

微小角入射 X 線トポグラフィによる (100)Si 表面の格子歪の観察と評価

西牟田 啓之¹⁾・福森 太一郎²⁾

Characterization of Lattice Distortions in (100) Silicon Crystals Using Grazing Incidence X-Ray Topography

Hiroyuki NISHIMUTA and Taichiro FUKUMORI

Abstract

Since electric devices become easy to be influenced by local stress with improvement in the degree of accumulation of very large scale integration, the quality of the silicon surfaces on which they are made becomes more and more important. Therefore, it is important to detect minute lattice distortion near the silicon surface with sufficient accuracy. X-ray topography under the condition of simultaneous specular and Bragg reflections is effective for imaging a strain of shallow domain near the surface.

In the present study, reflection X-ray topography by Berg-Barrett method using the extremely asymmetric X-ray diffraction and double-crystal arrangement of (+,+) and (+,-) parallel setting of the 311 reflection with $\text{CuK}_{\alpha 1}$ radiation have been applied to observation of lattice strains in near surface of silicon crystals and silicon epitaxial layer on the silicon substrate. For silicon wafers with 4.6 nm-thick oxide film, and 18 nm-thick aluminum film, local variation in the orientation of the lattice plane occurring at the boundary were observed. Lattice distortion images near the surface produced by the mechanochemical polishing and low-energy N^+ ion implantation were clearly visualized. For a wafer with near (100)-oriented surface, and 18 μm thickness epitaxial film grown on $\langle 100 \rangle$ silicon substrate, lattice distortions of faint wrinkle-like pattern and short streaks running horizontally were also observed.

Key Words:

X-ray topography, Strain, Silicon oxide film, Epitaxial film, Nitrogen ion implantation

1. はじめに

超 LSI などの半導体デバイスは、集積度の向上とともに局所的な応力の影響を受けやすいため、結晶表面

の微小な格子歪を精度よく検出することは重要である。

X 線の全反射臨界角近傍での同時回折を利用すれば、X 線の透過深さは数 nm から数 100nm の範囲に抑えられ、極めて浅い結晶領域の格子歪についての知見を得ることができる。一般的には、この全反射との同時回折の測定は、通常の封入管からの特性 X 線と回折面との組み合わせでは、同時回折の条件を満たすものはないため、回折ベクトルが結晶表面に等しい平行な条件

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授

を除けば実験は放射光を分光した X 線を用いて行なわれている。通常用いる特性 X 線と Si の回折面を用いて同時回折の条件を得る方法として、(100)結晶表面と原子面との間に一定の角度差を有するエピタキシャル成長用基板結晶と、ある非対称反射面との組み合わせが非常に有効であることがわかった。これまでの研究では、上に述べた全反射臨界角近傍での同時回折の条件を用いた反射 X 線トポグラフィによって、市販のウェハの鏡面加工による結晶表面下の格子歪や、厚さ数 10nm の酸化膜端に生ずる格子面の傾斜による回折コントラストの観察等を行ってきた。

本研究は、上に述べた研究内容を更に発展させ、現在の MOS 構造のゲート酸化膜の厚さに近い膜厚数 nm の酸化膜や、同じく MOS 構造のソースやドレインに用いられるアルミニウム電極を想定しアルミニウム蒸着膜端に生ずる格子面の傾斜の状況、エピタキシャルウェハの表面下の格子歪の表面コントラスト、及び極めて低いエネルギーでの窒素イオン照射による格子欠陥をトポグラフ観察して評価を行なったものである。

2. 原理

2.1. X 線全反射

光の反射では、 σ 偏光と π 偏光があるが、 σ 偏光（偏光ベクトルが散乱面に垂直）のみをとりあげる。全反射は、X 線領域の場合、屈折率が 1 より極くわずかに

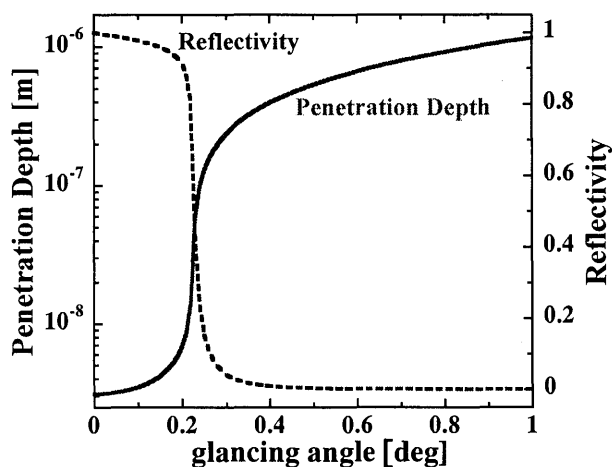


図 1

小さいので、X 線が固体や液体の物質表面に全反射臨界角 θ_c よりも小さな視射角で入射する時に起こる。

図 1 は運動学的理論から導いた $\text{CuK}_{\alpha 1}$ 線の場合の、X 線の透過深さと反射率のグラフである。全反射臨界角

($\approx 0.225^\circ$) を境に X 線の反射率は急激に増大し、透過深さは極端に減少し、数 nm 程度になっている。視射角が低くなると回折強度が極端に弱くなるため、実験では臨界角近傍の視射角を用いた。

2.2. X 線トポグラフィ

回折効果を利用して、非破壊で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などを観察することができる。この方法は X 線トポグラフィ (X-ray diffraction topography) と呼ばれる。電子顕微鏡で単結晶の格子欠陥を観察する場合も、回折効果によりコントラストがつけられ、原理的には同じである。本実験では Berg-Barrett 法と二結晶法を用いている。

2.3. Berg-Barrett 法

この方法は結晶表面近くの欠陥を調べるのに適しており、回折条件がゆるいので、完全性の悪い結晶の境界などの観察も容易にできる。

分解能が低下するのを防ぐために、写真乾板を結晶表面にできる限り近づけ、回折線が乾板に垂直に入るようにする。そのためには、X 線を結晶表面に近い角度で入射させ、回折線がほぼ表面の法線方向に出るような非対称反射を選ぶ必要がある。像のコントラストは消衰効果の減衰によって生ずる。

2.4. 二結晶法

二結晶法を用いることで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。試料の前に、完全に近い単結晶をモノクロメーターとして配置する。この方法を二結晶法と呼ぶ。第 1 結晶に、結晶表面を回折面に対して斜めに切断した Fankuchen Cut Monochromator を設置することで、単色性や平行性が良く強度の高い X 線ビームを試料に入射させることができる。結晶配置により大きく分けると、2 つの結晶での反射でビームが逆向きに折れ曲がる (+, -) 配置と、同じ向きに折れ曲がる (+, +) 配置の 2 つがある。本実験では、非対称反射を利用した非対称 $311(+, -)$ 平行配置と非対称 $311(+, +)$ 配置を用いて格子歪の撮影を行なった。

3. 実験方法

3.1. ウェハの選別

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は起こりにくい。ところが、市販のエピタキシャル成長用の(100)シリコンウェハーの(100)表面と(100)原子面との間の角度差を利用することで、視射角が全反射臨界角 ($\theta_c = 0.225^\circ$) 付近となる回折条件を満たすことができる。この時の角度差は、約 2.6° 程度である。また、結晶表面が格子面と平行に切断されている場合でも一定の加工上の角度差が生じるので、 $\pm 0.3^\circ$ 程度の場合、 $\text{CuK}\alpha$ 線と(311)面との組み合わせが可能となる。そのような(100)ウェハーの4組の{311}面の中で、視射角が臨界角に近い $0.15 \sim 0.25^\circ$ 程度になるものを試料として選んで用いた。

3.2. 試料作製

酸化膜やアルミニウム蒸着膜の応力により生じるシリコンの格子歪や、低エネルギーでのイオン照射による損傷の観察を行なうために、選別した(100)シリコンウェハーから試料を作製した。

- ・酸化膜：現在のMOS構造でのゲート酸化膜には厚さ5nm以下のものも使われている。熱酸化により、極めて薄い酸化膜(膜厚はXPSでのdepth profileにて測定)の作製を行なった。膜端の観察をしやすくするため、膜は一部を残して約1%のHFでエッチングした。

- ・Al蒸着膜：MOS構造のソースやドレインにはアルミニウム電極が使われるため、本実験では真空蒸着装置を用い、ウェハー表面の一部にアルミニウム蒸着膜を作製した。厚さは、繰り返し反射干渉計で測定した。

- ・窒素イオン照射：窒素をシリコンウェハーの表面付近にイオン注入することで、シリコン酸化膜の成長を抑制することができる。これを利用することによって、極めて薄い酸化膜の作製が容易になるため非常に有効なデバイスプロセスの手段として有望視されている¹⁾。そこで、直径3mmの円形の穴を有するマスクを用いて低エネルギーでの窒素イオン照射を行なった。装置は九州大学応用力学研究所の低エネルギーイオン源(TK-10)を用い、室温(23°C)で N^+ , N_2^+ のイオン照射を行なった。本実験では、3keVで N_2^+ を照射した試料の測定を行なった。ドーズ量は $1 \times 10^{15} [\text{N}^+/\text{cm}^2]$ である。

4. 結果と考察

4.1 厚さ4.6nmの酸化膜のついたSiウェハー

4.1.1. Berg-Barrett法での撮影

図2は、(100)シリコンウェハー上に縦2mm, 横1.5mm,

厚さ4.7nmの酸化膜を作製した試料をBerg-Barrett法で撮影したトポグラフである。(b)の写真はBragg peak位置の角度で撮影したもので、(a)と(c)はロッキングカーブのピーク位置から強度が1/2になる角度位置で撮影したもので、それぞれ低角側と高角側(off-Bragg角)で撮影してある。視射角は $0.15 \sim 0.2^\circ$ である。

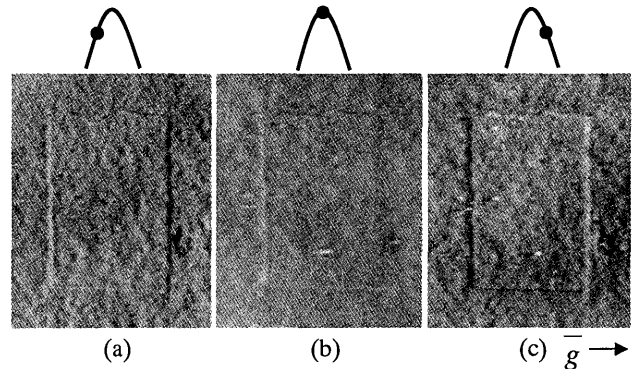


図2 (×25)

4.6nm という非常に薄い膜であるが、その膜端には膜の応力による格子歪像が白と黒のコントラストとして得られた。また全面には、まるでしわのような像が観察された。これは、ウェハー製造工程での鏡面加工によって生じた表面下数nm~数10nm付近にあるシリコンの格子歪像である。この場合の視射角は $0.15 \sim 0.2^\circ$ なので、計算上は表面から約4~7nm付近の格子歪像を撮影していると考えられる。

このコントラストとして得られた白い部分はブラッグ条件からはずれたために回折していない部分で、黒い部分はブラッグ条件を強く満たしている部分である。ピーク位置で撮影した(b)では、低角側(a)や高角側(c)と比べてコントラストが弱くフラットに見える。これは、内部の完全結晶からの動力学的効果による回折波がバックグランドとなり、S/N比を悪くしているためである。歪んだ結晶領域からの運動学的な回折効果によりコントラストは低角側、高角側、ピーク位置のどこでも同様に得られる^{2),3)}。しかし、ピーク位置で撮影したトポグラフは、off-Bragg角でのものと比べて、完全結晶からの動力学的な回折効果が支配的であるために、運動学的な回折効果による像を打ち消し、全体的にコントラストの弱いフラットな像となるのである。

低角側(a)と高角側(c)の写真では、それぞれ膜の左右の端で白黒逆のコントラストがつき、低角側と高角側の写真の間では、白と黒のコントラストが逆転していることが分かる。この歪像は、酸化膜端に集中した応

力によって局所的な格子面の傾斜が引き起こされたためによるものである⁴⁾。シリコンウェハ表面への熱酸化膜形成時に、熱処理の際の SiO_2 と Si との密度と分子量の差による膨張率の違いによって、酸化膜中では圧縮応力（シリコン表面では引っ張り応力）が生じるため、その膜端には局所的な格子面の傾斜が引き起こされる。図 2(a),(c)で左右の膜端でのコントラストが逆であることや、(a)と(c)の間でのコントラストが逆転していることは、試料の微小な回転によって、酸化膜の左右の膜端の片側で Bragg 条件を満たし、もう片側では満たさない状態になったためによるものと考えられる。

4.1.2. 非対称 311(+,-)平行配置での撮影

図 3 は、図 2 と同じ試料を非対称 311(+,-)平行配置の二結晶法で撮影したトポグラフである。(a)はロッキング・カーブの低角側、(b)はピーク位置、(c)は高角側で撮影してある。視射角は $0.15 \sim 0.2^\circ$ である。

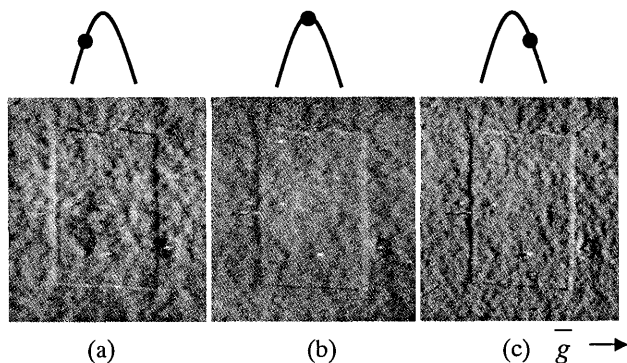


図 3 ($\times 24$)

Berg-Barrett 法と同様に、膜端には膜の応力による格子歪像が、全面には鏡面研磨によって生じたしわのような歪像が白と黒のコントラストとして観察された。

ピーク位置(b)では、ややフラットに見えているが、Berg-Barrett 法と比べるとコントラストが少しいている。これは、おそらく撮影中に X 線の試料への角度がわずかにずれ、回折角が Bragg peak 角から高角側よりになったためであると考えられる。

4.1.3. 非対称 311(+,+)配置での撮影

図 4 は、同じ試料を非対称 311(+,+)配置の二結晶法で撮影したトポグラフである。(a)と(b)はそれぞれロッキング・カーブの低角側と高角側 (off-Bragg 角) で撮影したものである。視射角は $0.15 \sim 0.2^\circ$ である。

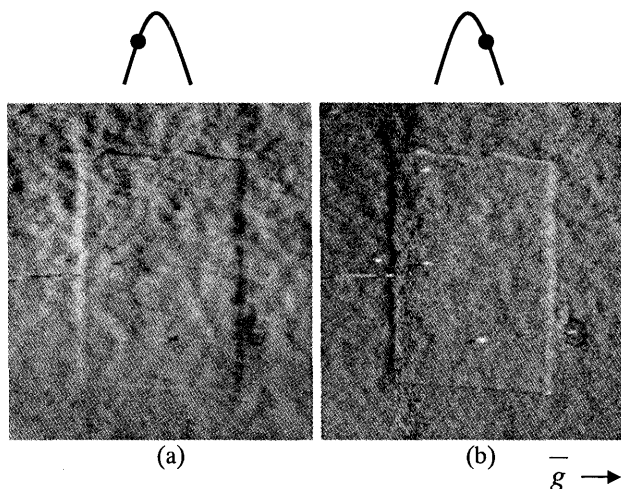


図 4 ($\times 24$)

Berg-Barrett 法や(+,-)平行配置と同様に、膜端には膜の応力による格子歪像が、全面には鏡面研磨によって生じたしわのような像が白と黒のコントラストとして観察された。

4.1.4. Berg-Barrett 法と二結晶法の比較

Berg-Barrett 法、非対称 311(+,-)平行配置、非対称 311(+,+)配置で撮影したトポグラフの比較を行なった。図 5 の(a),(b),(c)は、それぞれ図 2(c),図 3(c),図 4(b)と同じものである。すべてロッキング・カーブの高角側 (off-Bragg 角) で撮影したものである。

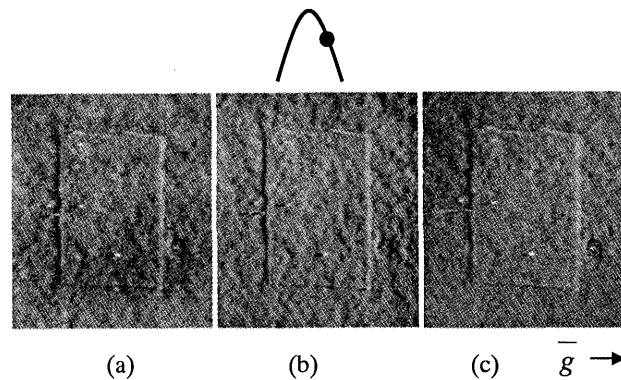


図 5 ($\times 24$)

図 5 の(a),(b),(c)を比較すると、酸化膜端のコントラストに関しては、さほど変わりはない様だが、鏡面加工によると思われる全面のしわのような格子歪像に関しては、明らかに(b)が一番はっきりと観察される。これは、(+,-)平行配置では角度広がり小さく、結晶格子の局所的な傾きや面間隔の変化に対して非常に敏感なためであると考えられる。

また、(c)の写真を他の 2 つと比べると、(+,+)配置の

トポグラフにのみ、膜の左側に横方向に長く伸びた傷のような歪像が見られる。この部分を含んで拡大したトポグラフが次の図6である。

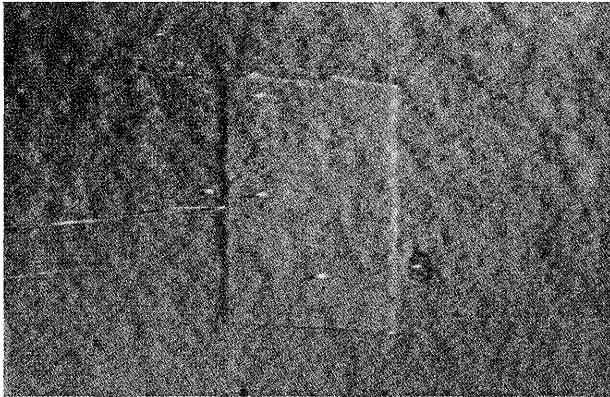


図6 (+, +)配置の写真全体 (x24) \vec{g} →

(+, -)平行配置は、第2結晶(試料)に入射するX線(波長幅 $\Delta\lambda_{\alpha_1}$)の全てを回折し、角度幅が狭いので、格子面の傾きや格子面間隔の変化に対して極めて敏感である。従って、この配置は、局部的に比較的大きく変化する格子歪の検出には適さず、格子歪が微小で緩やかに長距離に及ぶような場合の検出に適しているといえる。一方、(+, +)配置は、第2結晶の微小な格子歪であれば回折条件を満たすため、比較的大きな格子面の傾きや格子面間隔の変化をしている欠陥部分の検出に適している⁵⁾。

ウェハー表面下の鏡面加工に起因すると思われる緩やかに微小に変化するしわのようなコントラストを示す格子歪は、結晶配置の違いによっても変化しており、今回用いたような(+, +)配置、(+, -)平行配置の併用による観察が必要である。

4.2. 視射角による像の違い

視射角が臨界角近くでは、コントラストよく表面下の格子歪を観察できるが、視射角が大きくなると従来の反射トポグラフのように微小な格子歪の検出は困難となることが予想される。以下に示すトポグラフは、同一のウェハーでの視射角による像の違いを見るために撮影したものである。

4.2.1. $\text{CuK}\beta$ 線を用いた Berg-Barrett 法によるトポグラフ

図7は、(100)シリコンウェハー上に縦1.4mm、横1.4mm、厚さ10nmの酸化膜を作製した試料を、 $\text{CuK}\beta$ 線を用いた Berg-Barrett 法で撮影したトポグラフであ

る。(a)はロッキング・カーブの低角側、(b)はピーク位置、(c)は高角側で撮影してある。視射角は $0.15\sim 0.2^\circ$ 。

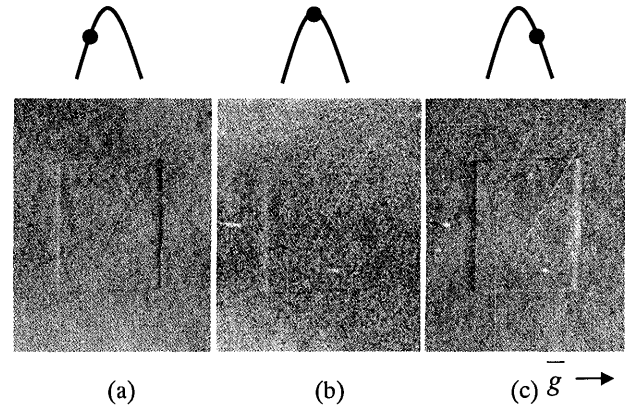


図7 (x24)

露光時間が $\text{CuK}\alpha_1$ 線に比べ5倍ほどかかるため、バックグランドが高くなり像が弱くなっているが、 $\text{CuK}\beta$ 線でも結晶表面下の酸化膜の応力による格子歪像を観察することができた。視射角は $0.15\sim 0.2^\circ$ なので、計算上では表面から約4.6~16nm付近の格子歪像を撮影していると考えられる。

ピーク位置で撮影した(b)では、やはり歪像のコントラストが弱くなっており、低角側(a)と高角側(c)の写真では、白と黒のコントラストが逆転している。

膜の部分から上方にかけて、2本の傷による細い線状のコントラストが観察された。(a)と(c)では、コントラストの逆転が生じていることから熱処理前に外部から加えられた結晶内部の歪であると考えられる。

4.2.2. $\text{CuK}\beta$ 線と $\text{CuK}\alpha_1$ 線を用いたトポグラフの比較

図8(a)は、X線源に $\text{CuK}\beta$ 線を用いたもの(図7(a)の写真と同じ)で、視射角は $0.15\sim 0.2^\circ$ である。(b)の写真は同じ試料を面内で 90° 回転させ、X線の入射方向を変えて撮影したものである。X線源には $\text{CuK}\alpha_1$ 線を用い、視射角は 0.4° である。(a)、(b)ともにロッキング・カーブの低角側で撮影してある。(b)は(a)と対応させるために、撮影した向きから 90° 回転させてある。酸化膜から上部にかけて見えている2本の傷が対応している。

図8の(a)と(b)では膜の形が異なるように見えるが、これは原子核乾板上では試料表面上に比べ、像が横方向に約20%縮小されているためである。

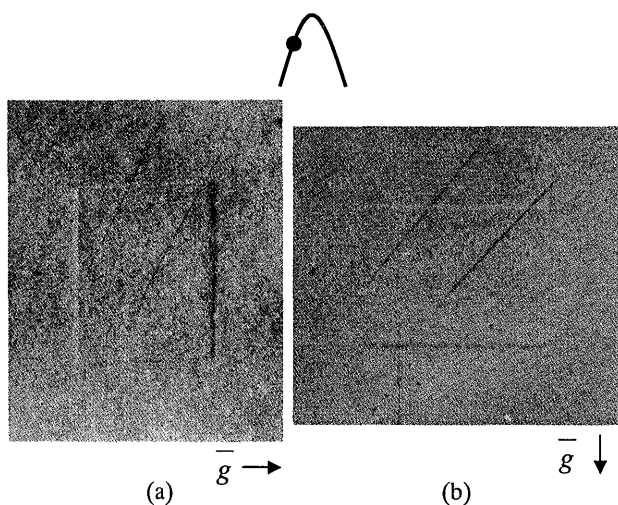


図8 (×24)

(a)では視射角が $0.15\sim 0.2^\circ$ であることから、X線の透過深さは表面から約 $4.6\sim 16\text{nm}$ 付近である。それに対し、(b)では視射角が 0.4° であることから、透過深さは表面から約 390nm 付近と深くなっているため、結晶内部での動力学的回折によるバックグランドが高いために、像が非常に薄くなっている。このことから、視射角が常に全反射臨界角近傍の微小な角度でなくては、表面付近の微小な格子歪像を鮮明に得ることはできないことがわかる。

また、膜の部分から上方にかけての2本の研磨傷と思われる歪像は、(b)の写真の方が明瞭に観察できていることから、この2本の歪は表面下の深いところにあるものと考えられる。

4.3. 厚さ 4.0nm の酸化膜のついた epitaxial Si ウェハー

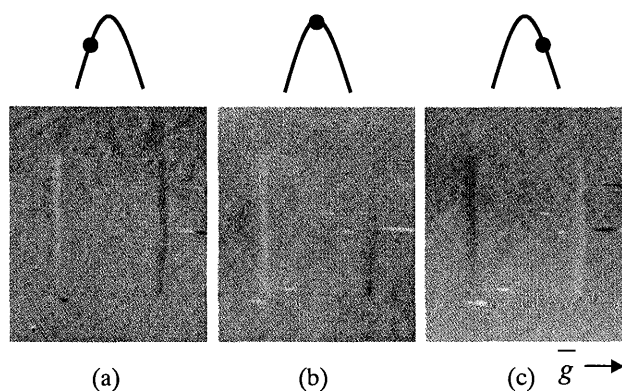


図9 (×28)

図9は、(100) Si 基板上厚さ $18\mu\text{m}$ のエピタキシャル膜を成長させた結晶を用いて、その上に縦 1mm 、横 1mm 、厚さ 4nm の酸化膜を作製した試料を Berg-Barrett 法 ($\text{CuK}_{\alpha 1}$ 線)で撮影したトポグラフである。(a)はロッ

キング・カーブの低角側、(b)はピーク位置、(c)は高角側で撮影してある。視射角は $0.15\sim 0.2^\circ$ である。 $\langle 100 \rangle$ 方向に沿って数 $100\mu\text{m}$ の間隔の緩やかなしわのような歪像が観察された。視射角が $0.15\sim 0.2^\circ$ なので、表面から約 $4\sim 7\text{nm}$ 付近を撮影していると考えられ、エピタキシャル層が $18\mu\text{m}$ もあることから、これはエピタキシャル層に伴った歪像であると言える。

4.4. 厚さ 18nm の Al 蒸着膜のついた Si ウェハー

図10は、(100)シリコンウェハー上に縦 2mm 、横 1mm 、厚さ 18nm の Al 蒸着膜を作製した試料を Berg-Barrett 法 (CuK_{β} 線)で撮影したトポグラフである。(a)はロッキング・カーブの低角側、(b)はピーク位置、(c)は高角側で撮影している。視射角は $0.15\sim 0.2^\circ$ である。

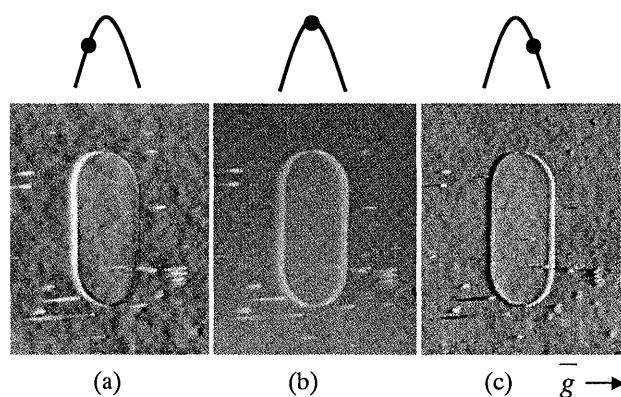


図10 (×24)

Al 蒸着膜であっても、酸化膜同様の歪像を観察することができた。撮影には CuK_{β} 線を用いており、視射角は $0.15\sim 0.2^\circ$ であることから、X線の透過深さは $4.6\sim 16\text{nm}$ 程度である。膜の左右のコントラストのつき方が、低角側では左側が白、右が黒、高角側では左が黒、右が白という様に酸化膜と同じなので、酸化膜と同じ圧縮応力が生じていると考えられる。

4.5. 低エネルギー窒素イオン照射 Si ウェハー

4.5.1. Berg-Barrett 法での撮影

図11は、(100)シリコンウェハー上に直径 3mm の円形のスリットを置き、加速電圧 1.5keV で窒素イオンを照射した試料の Berg-Barrett 法トポグラフである。ドーズ量は $1\times 10^{15} [\text{N}^+/\text{cm}^2]$ である。写真では像が横方向に約 20% 縮小されているため、照射部分の歪像が楕円形に見える。(a)はロッキング・カーブの低角側、(b)は高角側で撮影している。視射角は $0.2\sim 0.25^\circ$ である。

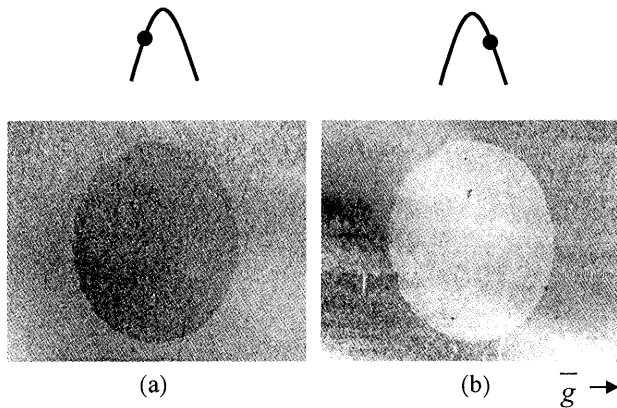


図 11 (×20)

視射角が $0.2 \sim 0.25^\circ$ であることから、計算上では X 線の透過深さは表面から約 $7 \sim 130 \text{ nm}$ 程度と見積もられるが、このように、超低エネルギーでのイオン照射によって生じたシリコン結晶の歪像を観察することができた。白い部分はブラッグ条件を満たしていない部分で、黒い部分はブラッグ条件を強く満たしている部分である。この歪像は、低角側(a)と高角側(b)でコントラストが逆転しており、低角側で強く回折条件を満たしていることから、打ち込まれた窒素イオンが格子間原子となり、またシリコン反跳原子によって格子面間隔が膨張したためによるものである²⁾。

また、イオン照射部分での回折も生じていることから、この部分は非晶質 (amorphous) 層は存在しても極めて薄いものと考えられる。

4.5.2. 非対称 311 (+, -) 平行配置での撮影

図 12 は、図 11 と同じ試料を、(+, -) 平行配置を用いて撮影したトポグラフである。(a) は Bragg peak 角から $66''$ 低角側、(b) は Bragg peak、(c) は高角側で撮影している。視射角は $0.2 \sim 0.25^\circ$ である。

(+, -) 平行配置で撮影した図 12 では、全面のしわのような歪像もはっきりと観察できる。(a) から(b),(c)と、試料をロッキングさせるにつれ、イオン照射部が黒から白へと変わっていくのが分かる。これは、イオン照射部分での回折条件を満たす回折角が、格子膨張のために低角側に大きくずれているということである。このことから、イオン照射による歪が、酸化膜による歪よりも歪の度合いが更に大きいことを示している。

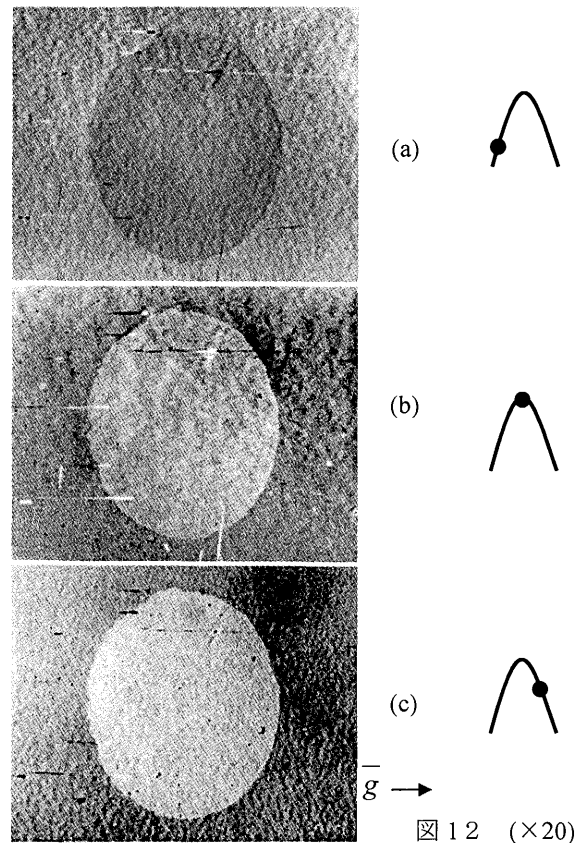


図 12 (×20)

4. まとめ

市販のエピタキシャル成長用基板結晶に用いられる(100)シリコンウェハーを用いて、結晶表面と(100)原子面間の角度差 $\Delta\alpha$ を利用することによって、通常の封入管からの X 線波長と非対称 311 反射との組み合わせで、全反射臨界角近傍での同時回折の条件を満たすことができる。本研究は、全反射臨界角近傍での同時回折の条件を備えた X 線トポグラフィ法によって、市販のウェハーの鏡面加工による結晶表面下の格子歪や、酸化膜やアルミニウム蒸着膜の応力による格子歪像、さらにイオン照射による格子歪像の観察・評価を行なったものである。トポグラフィとしては、 $\text{CuK}\alpha_1$ 線、 $\text{K}\beta$ 線を用いた Berg-Barrett 法や二結晶法を使用した。

実験の結果、非常に薄い (4.0 nm) 酸化膜であっても、その応力の集中によって膜端に生じた局所的な格子面の傾斜を観察することができた。また、アルミニウム蒸着膜の膜端でのコントラストの表れ方から酸化膜と同じ圧縮応力が生じていることがわかった。ウェハー全面には、鏡面研磨によると考えられるしわのような歪像が観察された。また、ウェハー上に成長させた $18 \mu\text{m}$ のエピタキシャル層でも、緩やかなしわのよ

うな歪像が観察された。これは、基板ウェハの歪がエピタキシャル層にも影響を及ぼしているものと考えられる。イオン照射による歪像は、超低エネルギー (1.5keV) での注入であったにもかかわらず、格子間に入り込んだ窒素原子等が大きな面間隔の膨張を引き起こしているということがわかった。また、加速電圧 1.5keV、ドーズ量 $1 \times 10^{15} [\text{N}^+/\text{cm}^2]$ での窒素イオン照射では、照射部分は非晶質ではなく結晶性を保っていることがトポグラフより判明した。

結晶の(100)結晶表面と(100)原子面の間角度差 $\Delta\alpha$ に応じて $\text{CuK}_{\alpha 1}$ 線と CuK_{β} 線を使い分け、結晶の完全性の具合や露光時間などによって Berg-Barrett 法、(+, -) 平行配置、(+, +) 配置の特徴を活かした撮影法を用いれば、本研究で用いた方法がシリコン表面近くの各種の微小な格子歪の評価に有効であると考えられる。

参考文献

- 1) D.Skarlatos, C.Tsamis and D.Tsoukalas : J. Appl. Phys., Vol.93, No.3, 1 February(2003)1832
- 2) T. Kitano, S. Kimura and T. Ishikawa: Appl. Phys. Lett., 60 (1992) 177.
- 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) Y. Nishino, S. Isomae and M. Horiuchi: Jpn. J. Appl. Phys., 29 (1990) 1048.
- 5) 高良和武・松下正「複結晶配置による単結晶の完全性の評価」: 日本結晶成長学会誌 Vol.4 No.1&7(1977)