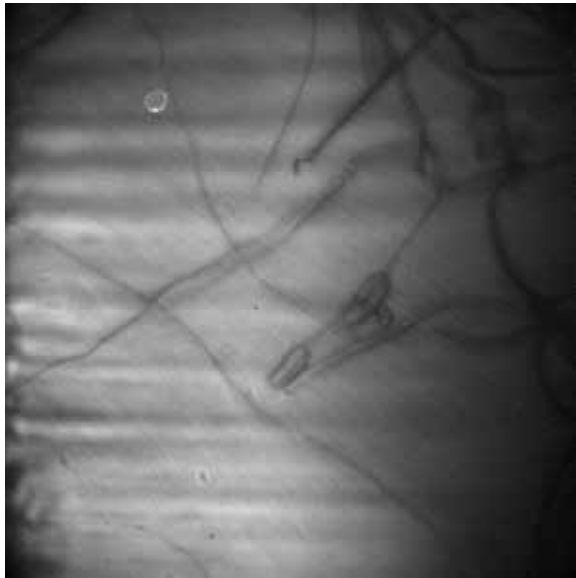
$[1\bar{1}00]$ 方向に走る
刃状転位 ($b // [11\bar{2}0]$)
が消えている。
透過波と云えども
 $g \cdot b = 0$ ルールが成立.

多波回折X線トポグラフのバックグラウンド処理

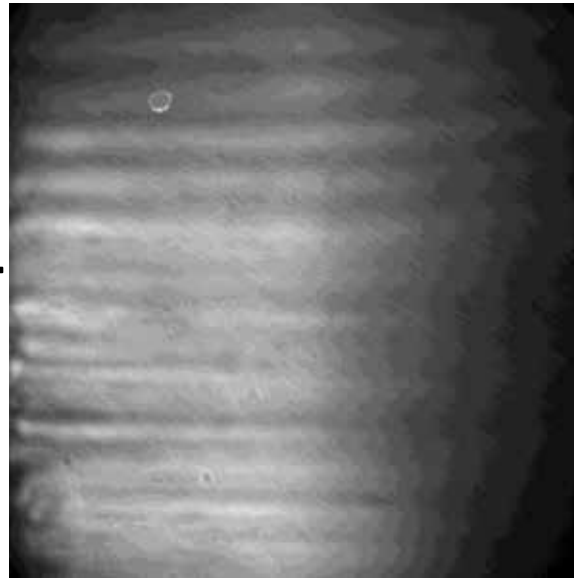
バックグラウンド処理無し(S)

バックグラウンド(T)

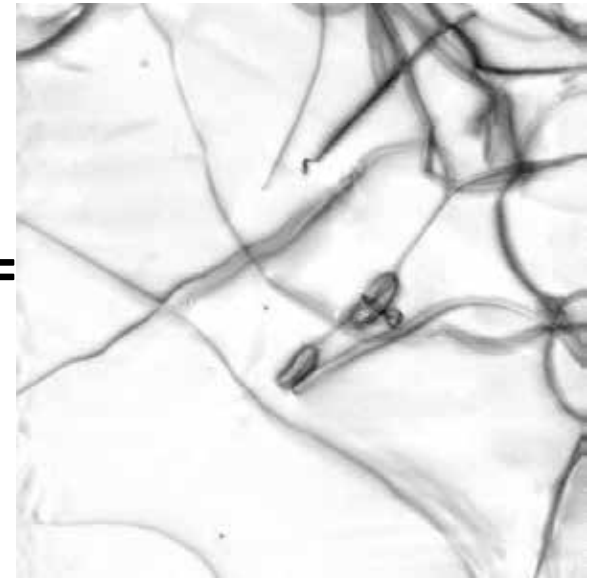
バックグラウンド処理有り(S/T)



÷



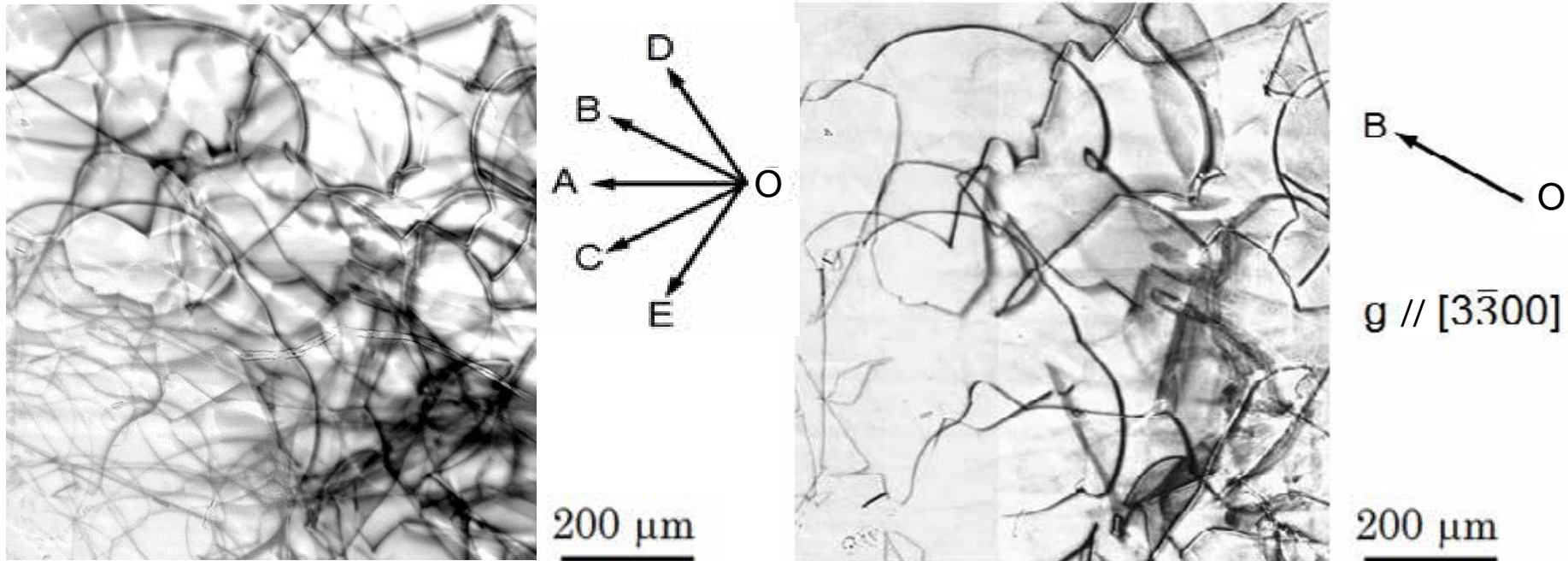
=



バックグラウンド(試料なし)には、Be窓材の不均一性、モノクロメータからの反射ムラなどに起因する強度分布があるので、各ショットの強度をバックグラウンドの強度分布で割算処理して、転位像のみのトポグラフを得る。

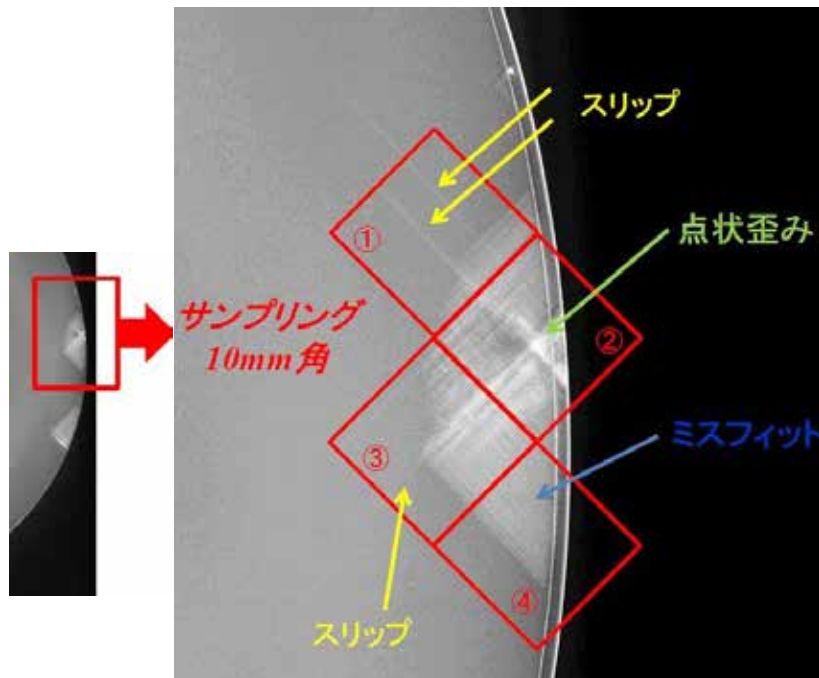
サファイヤ結晶の多波回折X線トポグラフィ

拡大図



各転位線のセグメントが明瞭に区別されているので、高転位密度 ($\sim 10^{4-5} \text{ cm}^{-2}$) 単結晶のX線トポグラフィが期待される。
また、各セグメントの情報から転位間の反応、挙動が議論可能。

シリコンepi. ウェーハの同時回折トポグラフ



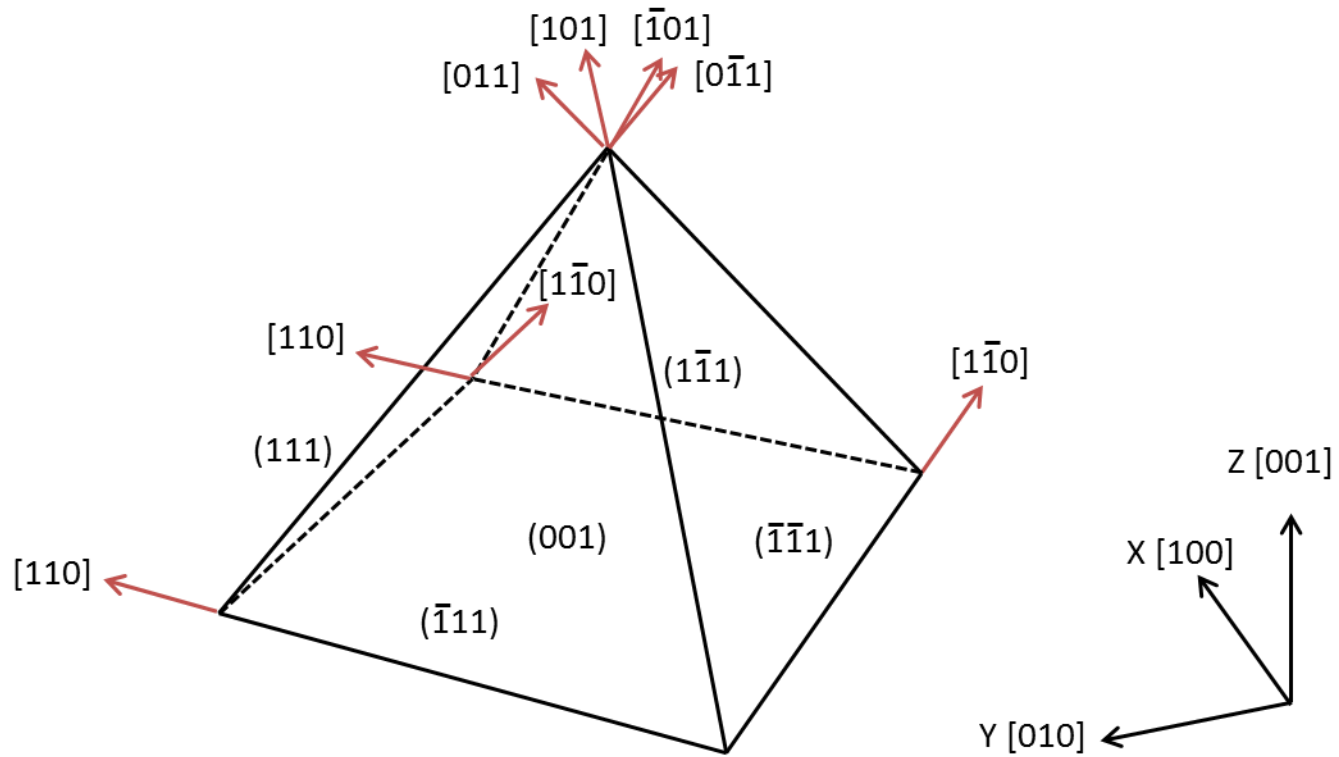
一般にシリコンのミスフィット転位
 $a/2\langle 110 \rangle$

$\langle 110 \rangle$ に直交する4つの等価な
{111}面からの回折を採用



$g \cdot b = 0$ で転位線の消失から、4つの{111}
面の比較で **バーガースベクトル**を決定

等価 {111} 面と <110> 方向

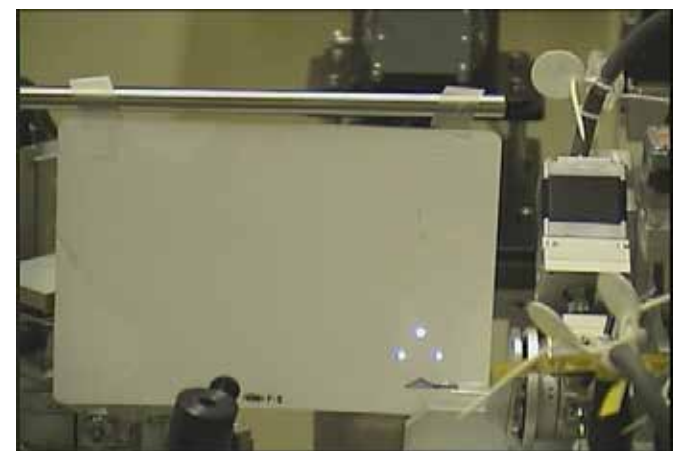
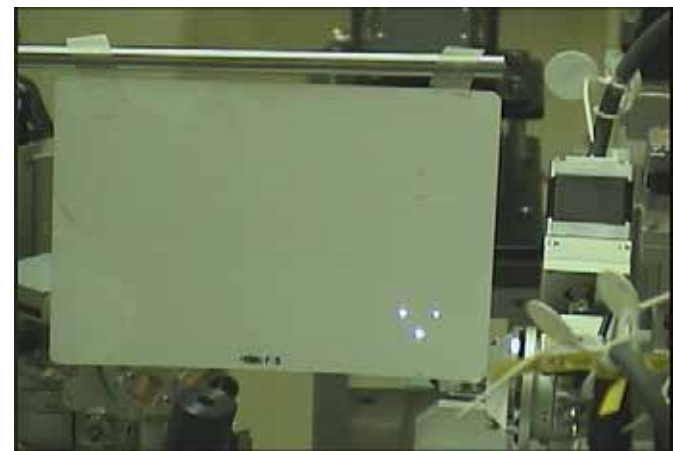
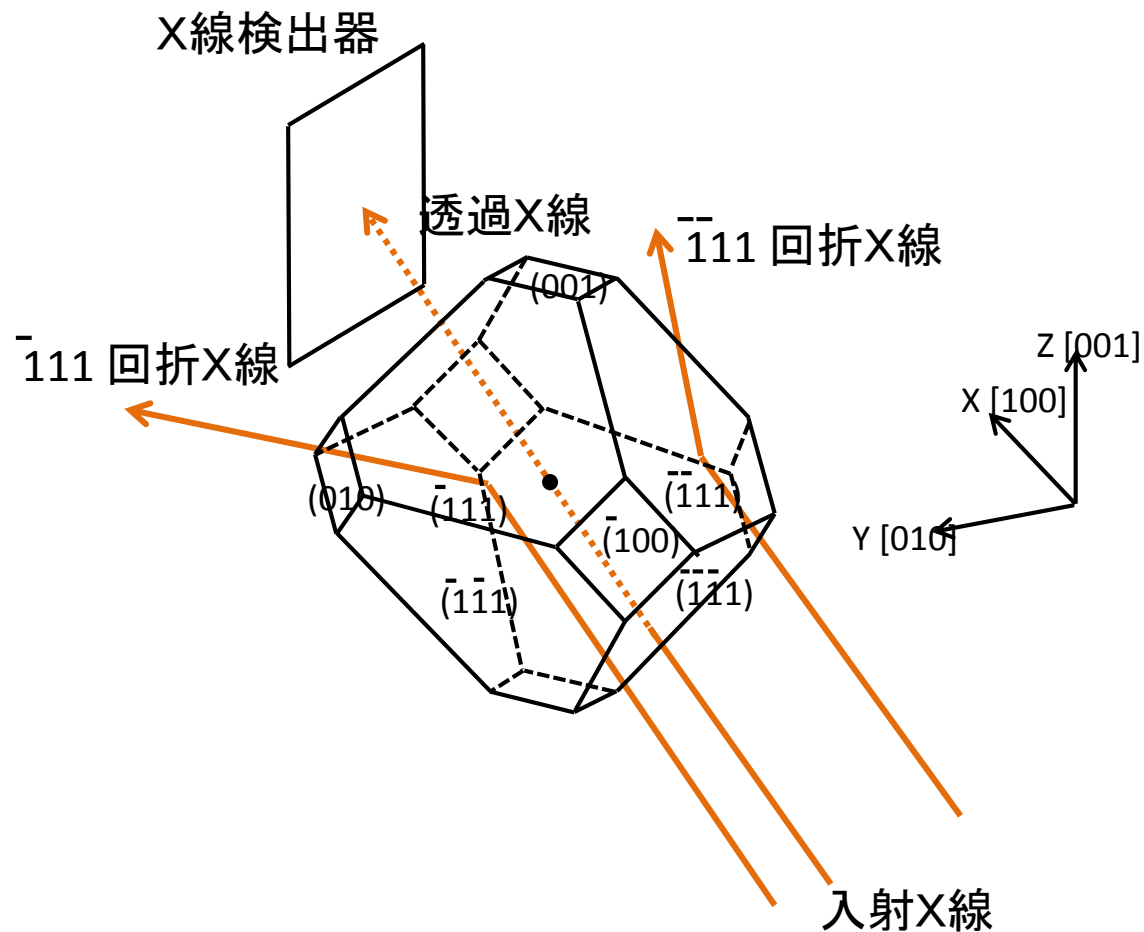


シリコン{111}面回折の $g \cdot b$

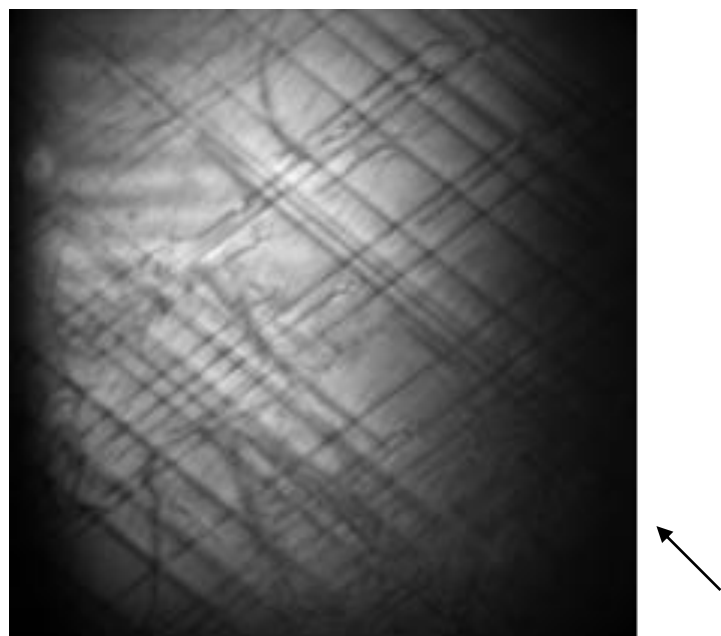
g ベクトル	$g \cdot b = 0$ となる b	$g \cdot b \neq 0$ となる b
[111]	$\frac{a}{2}[\bar{1}01], \frac{a}{2}[0\bar{1}1], \frac{a}{2}[1\bar{1}0]$	$\frac{a}{2}[101], \frac{a}{2}[011], \frac{a}{2}[110]$
$[\bar{1}11]$	$\frac{a}{2}[0\bar{1}1], \frac{a}{2}[101], \frac{a}{2}[110]$	$\frac{a}{2}[011], \frac{a}{2}[\bar{1}01], \frac{a}{2}[1\bar{1}0]$
$[\bar{1}\bar{1}1]$	$\frac{a}{2}[101], \frac{a}{2}[011], \frac{a}{2}[1\bar{1}0]$	$\frac{a}{2}[\bar{1}01], \frac{a}{2}[0\bar{1}1], \frac{a}{2}[110]$
$[1\bar{1}1]$	$\frac{a}{2}[011], \frac{a}{2}[\bar{1}01], \frac{a}{2}[110]$	$\frac{a}{2}[0\bar{1}1], \frac{a}{2}[101], \frac{a}{2}[1\bar{1}0]$

g ベクトル	双方で消失する転位線の b	双方で出現する転位線の b
[111] & $[\bar{1}11]$	$\frac{a}{2}[0\bar{1}1]$	$\frac{a}{2}[011]$
$[\bar{1}11]$ & $[\bar{1}\bar{1}1]$	$\frac{a}{2}[101]$	$\frac{a}{2}[\bar{1}01]$
$[\bar{1}\bar{1}1]$ & $[1\bar{1}1]$	$\frac{a}{2}[011]$	$\frac{a}{2}[0\bar{1}1]$
$[1\bar{1}1]$ & [111]	$\frac{a}{2}[\bar{1}01]$	$\frac{a}{2}[101]$
[111] & $[\bar{1}\bar{1}1]$	$\frac{a}{2}[1\bar{1}0]$	$\frac{a}{2}[110]$
$[\bar{1}11]$ & $[1\bar{1}1]$	$\frac{a}{2}[110]$	$\frac{a}{2}[1\bar{1}0]$

シリコンepi. ウェーハの{111}面の同時回折



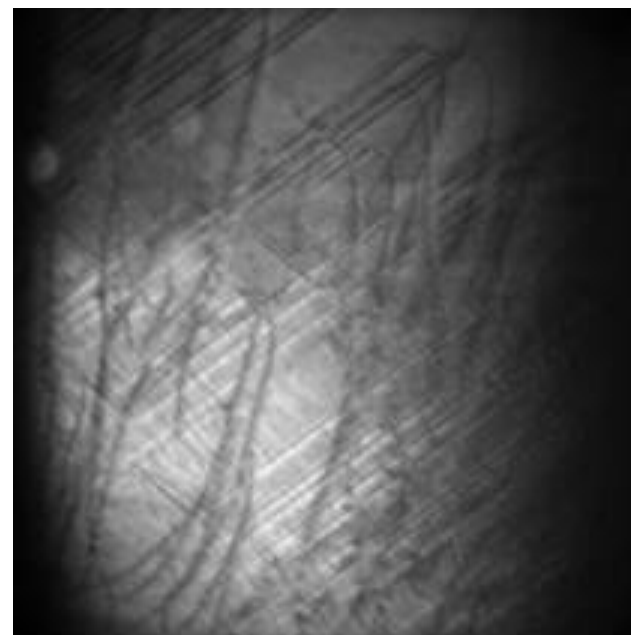
シリコン{111}面の同時回折トポグラフ



0.3 mm

$\overline{111}$

g



g

$\overline{111}$

シリコン{111}面の同時回折トポグラフ

反射	転位線 $\mathbf{b} = \frac{a}{2} [\bar{1}01]$	
	$\mathbf{n}_1 = [1\bar{1}0]$ $\mathbf{b} \times \mathbf{n}_1 // [111]$	$\mathbf{n}_2 = [110]$ $\mathbf{b} \times \mathbf{n}_2 // [1\bar{1}1]$
$\mathbf{g} = [111]$	$\mathbf{g} \cdot \mathbf{b} = 0$ $\frac{\mathbf{g} \cdot (\mathbf{b} \times \mathbf{n}_1)}{ \mathbf{g} \mathbf{b} } = \frac{\sqrt{3}}{2} = 0.87$	$\mathbf{g} \cdot \mathbf{b} = 0$ $\frac{\mathbf{g} \cdot (\mathbf{b} \times \mathbf{n}_2)}{ \mathbf{g} \mathbf{b} } = \frac{1}{2\sqrt{3}} = 0.29$
$\mathbf{g} = [1\bar{1}1]$	$\mathbf{g} \cdot \mathbf{b} = 0$ $\frac{\mathbf{g} \cdot (\mathbf{b} \times \mathbf{n}_1)}{ \mathbf{g} \mathbf{b} } = \frac{1}{2\sqrt{3}} = 0.29$	$\mathbf{g} \cdot \mathbf{b} = 0$ $\frac{\mathbf{g} \cdot (\mathbf{b} \times \mathbf{n}_2)}{ \mathbf{g} \mathbf{b} } = \frac{\sqrt{3}}{2} = 0.87$

まとめ

- 前方透過像を用いることで、回折の違いによる像の歪みや欠陥位置の移動は無い。
- 回折ベクトルの変更は、試料の面内回転や大きな角度のあおり調整を行う必要が無く、多波回折条件から特定回折ベクトルのみを残すように、その回折ベクトル周りで 0.1° 程度回転すれば良い。
- CMOSセンサーを用いることで、センサー感度の直線性により転位像の線幅が極めて細くなり、結果として、位置分解能の高いトポグラフが得られる。
- 放射光モノクロメータ等による強度ムラは、結晶像を外した透過像で補正することで影響を除外できる。
- シリコンの等価な{111}面の同時回折条件近傍でのトポグラフから、転位のバーガスベクトルの決定が容易。
- GaN結晶など、転位密度が比較的高く、従来トポグラフ法ではやや困難な場合でも、この方法により分解能の高いトポグラフが取得できる可能性がある(転位密度 $\sim 10^{4-5} \text{ cm}^{-2}$)。