

全反射臨界角近傍でのX線回折法による シリコン結晶中の微小格子歪の観察・評価

坂元 誠志¹⁾・福森 太一郎²⁾

Characterization of Minute Strain Field in Si Crystals by X-Ray Topography with a Glancing Angle Near the Critical Angle

Masayuki SAKAMOTO and Taichiro FUKUMORI

Abstract

As dynamic random access memories and imaging devices continue to be made smaller, the quality of the silicon surfaces on which they are made becomes more and more important. The surface damage introduced by mechanochemical polishing is reported as one of the causes that degrade a device performance. For this reason, powerful characterization techniques for surface damage are strongly required. As the one method, X-ray topography using extremely asymmetric diffraction under the simultaneous diffraction condition is effective for imaging a minute strain field near the surface.

In the present study, characterization of the minute strain field in silicon crystals with oxide film of 5nm and 25nm thick was performed using extremely asymmetrical X-ray diffraction of 311 reflection using the Berg-Barrett method and the double-crystal method. A series of X-ray topographs were taken around the Bragg peak and off-Bragg angles on both sides of incident angle. The reverse contrast was observed between topographs taken at strain field occurring at both sides of oxide film of 5nm thick and surface defect images arising from the mechanochemical polishing were clearly visualized.

Key Words:

X-rays, Silicon oxide film, Asymmetric reflection, Minute strain field, Topography

1. はじめに

X線回折法は単結晶の完全性の評価、あるいは格子欠陥の研究のための有力な手段として広く使われており、完全性の度合いや格子欠陥の種類などに応じて、いろいろな方法が用いられている。近年、特に半導体工業における結晶素子の高性能化に伴い、実験

方法も精度の向上が図られている。完全に近い単結晶による回折現象を調べるための実験的な手法としてX線トポグラフィーがある。これは試料からの回折線を原子核乾板などに記録し、試料と写真との間に1対1の幾何学的対応をつけ、回折線の強度および、方向の場所的变化を観察する方法である。

本研究ではBerg-Barrett法と二結晶法を用いて(311)面での極端に非対称な回折を利用して、Si(100)表面の反射トポグラフの撮影を行い、シリコン結晶中の微

1) 工学研究科物質工学専攻大学院生

2) 材料物理工学科助教

小格子歪の観察・評価を行った。その結果として、ロッキング・カーブのBragg-peak角とoff-Bragg角位置でのトポグラフ像の違いやシリコン表面に形成した酸化膜端に生ずる格子歪によるコントラストの逆転について、そのメカニズムを調べ、Berg-Barrett法と二結晶法の(+,-)配置, (+,+)配置で撮影したトポグラフ像を比較して、これらの配置に関する特性の違いを検討した。そして、酸化膜形成と溶解の方法を用いて、段階的にシリコン表面層を除去することにより、鏡面加工過程によって生じる格子歪の深さ分布を観察した。さらに、5nmという極めて薄い酸化膜端に生ずる応力による格子歪の検出を行った。

2. X線全反射法

2.1 全反射近傍でのX線の侵入深さと反射率

光の反射では、偏光面に関して σ 偏光と π 偏光とがあるが、本研究では σ 偏光(入射平面波の振動が境界面に平行)のみをとりあげる。X線領域の場合、屈折率は1より極くわずかに小さいので、X線が固体や液体の物質表面に臨界角 θ_c よりも小さな視射角で入射する時には全反射が起こる¹⁾。これは可視光の場合に物質内で全反射されるのと対照的である。

全反射条件の下でのX線のSiへの視射角に対する侵入深さと反射率のグラフを図1に示す。

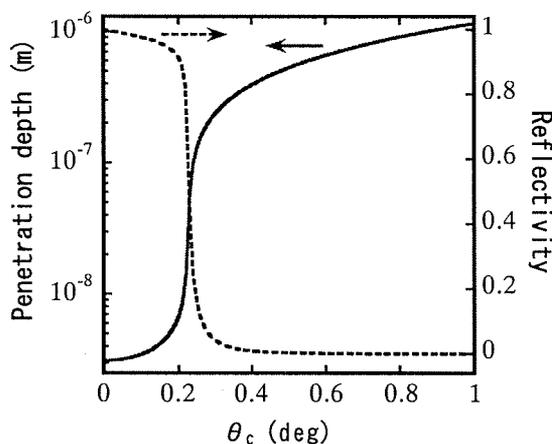


図1 視射角に対する侵入深さと反射率

図1ではSi表面に $\lambda_{\alpha_1}=0.1540562\text{nm}$ の CuK_{α_1} 線が入射する場合、吸収を考慮している。臨界角は

$\theta_c=3.932 \times 10^{-3}\text{rad}=0.225^\circ$ 、臨界角での侵入深さは28.912nmである。全反射条件の下ではX線は表面から内部に極くわずかしかり入り込まないことが分かり、臨界角近傍ではX線の侵入深さと反射率が急激に変化することが分かる。

2.2 X線トポグラフィ

単結晶中に含まれる格子欠陥や格子歪の場所的な分布や形は回折効果を利用して観察できる。この方法はX線回折顕微鏡あるいはX線トポグラフィと呼ばれる。このような効果は、電子顕微鏡で単結晶中の格子欠陥を観察する場合に用いられる回折コントラストと原理的には同じである²⁾。本研究ではBerg-Barrett法と二結晶法を用いているので以下に説明する。

2.2.1 Berg-Barrett法

本実験で用いたBerg-Barrett法の光学系及び実験条件は次のようになっている。

みかけ焦点 $0.4 \times 0.8\text{mm}^2$ からのX線(銅封入管)は、約30cmの間隔を置いた幅 $50\mu\text{m}$ の2つのスリットでコリメートされ試料表面に入射する。視射角が 0.15° の311反射では、試料表面の照射される幅は19mmになり表面の微小歪の観察には充分である。また、この条件では K_α 線の場合、Doubletの影響はなく、 K_{α_1} 線のみを用いることができ、 K_β 線による撮影にもそのまま用いられる。実際の撮影では、ロッキング・カーブ(半値幅 $90''$)の低角側、ピーク位置、高角側で撮影し、そのコントラストの変化より歪の状態を調べることができる。

2.2.2 二結晶法

極端な非対称反射によるBerg-Barrett法を用いて、X線の侵入深さを浅くしトポグラフ撮影を行うと、バックグラウンドを抑え表面近傍の情報を得ることができる。Monochromator結晶で角度幅と波長幅を狭めた二結晶法を用いれば更にバックグラウンドの少ない高精度の測定が可能である。

理想的に単色、平行な入射線に対する回折強度曲線の半値幅は角度にして数秒ぐらいであるが、入射線の発散をこの程度に抑えることはスリット系では実際上できないので試料の前に置かれた結晶による回折X線が入射線として用いられる。この場合、結晶の回折する配置により(+,-)配置と(+,+)配置とが

ある。前者は波長による分散が見かけ上なくなるので、試料に入射する X 線はほぼ厳密に単色と見なせる。また、第一結晶に Fankuchen Cut Monochromator を用いれば強い強度の X 線が得られるので、試料と Monochromator を同じ指数面にすると、角度広がり回折の角度幅の程度で、極めて平行となる。このため試料内部の微小で局所的な歪でコントラストの変化が生じ、厳密な回折条件付近のいくつかの角度位置でトポグラフを撮ることによって、コントラストの変化から歪の状態を知ることができる。本研究では非対称 $311(+,-)$ 平行配置と非対称 $311(+,+)$ 配置を用いた。これらの配置では、前者が角度に対して感度が良く、微小で局所的な格子歪を撮影するのに有効であり、後者は広い範囲の角度を利用でき、広い領域に分布する格子歪を撮影するのに有効であるという特徴を持っている。

3. 実験手順

今回用いた試料は、ボロン(B)ドーピング、P型の $\langle 100 \rangle$ 成長 MCZ-Si 単結晶から切り出された厚さ $750 \mu\text{m}$ の鏡面研磨したウェハである。

3.1 試料の選別

通常、特性 X 線の波長と回折面との組み合わせで全反射臨界角近傍での回折を行うことは難しい。極端な非対称回折によってこのことを実現する方法の一つとして、本研究では鏡面加工された(100)表面と(100)格子面間に一定の角度差があるように加工されているウェハの場合や、結晶表面と格子面が平行に近く切断されている場合でも一定の加工上の角度差が生じているウェハがあるので、 $\text{CuK}\alpha_1$ 線または $\text{CuK}\beta$ 線の使用により、(100)ウェハ中に存在する四つの $\{311\}$ 面の中から視射角が臨界角($=0.225^\circ$)にもっとも近いものを試料として選んだ。また、この時ウェハを $2.0 \times 2.0 \text{cm}$ に切断して、X 線回折法によって実験に適した角度を持つ結晶方位のウェハ片を試料として用いた。

3.2 試料の作製

a. トポグラフ撮影用の試料

この実験では図2に示すように、試料表面に熱酸化法を用いて、厚さ 25nm と 5nm の二種類の酸化膜を付けた試料を作り、Berg-Barrett 法と二結晶法によって、

試料表面のトポグラフ撮影を行った。

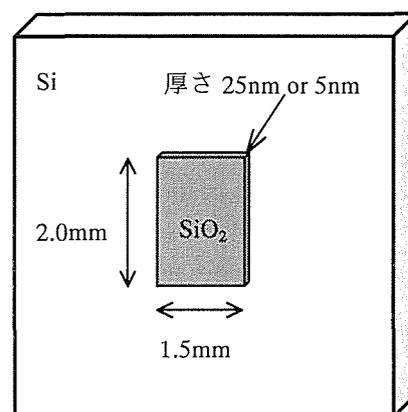


図 2

b. 歪の深さ分布を観察するための試料

この実験では図3に示すように、鏡面ウェハの表面から一定の深さにある面でトポグラフ撮影を行うために、酸化膜形成と溶解の方法を用いて表面から 180nm、400nm エッチング処理した面を用いた。このエッチングで新しく現れた表面は鏡面状態である。この段階的厚さの見積もりでは、ウェハ表面に厚さ X_0 の熱酸化膜を形成した時、シリコン表面は $0.45X_0$ を消費するとしている。エッチング液は鏡面状態の表面に及ぼす影響を少なくするために、約 1% の希釈フッ酸を用いて酸化膜を除去した。

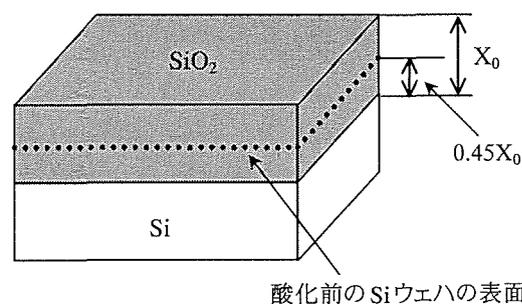


図 3

4. 結果と考察

4.1 Berg-Barrett 法によるトポグラフ撮影

図4(a),(b),(c)は図2の試料(厚さ 25nm の酸化膜がついた試料)を $\text{CuK}\alpha_1$ 線によって Berg-Barrett 法を用いて撮影したトポグラフである。図4(a),(b),(c)はそれぞれ

ロッキング・カーブの低角側(off-Bragg 角), ピーク位置(Bragg peak 角), 高角側(off-Bragg 角)で撮影したもので, 視射角は $0.1 \sim 0.15^\circ$ である。

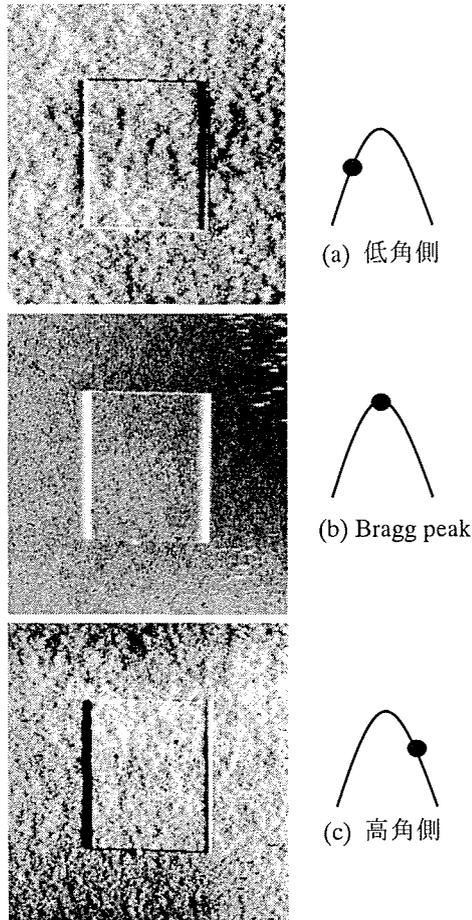


図4(×8)

図4 (a),(b),(c)において, 低角, 高角側で撮影したものは, 一見表面が凸凹しているように見えるが, 試料の表面は鏡面状態に加工されているので, これは表面の凸凹ではなく, 鏡面加工過程によって生じた, 試料表面から数 nm 付近にあるウェハの内部の浅い領域の格子歪と考える。この場合の視射角は $0.1 \sim 0.15^\circ$ なので, これらの格子歪像は, 表面から約 $4 \text{ nm} \sim 7 \text{ nm}$ 付近の格子歪を結晶格子の局所的な傾きや面間隔の変化に対して, 10^6 程度までの感度で撮影していることが考えられる。一方, ピーク位置で撮影したものは, 格子歪による像が見られず, 全体としてフラットに見える。このピーク位置で撮影したものと, 低角, 高角側で撮影したトポグラフ像の見え方の違いについて, 以下に説明する。

一般に, 格子の乱れた不完全な結晶から回折される X 線の積分反射強度は, 完全な結晶からのものよ

り大きいことが知られている。この現象はふつう消費効果の減少³⁻⁵⁾と呼ばれており, この機構で生ずるコントラストを消費コントラスト, これによってできる像を運動学的像と呼んでいる。歪んだ結晶の回折の角度範囲は, 不完全さの程度にもよるが, 完全結晶のものより数 10 倍～数 100 倍広く, 分の程度ある。したがって, 欠陥部分に入射する X 線束の角度広がり分の程度以上ある場合には, 欠陥部分から回折される X 線束もまたその程度発散しており, その積分反射強度は完全結晶部分から回折される X 線束のものより大きい。欠陥部分で回折された X 線束の一部は, その周囲の完全な結晶に対して回折条件を満たし, さらに回折されるが, 他の大部分は回折条件を満たさず, そのまま原子核乾板に達する。したがって, 欠陥は回折強度の増大した部分として観察される。これらのことより, 図 5 (a),(b)に示すように, 歪場からの運動学的な回折効果はピーク位置, 低角・高角側でも同じであるが, (a)のようにピーク位置で撮影した写真は, 完全結晶からの動力学的な回折効果が支配的で歪場からの運動学的な回折効果は打ち消されてしまい, 全体的にフラットに撮影される。逆に(b)のように低角, 高角側で撮影したものは, 完全結晶からの動力学的な回折効果が弱められ, 相対的に歪場からの運動学的な回折効果が支配的になり, 図 4 (a),(c)に見られるような格子歪による像が撮影されることになる。

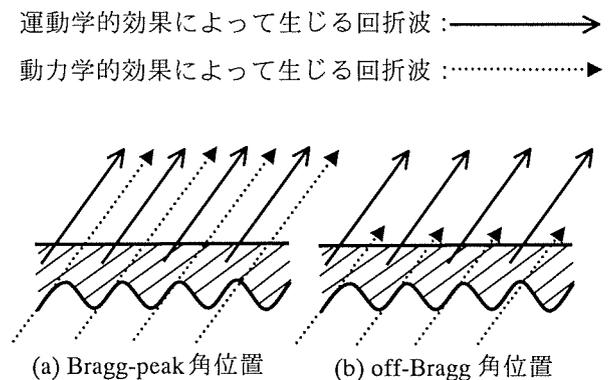


図5

波線の上の斜線部分は歪んだ結晶を示し, 波線の下部分は完全結晶を示している。

さらに、図 4 (b)のピーク位置で撮影した写真は、酸化膜の左右でどちらのエッジも白くぬけたコントラストとして観察され、図 4 (a),(c)の低角、高角側の写真では、酸化膜の左右のエッジで白と黒のコントラストの逆転が生じている。この左右でのコントラストのつき方について以下に説明する。

図 6 に示すように、ウェハ表面に熱酸化膜を形成したとき、熱処理の際のシリコン酸化膜とシリコンとの密度と分子量の差による膨張率の違いによって、酸化膜下ではシリコン酸化膜の圧縮応力(従ってシリコン表面では引っ張り応力)によって図のように酸化膜の左右のエッジに局所的な格子面の傾斜が引き起こされる⁶⁾。図 4 (b)のピーク位置で撮影した写真は、酸化膜の左右のエッジでどちらもバックグラウンド強度より弱いため、白く抜けたコントラストとなっており、シリコン酸化膜によって格子面の傾斜が引き起こされている部分で Bragg 条件を満たしていないということが考えられる。一方、図 4 (a),(c)の低角、高角側で撮影した写真は、ロッキング・カーブの off-Bragg 角位置で撮影するために行う試料の微小な回転によって、酸化膜の左右で片方が Bragg 条件を満たし、片方では Bragg 条件を満たさない状態となり、これらのことに起因してコントラストの強弱が生じるものだと考えられる。

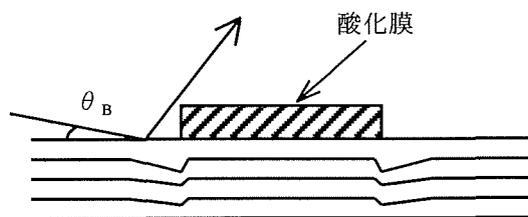


図 6

4.2 二結晶法によるトポグラフ撮影

4.2.1 非対称 311(+,-)平行配置によるトポグラフ撮影

図 7 (a),(b)は、図 2 の試料(厚さ 25nm の酸化膜がついた試料)を $\text{CuK}\alpha_1$ 線によって二結晶法の非対称 311(+,-)平行配置で撮影したトポグラフである。(a),(b)はそれぞれロッキング・カーブのピーク位置(Bragg peak 角)、高角側(off-Bragg 角)で撮影したもので、視射角は $0.15\sim 0.20^\circ$ である。

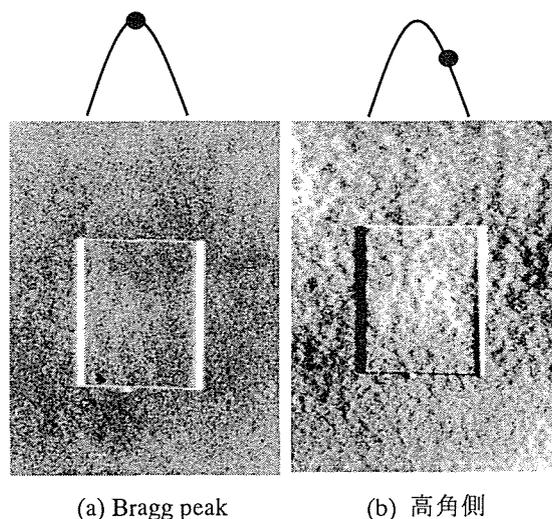


図 7(×8)

二結晶法の非対称 311(+,-)平行配置で撮影した図 7 (a),(b)においても、Berg-Barrett 法で撮影したものと同様に、ロッキング・カーブのピーク位置で撮影したものは、格子歪による像のコントラストが弱く、高角側で撮影したものは、格子歪による像のコントラストが強く現れており、また、酸化膜端の左右で白と黒のコントラストの逆転も生じていることが分かる。

4.2.2 Berg-Barrett 法と二結晶法(+,-)配置におけるトポグラフ像の比較

図 8 (a),(b)は、それぞれ Berg-Barrett 法の図 4 (c)と二結晶法の図 7 (b)と同一の写真であり、どちらもロッキング・カーブの高角側で撮影したものを示している。

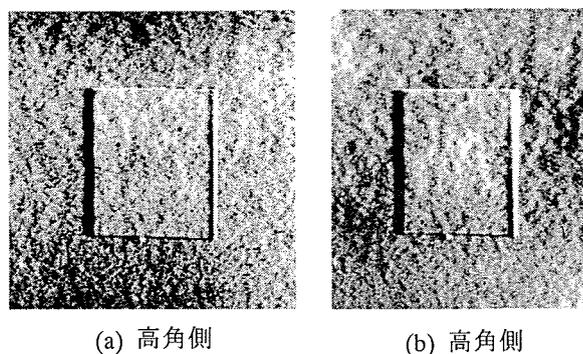


図 8(×8)

二つの写真を比較してみると、(b)は(a)の写真と比べて若干ぼやけて写っているように見える。これは結晶格子の局所的な傾きや面間隔の変化に対して、Berg-Barrett 法では 10^{-6} 程度までの感度で撮影できるが、二結晶法では Fankuchen Cut Monochromator を用

いるため、X線の平行性が非常に高められ、 $10^{-7} \sim 10^{-8}$ 程度までの感度で、微弱な格子歪まで撮影されているためだと考えられる。そのため(b)の二結晶法で撮影した写真は、歪勾配の強い所から弱い所までの格子歪を一緒に撮影しており、回折線が重なった状態で撮影されていることが考えられる。このことから二結晶法での(+,-)平行配置は角度に対して高感度であり、微弱で局所的な格子歪を検出するのに有効である。

4.2.3 非対称 311(+,+)配置によるトポグラフ撮影

図9 (a),(b)は図2の試料(厚さ25nmの酸化膜がついた試料)を $\text{CuK}_{\alpha 1}$ 線によって二結晶法の非対称 311(+,+)配置で撮影したトポグラフである。(a),(b)はそれぞれロッキング・カーブの低角側(off-Bragg角)、高角側(off-Bragg角)で撮影したもので、視射角は $0.15 \sim 0.20^\circ$ である。

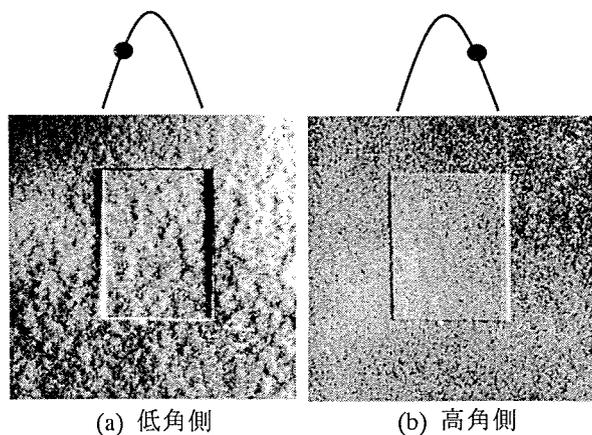


図9(×8)

このトポグラフにおいても、Berg-Barrett法で撮影したものと同様に、ロッキング・カーブの低角側、高角側で撮影したものには、格子歪による像が観察でき、また、酸化膜の左右での白と黒のコントラストの逆転も生じていることが分かる。ここで(a)と(b)の写真において、図4のBerg-Barrett法で撮影したトポグラフ像は、低角側と高角側で酸化膜の左右でのコントラストの逆転を除いて、ほぼ同じような格子歪によるトポグラフ像が得られたが、この(+,+)配置での撮影では、明らかに像の写り方が異なっている。(a)の低角側の位置で撮影した写真は、格子歪による像が観察できるが、(b)の高角側の位置で撮影した写真は、図4(b)や図7(a)で示したように、像の写り方がロッキン

グ・カーブの Bragg peak 角の位置で撮影した像と類似している。これは X 線を試料に照射する際に、X 線の試料に対する回折角が高角側(off-Bragg 角)の位置から Bragg peak 角の位置へずれたものと考えられる。

4.2.4 二結晶法(+,-)配置と(+,+)配置におけるトポグラフ像の比較

図10 (a),(b)は、それぞれ図7 (b)と図9 (b)と同一の写真であり、どちらもロッキング・カーブの高角側で撮影したものである。回折ベクトルは(a)で左向き、(b)で右向きである。

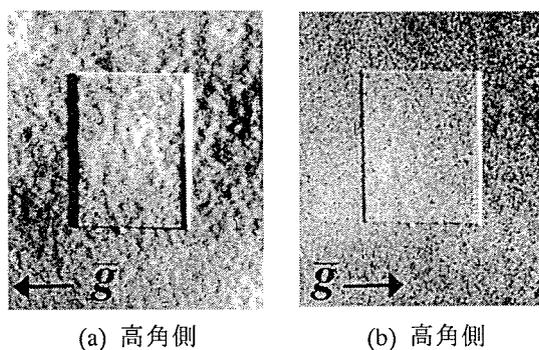


図10(×8)

二つの写真を比較してみると、(a)は4.2.2で説明したように、角度に対して高感度であり、微弱で局所的な格子歪を検出するのに有効である。一方、二結晶法の(+,+)配置で撮影した(b)は、写真の右下に研磨砥粒による傷が見られるが、(+,-)平行配置で撮影した(a)の写真には見られない。このことから、(+,+)配置は角度に対する感度は(+,-)平行配置に比べて悪いが、広い範囲の格子歪を検出でき、広い領域に分布する格子歪を検出するのに有効である。

4.3 二結晶法による厚さ5nmの酸化膜のついた試料のトポグラフ撮影

図11 (a),(b),(c)は図2の試料(厚さ5nmの酸化膜がついた試料)を $\text{CuK}_{\alpha 1}$ 線によって二結晶法の非対称 311(+,-)平行配置で撮影したトポグラフである。(a),(b),(c)はそれぞれロッキング・カーブの低角側(off-Bragg角)、ピーク位置(Bragg peak角)、高角側(off-Bragg角)で撮影したもので、視射角は $0.15 \sim 0.20^\circ$ である。

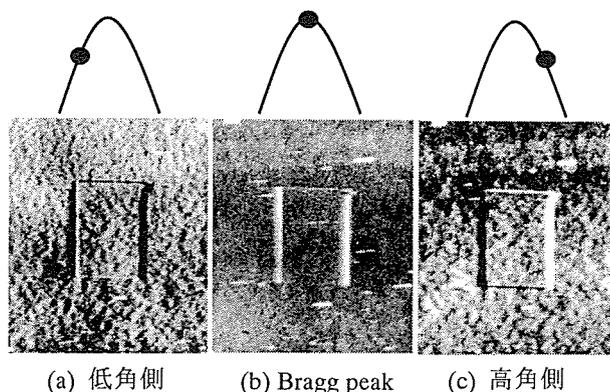


図 11 (×8)

現在の半導体デバイス製造過程において、MOS トランジスタのゲート酸化膜厚は数 nm 程度で今後さらに薄くなる傾向にある。本研究では実用的な応用のために、試料表面に約 5nm のシリコン酸化膜を作り、 $\text{CuK}_{\alpha 1}$ 線によって二結晶法の非対称 311 (+, -) 平行配置を用いてトポグラフの撮影を行った。

図 11 においても、Berg-Barrett 法で撮影したものと同様に、ロッキング・カーブのピーク位置で撮影したのものには、格子歪による像が観察されないが、低角、高角側で撮影したのものには、格子歪による像が観察でき、また、酸化膜の左右のエッジでの白と黒のコントラストの逆転も生じていることが分かる。今までに行われている酸化膜による格子歪の撮影では、透過トポグラフ法で酸化膜厚が数 100nm 程度⁹⁾であり、反射法を用いてこの程度の厚さの酸化膜による格子歪を撮影した例はないのではないと思われる。よって、角度に対して高感度であり微弱で局所的な格子歪を検出するのに有効な二結晶法での (+, -) 平行配置を用いれば、さらに薄い酸化膜による格子歪の検出が可能になるとと思われる。

4.4 鏡面ウェハの表面から一定の深さにある面でのトポグラフ撮影

図 12 (a),(b),(c)は図 3 の試料を $\text{CuK}_{\alpha 1}$ 線によって Berg-Barrett 法を用いてトポグラフ撮影したものである。表面からの段階的エッチングによって、(a)が未処理の鏡面状態にある表面、(b)が表面から 180nm エッチングした鏡面、(c)が表面から 400nm エッチングした鏡面をそれぞれロッキング・カーブの高角側 (off-Bragg 角) でトポグラフ撮影を行ったもので、視射角 $0.1 \sim 0.15^\circ$ である。

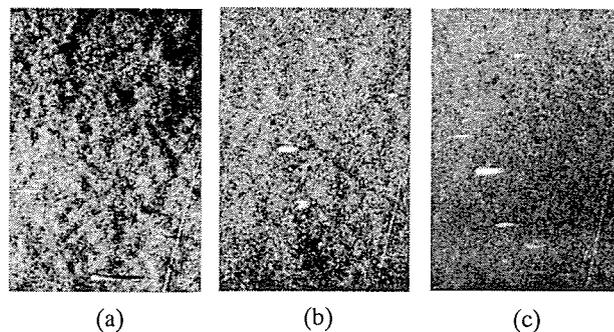


図 12 (×7)

図 12 の 3 つの写真は同じ試料の同一視野をトポグラフ撮影したものである。これらの写真の右下に斜めに走っている同じ研磨傷がそのことを示している。(a)の写真は未処理の鏡面状態にある表面のトポグラフ像であり、鏡面加工過程によって生じた試料表面から数 nm 付近にあるウェハの内部の浅い領域の格子歪を撮影したものである。(b)の写真は表面から 180nm エッチングした鏡面のトポグラフ像であり、(a)に比べて格子歪による像が減少していることが観察でき、また、(a)では写真の下に鏡面研磨による研磨傷が見られるが、(b),(c)の写真ではしだいに弱いコントラストに変化していることも観察できる。さらに、写真中央付近にある白い空洞のようなものが新たに出現していることも観察できる。(c)の写真は表面から 400nm エッチングした鏡面のトポグラフ像であり、この付近で鏡面加工過程によって生じる格子歪はほとんど消失していることが分かる。また、(b)で出現した写真中央の空洞のようなものが大きくなっていることも観察される。このような空洞の出現は今のところ明確ではないが、一定方向を向いているところから、鏡面研磨の影響で強い応力が局所的に加わり、1%フッ酸処理の際にエッチングされたのではないかと考えている。

4.5 CuK_{β} 線による Berg-Barrett 法を用いたトポグラフ撮影

図 13 は図 2 の試料 (厚さ 25nm の酸化膜がついた試料) を CuK_{β} 線によって Berg-Barrett 法を用いてトポグラフ撮影したものである。(a),(b),(c)はそれぞれロッキング・カーブの低角側 (off-Bragg 角)、ピーク位置 (Bragg peak 角)、高角側 (off-Bragg 角) で撮影したもので、視射角は 0.2° である。

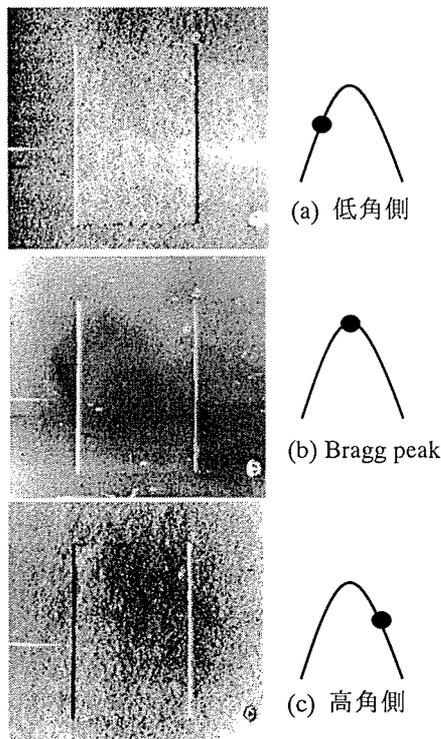


図 13 (×9)

図 4,7,9 で示した写真は、(100)原子面と(100)結晶表面との角度差が 2.5° 程度ある試料なので、同時回折の条件から $\text{CuK}_{\alpha 1}$ 線によってトポグラフ撮影を行うことができるが、(100)原子面と(100)結晶表面とがほぼ平行に加工されている試料(角度差が $\pm 0.5^\circ$ 以内)では CuK_{β} 線を用いることでトポグラフ撮影を行うことができる。

トポグラフ像としては、 $\text{CuK}_{\alpha 1}$ 線で撮影したものと同様に、格子歪による像や酸化膜の左右のエッジでのコントラストの逆転も観察できる。 CuK_{β} 線を用いることで、原子核乾板の露光時間については、 $\text{CuK}_{\alpha 1}$ 線に比べると約5倍程度長くなるが、原子面と結晶表面とがほぼ平行に加工されている試料においては CuK_{β} 線を用いたトポグラフ撮影が有効であることを示している。

6. まとめ

通常の封入管からの特性 X 線の波長と回折面との組み合わせでは、回折と全反射の同時回折を満たすものはないが、鏡面加工された(100)表面と(100)格子面との間にある一定の加工上の角度差を利用することで、X 線のシリコンへの侵入深さを数 nm から数 10nm に制限し、試料表面下の極めて浅い領域の格子歪に関する情報を得ることができた。その結果として、

Berg-Barrett 法と二結晶法を用いることで、ロッキング・カーブの Bragg-peak 角と off-Bragg 角位置でのトポグラフ像の違いや酸化膜の左右でのエッジのコントラストの逆転について、そのメカニズムを解明することができた。また、Berg-Barrett 法と二結晶法の(+,-)平行配置, (+,+)配置で撮影したトポグラフ像を比較することで、これらの配置と撮影法に関する特性の違いを検討することができた。そして、段階的なエッチング法を用いることで、鏡面ウエハの表面から一定の深さにある面でのトポグラフ撮影を行い、鏡面加工過程によって生じる格子歪が消失していく一連のトポグラフ像を得ることができた。さらに、5nm という極めて薄い酸化膜端に生ずる応力による格子歪を明瞭に観察することができた。また、 CuK_{β} 線によるトポグラフ撮影の有効性も示した。

今回の $\text{CuK}_{\alpha 1}$ 線を用いた二結晶法でのトポグラフ撮影は、原子核乾板の長時間露光が必要だったため多くの撮影はできなかったが、実際には回転陽極を用いた二結晶法でのトポグラフ撮影を行えば、今回よりもさらに薄い酸化膜による格子歪をもっと短時間で撮影することが可能になる。全反射臨界角近傍での反射トポグラフ撮影は、ほとんど放射光を用いた大規模な実験装置を用いて行われているが、Cu 封入管からの特性 X 線と回折面との組み合わせを利用することで、シリコン表面下の極めて浅い領域に関する情報を実験室レベルで得ることができたことは、本研究が示した方法が大変有意義なことであると思われる。

参考文献

- 1) 菊田惺志「X線回折散乱技術(上)」: 東京大学出版会, (1992).
- 2) 高良和武・菊田惺志「X線回折技術」: 東京大学出版会, (1986).
- 3) 橋爪弘雄・高良和武「X線回折顕微鏡の実験法」: 日本結晶学会誌, 13, (1971)273.
- 4) T. Kitano, S. Kimura and T. Ishikawa: Appl. Phys. Lett. **60**(1992)177.
- 5) Shigeru Kimura, Jun'ichiro Mizuki and Junji: Appl. Phys. Lett. **60**(1992)2604.
- 6) Yoichi Nishino, Seiichi Isomae and Masaada Horiuchi: Jpn. J. Appl. Phys. **29**(1990)1048.