

イオン照射により Si 基板に導入された格子歪みの深さ方向分布の解析

榎本貴志

国立豊田工業高等専門学校

〒471-8525 愛知県豊田市栄生町 2-1

P. V. Satyam

インド国立物理学研究所

Sachivalvaya, Bhubaneswar, 751005, India

秋本晃一

名古屋大学大学院工学研究科

〒464-8603 名古屋市千種区不老町

要旨 1.5 MeV の Au イオンを照射した Si(1 1 1) 基板について、深さ方向に対する格子歪み分布を、極端に非対称な X 線回折法を用いて調べた。測定により得られた Si 1 1 3 反射に対する回折強度曲線には、バルク反射に加え、強度振動を伴ったサブピークが見られた。動力的回折理論計算を用いてカーブフィッティングを行った結果、基板表面以下～500 nm にわたって、伸び歪みが導入されていることが分かった。また、シミュレーションの結果、表面以下～80 nm 以内の結晶深さ方向の格子歪み分布を明らかにすることができた。

1. はじめに

半導体プロセスにおいて、良く利用される技術の一つとして、イオン照射が挙げられる。例えば、半導体結晶表面清浄化技術としてのスパッタリング、半導体結晶中への p 型接合や n 型接合の作成技術としてのドーパント注入、結晶中での不純物ゲッタリングサイトの形成などの応用がある。また、打ち込み酸化膜層 (SIMOX) のように、半導体結晶中に“埋もれた”絶縁層を作ることもできる。イオン注入は、結晶中でのイオン分布再現性の良さや低温プロセスである点が魅力である。

一方で、基板へのイオン照射は、結晶に対する照射損傷を引き起こす。その例として、原子空孔の生成、反跳原子や照射イオンによる格子間サイトの占有が挙げられる。これらは結晶格子歪みの原因となり、場合によってはキャリアの移動度に影響を与えてしまうであろう。そのような観点から、イオン照射によって導入される格子歪みの程度や深さ分布を把握することが重要である。また、最近ではイオン注入によるナノ構造の生成¹⁾についても研究されている。

イオン注入やドーパント拡散による、基板中の格子歪み評価については、X 線回折法が使われることが多い。基板のバルク反射近傍の回折強度分布を調べることにより、結晶の構造の乱れを観察することができる。この手法は、表面からバルク深くまで達した微小格子歪みの評価に適している。例えば Yagi ら²⁾は、B や P の Si 結晶中拡散による応力を、エッチング技術と X 線回折を併用して評価した。Kuribayashi ら³⁾は、160 MeV 程度の Au, Cu, Ni イオン照射した Si 基板について、X 線回折強度曲線から、

最大 0.1% オーダの格子歪みが 15～25 μm の深さまで導入されていることを見いだした。

著者らは、より表面近傍の格子歪みを調べるため、“極端に非対称な X 線回折法 (extremely asymmetric x-ray diffraction)” を確立した⁴⁾。本回折法では、すれすれ入射条件での極端に非対称な Bragg-case という光学系を用いる。結晶表面に対する X 線の入射角は、全反射臨界角程度に設定されるため、結晶中への X 線侵入深さが数十 nm 以下に抑えられる。このため、この光学系において励起される回折波の強度曲線には、結晶表面極近傍の構造情報 (格子歪みなど) が得られることとなる。著者らは、この手法を用いて、自然酸化膜層が Si 結晶表面にもたらす格子歪み⁵⁾、MOS (Metal-Oxide-Semiconductor) 構造における金属層成長と Si 結晶格子歪みの関係⁶⁾、表面近傍に拡散した Ni 原子がもたらす格子歪み⁷⁾、Si 基板上の high-k 膜 (HfO₂) 成長後の基板アニールによる格子歪みの緩和⁸⁾、バイアススパッタリングによる GaAs 表面近傍の格子歪み⁹⁾などについて調べてきた。

本稿では、Si 基板表面に 1.5 MeV の Au イオンを照射した場合について、結晶中に導入される歪みを、極端に非対称な X 線回折法により観察した例¹⁰⁾を紹介する。この例を通して、本手法の表面近傍格子歪みの感度についても議論する。

2. 実験方法

基板として、両面鏡面仕上げされた Si(1 1 1) 単結晶を用いた。基板表面は、メタノール、トリクロロエチレンによる脱脂の後、純水ですすぎ、清浄化された。

基板への Au²⁺ イオン照射は、インド国立物理学研究所の3.0 MV ペレットロンタンデム加速器を用いて行われた。照射エネルギーは1.5 MeV、イオンの基板へのドーズ量は $5 \times 10^{13}/\text{cm}^2$ 、照射中の基板温度は室温であった。イオン照射中のイオン電流は20 nA 程度に保持された。試料は、基板表面へのイオンの入射角の異なる二枚を用意した。ひとつは、イオンの入射角が基板表面垂直方向から5度（以後、垂直入射条件と呼ぶ）傾けたものであり、もうひとつは、基板表面垂直方向から30度（以後、30度入射条件と呼ぶ）傾けたものである。いずれの場合もチャンネルングは生じていないことを確認している。

Si 結晶基板中に導入された格子歪みの評価は、極端に非対称な Bragg-case 光学系にて、Si (1 1 1) 基板の Si 1 1 3 反射に対する回折強度曲線を測定することでなされた。実験は高エネルギー加速器研究機構・放射光研究施設 BL-15C にて行われた。このビームラインは、実験ハッチ上流に配置された Si(1 1 1) 二結晶モノクロメータにて、任意の波長の平行 X 線を得ることができる。また、ハッチ内には角度にして0.1秒以下の精度で制御可能な回折計を備えており、超精密な角度分解能を持つ回折強度曲線あるいはトポグラフィを撮ることができる。

Fig. 1 に実験概略図を示す。二結晶モノクロメータで単色化された X 線は、試料表面に対して約0.2度で入射する。その結果、鏡面反射波および比較的大きな角度で励起される回折波を生じる。入射 X 線強度はイオンチェンバにて、また回折 X 線強度はシンチレーション検出器にて測定された。なお、試料の湾曲による回折強度曲線の角度分解能の劣化を避けるため、試料とシンチレーション検出

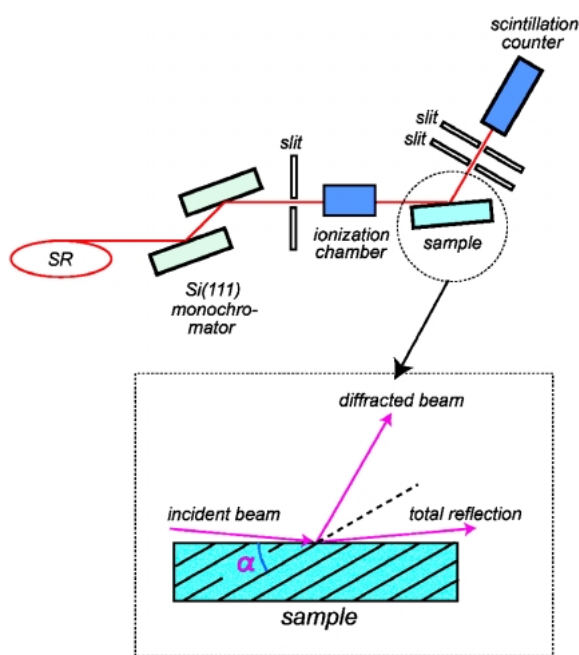


Fig. 1 Illustration of experimental setup for extremely asymmetric x-ray diffraction.

器間に、 $1 \times 1 \text{ mm}^2$ のスリットを配した。

今回、回折面として使用する(1 1 3)面は、試料表面垂直方向の(1 1 1)面に対して29.5度を成す。測定された回折強度曲線から直接把握できるのは、(1 1 3)面間隔あるいは傾きの変化であるが、間接的には(1 1 1)面についての歪みを把握することになる。

3. 電子顕微鏡観察および回折強度曲線

Fig. 2(a) に、垂直入射条件で作成された試料断面の透過電子顕微鏡 (TEM) 像¹¹⁾を示す。試料表面から深さ約470 nm に、幅150 nm 程度の黒い帯が見られる。これは、Si 結晶中に注入された Au イオンによるものと考えられる。つまり垂直入射条件の場合、Au イオンの射影飛程 (projected range) は約470 nm、射影分散 (straggling) は約150 nm ということになる。なお、同様の作成条件で作られた試料について、ラザフォード後方散乱法 (RBS/C) で調べた結果¹²⁾、深さ約420 nm に幅150 nm 程度のデュオダ層が存在することが分かっており、TEM での観測結果と一致する。Fig. 2(b) は、試料表面近傍 (Fig. 2(a) における領域 I) での高分解能電子顕微鏡 (HRTEM) 像である。イオン照射後においても、酸化膜-結晶界面はシャープであり、結晶表面は良好な結晶性を保っていることが分かる。一方 Fig. 2(c) は、イオンの射影飛程近傍 (Fig. 2(a) における領域 II) での高分解能像である。結晶性は、ある程度保たれているが、写真の左下付近には非晶質領域が形成されていることが分かる。このような埋もれた非晶質領域の形成は、重イオン照射によって起こることが報告されている¹²⁻¹⁵⁾。

Fig. 3 に、垂直入射条件にて作成された試料に対する X 線回折強度曲線を示す。なお、入射 X 線の波長は、Fig. 3(a) では0.1619 nm、Fig. 3(b) では0.1616 nm、Fig. 3(c) では0.1613 nm である。得られた回折強度曲線は、Fig. 3(a) に見られるように、右端に現れる鋭いメインピークと、そ

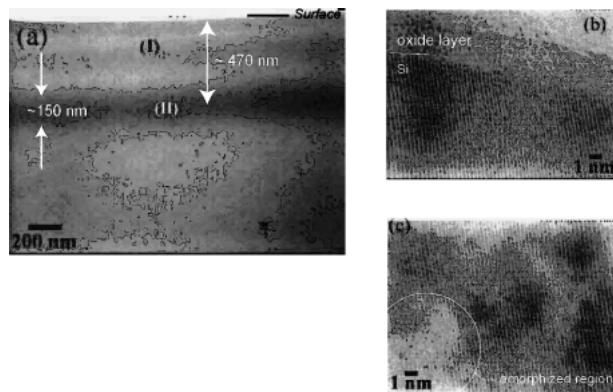


Fig. 2 (a) cross-sectional TEM image for sample (normal incidence condition). (b) HRTEM image of near surface region. (c) HRTEM image of near end of range.

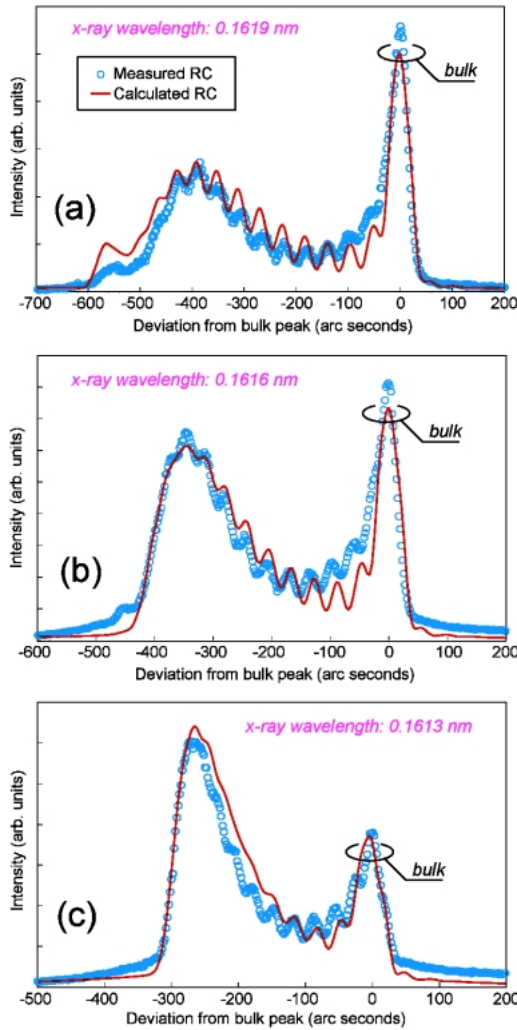


Fig. 3 Measured rocking curves (open circle) for sample of normal incidence condition. Wavelengths of x-rays are (a) 0.1619 nm, (b) 0.1616 nm, and (c) 0.1613 nm. Results of curve-fitting (solid line) are also shown.

こから左に続く強度振動を伴ったサブピークから成る。メインピークは結晶バルクからの回折波、サブピークは歪んだ結晶層からの回折波によるものであり、これらの干渉によって強度振動が生じていると考えられる。なお、サブピークのメインピークに対する相対強度は、X線波長を短くするにつれて大きくなる。試料表面へのX線入射角は、全反射臨界角程度であることから、X線波長を短くすることは、X線の結晶中への侵入深さが浅くなることを意味している。つまり、X線波長が短くなるにつれ、サブピーク強度が支配的になるということは、表面側の結晶が歪んでいることを示唆するものである。

Fig. 4 に、30度入射条件にて作成された試料に対する回折強度曲線を示す。垂直入射条件の曲線と比較すると、印象が異なって見えるが、基本的な構造は全く同じである。**Fig. 4(a)**では、右端に見られるメインピーク（ダブルレット）が、結晶バルクからの回折によるものであり、このピーク

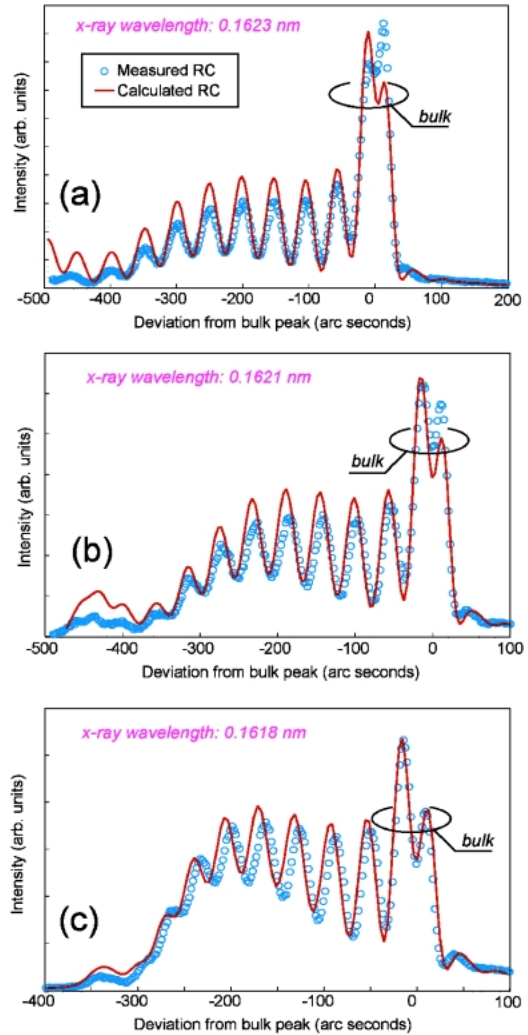


Fig. 4 Measured rocking curves (open circle) for sample of 30°-incidence condition. Wavelengths of x-rays are (a) 0.1623 nm, (b) 0.1621 nm, and (c) 0.1618 nm. Results of curve-fitting (solid line) are also shown.

から左側に続く、大きな強度振動を伴ったサブピークが、歪んだ結晶層からの寄与である。この場合も、X線波長を短くするにつれ、サブピーク強度が支配的になるので、歪んだ結晶層は表面近傍にあるものと考えられる。

いずれの場合も、サブピークがメインピーク（バルクピーク）の低角側に出現することから、歪んだ結晶層の(1 1 3)面間隔は、バルクのそれと比べて広がっていると考えられる。

4. 格子歪みの分析方法および結果

4.1 歪んだ結晶モデル

結晶中での格子歪みの分析は、適当な“歪んだ結晶構造モデル”を仮定し、これを基に計算された回折強度曲線と実験曲線を比較することでなされる。なお、本研究で使用したX線光学系では入射波、鏡面反射波、回折波による

多重散乱が無視できないため、動力的回折理論を用いて回折強度曲線を計算する必要がある。特に、対象とする試料が、表面再構成構造や格子歪みのような不規則性を持つ場合には、高橋らにより提案された拡張 Darwin 流理論¹⁶⁾が便利である。

歪んだ結晶モデルとして、結晶深さ方向のみに歪んだようなモデルを仮定した。つまり、表面垂直方向の(1 1 1)面間隔が深さに対して変化するような構造である。結晶深さ方向への格子歪み分布関数として、次のように二つの Fermi-Dirac 分布関数からなる分布関数を仮定した。

$$\varepsilon(z) = \frac{P_1}{1 + \exp[-(P_2 - z)/P_3]} + \frac{P_1}{1 + \exp[(P_4 - z)/P_5]} - P_1$$

ここで、 z は結晶表面からの深さ、 P_1 は最大歪み値、 P_2 は表面側構造遷移層の深さ、 P_3 は表面側遷移層の幅、 P_4 はバルク側構造遷移層の深さ、 P_5 はバルク側遷移層の幅を意味する。このモデルは、より少ないパラメータ数で、遷移層の幅や歪み分布の傾きを表現することができる。なお、実際の試料では、Fig. 2(b)に見る通り、Si 結晶表面に 3 nm 程度の自然酸化膜層が存在する。この酸化膜層は、X 線の吸収膜として作用し、測定に用いる波長が短い場合には X 線回折強度曲線の形状を歪ませてしまう⁵⁾。今回の実験においては、極端に短い波長の X 線を用いていないので、酸化膜による吸収効果は無視できる。従って、我々の用いた結晶モデルでは、表面酸化膜層は考慮していない。なお、今回の結晶モデルは、1000 nm 厚の歪み結晶層の下に、半無限厚の完全結晶が続き、歪み結晶と完全結晶はなめらかに接続している。

4.2 回折強度曲線を決定付けるパラメータの同定

作成条件の異なる試料での回折強度曲線 (Fig. 3 および Fig. 4) を比較すると、①強度振動の振幅や周期、②サブピークのピーク位置や広がりには違いが見られる。つまり、この二点に注目することで、歪み分布の分析が可能であると考えられる。

なお、測定・計算による強度曲線は、Fig. 3 や Fig. 4 に見られるように強度振動が原因で、サブピーク自体の形状が見難い、そこで、今後、サブピーク形状を議論する場合は、測定・計算された強度曲線そのものを使用せず、それを適当な積分幅で平滑化した曲線を使用するものとする。Fig. 5 にその一例を示す。Fig. 5(a) は、測定された強度曲線の一つ (Fig. 4(b) と同じもの) である。この曲線を 40 秒の積分幅で平滑化した曲線が Fig. 5(b) である。平滑化前の曲線もグラフ中に示した。矢印で示した範囲を見れば、この操作によってサブピークの概形が抽出できることがわかる。

前述の結晶モデルを用い、各々のパラメータ変化に対する回折強度曲線を計算することで、サブピーク概形・強度

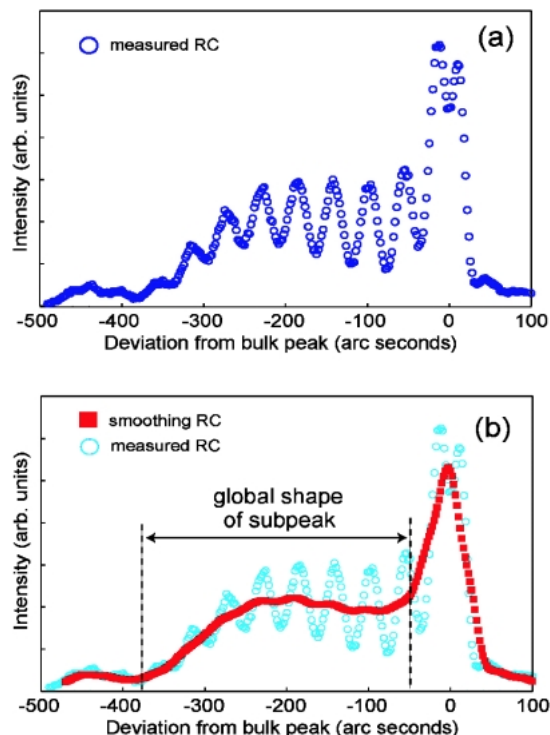


Fig. 5 (a) example of measured rocking curve (same as Fig. 4(b)). (b) comparing of native curve (open circle) with smoothed curve (solid square).

振動を決定付けるパラメータを調べた。Fig. 6 に、各パラメータ変化に対するサブピーク概形の変化の様子を示す。なお、Fig. 6(a) から (e) に示された強度曲線は、計算結果そのものではなく、平滑化された曲線である旨、注意されたい。Fig. 6(a) から (e) を比較すると、パラメータ P_2 および P_3 に対して、サブピーク概形の変化が著しい。なお、これらのパラメータは、歪み層の表面側深さと広がり記述する。一方で、歪み層のバルク側深さと広がり記述する、パラメータ P_4 および P_5 に対しては、サブピーク概形の変化は乏しい。以上のことから、回折強度曲線のサブピーク概形は、結晶表面近傍の格子歪み分布に敏感であることが予想できる。なお、Fig. 6(a) より、パラメータ P_1 もサブピーク概形に若干の影響を与えていることが分かるが、Fig. 6(f) を参照すると、パラメータ P_1 を変化させると、結晶表面側およびバルク側の格子歪み分布まで変化していることが分かる。つまり、Fig. 6(a) に見られるサブピーク概形の変化は、パラメータ P_1 というよりは、 P_1 の変化に伴う、表面側歪み分布の変化が直接的な原因であると思われる。

この考察を確かめるべく、次のようなシミュレーションを行った。Fig. 7(b) に示したような、三つの異なる格子歪み分布に対して回折強度曲線を計算し、それらの平滑化曲線を比較した。ただし、これらの歪み分布は Fig. 7(c) のように、表面近傍の歪み分布が一致したものである。これらに対する曲線は、Fig. 7(a) に示されるように、サブピーク

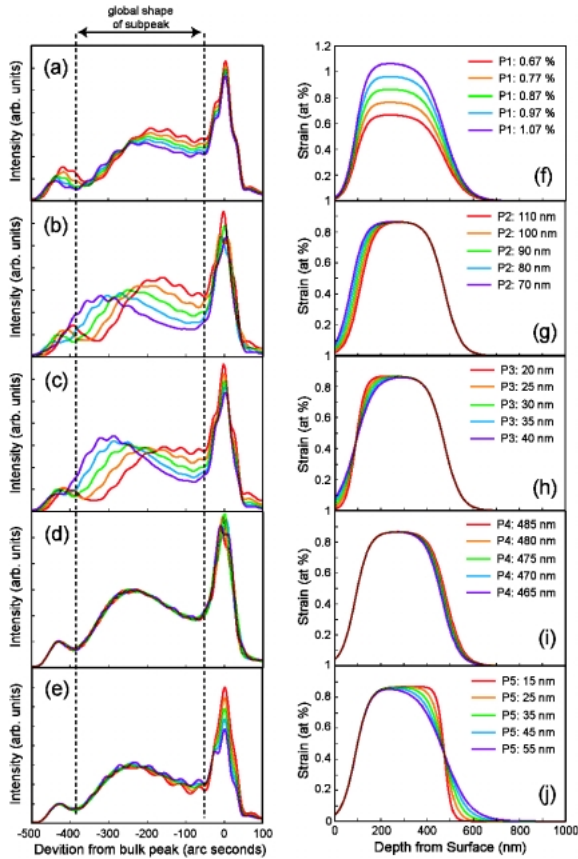


Fig. 6 Global shapes of calculated sub peaks vs. parameter (a) P1, (b) P2, (c) P3, (d) P4, and (e) P5, respectively. Strain distributions altered by (f) P1, (g) P2, (h) P3, (i) P4, and (j) P5 also shown.

概形が一致していることが分かる。以上のことより、結晶表面近傍の格子歪み分布がサブピーク概形を決定することが分かった。また、本光学系で測定される回折強度曲線は、結晶表面から深さ80 nm 程度の格子歪み分布に敏感であることも分かった。

上述したように、歪み層のバルク側深さと広がりを目録するパラメータ P_4 および P_5 は、サブピーク概形にはほとんど影響を与えないが、微細構造である強度振動の特徴に影響を与える。Fig. 8 に、各パラメータに対する回折強度曲線の変化を示す（なお、Fig. 8 (a), (b) を平滑化したものが、Fig. 6 (d), (e) に相当する）。パラメータ P_4 は、強度振動の位相に敏感であり、パラメータ P_5 は、位相だけでなく、振幅や周期にも敏感であることが分かる。以上より、バルク側の格子歪み分布が強度振動の特徴を決定することが分かった。

4.3 分析結果

以上のシミュレーション結果を踏まえて、まず、回折強度曲線のサブピーク概形のフィッティングから、パラメータ P_2 および P_3 を決定した。次に、強度曲線の微細構造（強度振動）のフィッティングから、パラメータ P_4 および

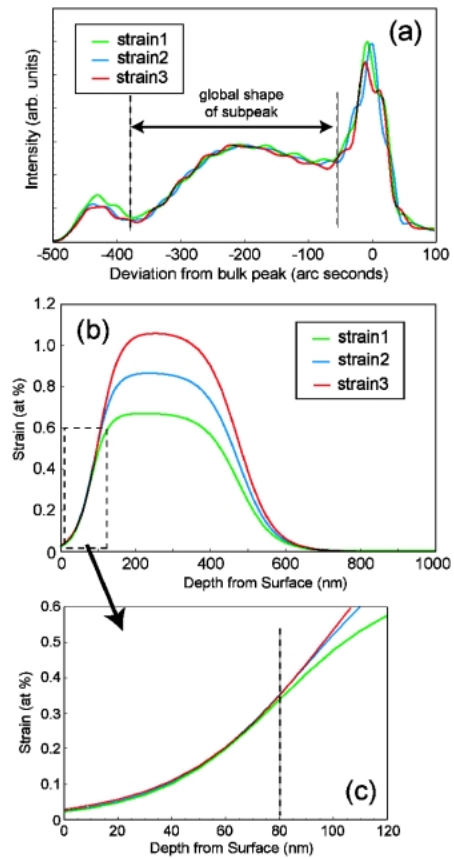


Fig. 7 (a) global shapes of sub peaks calculated with strain profiles shown in (b). (c) Strain profiles within a depth of 80 nm of (b).

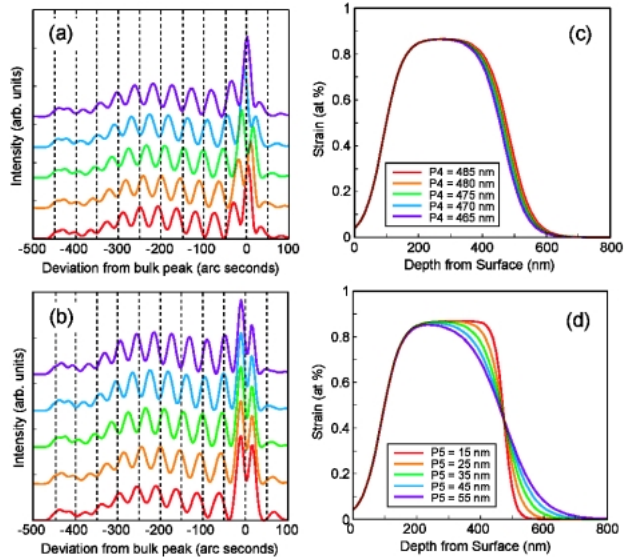


Fig. 8 Calculated rocking curves vs. parameter (a) P4, and (b) P5, respectively. Strain profiles altered by (c) P4, and (d) P5 are also shown.

P_5 を決定した。最後に、パラメータ P_1 を最適化して、歪み分布プロファイルを決した。この手法により決定され

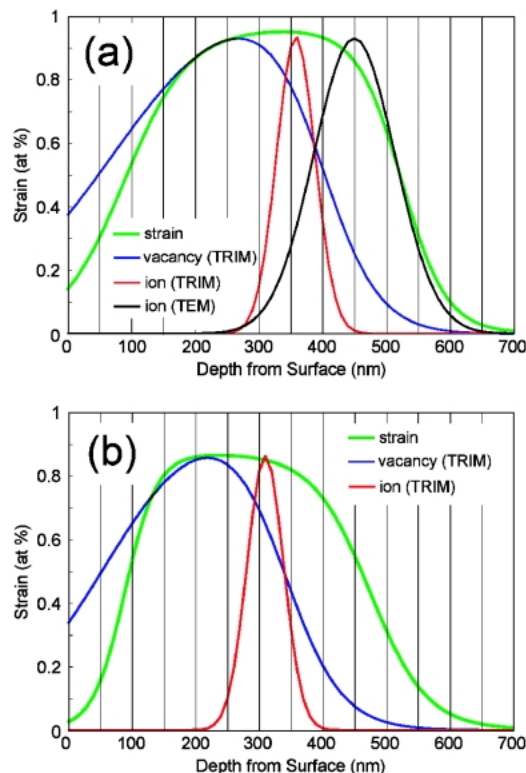


Fig. 9 Resultant strain profiles (green lines) for the sample of (a) normal incidence condition, (b) 30°-incidence condition. Profiles of created vacancy (blue line) and stopping-ion (red line) are simulated by TRIM code. Profile of stopping-ion (black line) evaluated by TEM is also shown.

た歪み分布曲線を **Fig. 9** に示す、なお、**Fig. 9** の分布曲線を基に計算された回折強度曲線を、**Fig. 3** および **Fig. 4** に実線で示した。垂直入射条件の試料の場合、Si 結晶表面での格子歪みは0.15%程度で、深さ250 nm 程度まで緩やかに増加し、一定となった。また、深さ400 nm 程度から緩和が始まり、深さ700 nm に至っては、ほぼ完全緩和している。一方、30度入射条件の試料の場合、結晶表面での格子歪みは0.03%程度と、垂直入射条件に比べて小さい。その後、格子歪みは深さ150 nm 程度まで急激に増加し、一定となった。また、深さ350 nm 程度より歪み緩和が始まり、深さ700 nm では、ほとんど完全緩和となった。

これらの結果より、Au イオン照射により、Si 結晶中には約500 nm にわたって、伸張歪み（つまり、表面垂直方向に並ぶ(1 1 1) 面間隔の膨張）が導入されることが分かった。また、結晶表面に対して、イオンを斜入射した場合、垂直入射に比べて、①結晶表面での格子歪み量が小さく、②結晶の浅い領域に歪みが導入されることが分かった。

5. 議論

以下では、イオン照射による Si 結晶への格子歪み導入

の原因について考える。固体へのイオン照射において、格子歪みの原因となり得るものは、①固体中に留まった照射イオンによるものと、②イオン—固体相互作用によって形成された格子欠陥によるものがあると思われる。そこで、TRIM code¹⁷⁾を用いて、Si 結晶中で停止した Au イオン数の深さに対する分布、およびイオン—Si 原子の弾性衝突によって形成される原子空孔数の深さに対する分布を計算し、格子歪み分布曲線と比較して、その寄与を調べた (**Fig. 9** 参照)。なお、イオン分布および原子空孔分布曲線の最大値は、歪み分布曲線の最大値に規格化してある。また、参考のため、垂直入射条件の場合については、断面 TEM 像 (**Fig. 2(a)**) から見積もられたイオン分布曲線も描いた。

TRIM 計算の結果、照射イオンの Si 結晶における深さ分布曲線は、垂直入射条件の場合、深さ358 nm、幅71 nm のガウス分布となった。一方、30度入射条件の場合、深さ309 nm、幅68 nm のガウス分布となった。なお、垂直入射条件でのイオンの射影飛程および射影分散は、TEM および RBS/C での観察より、深さ470 nm、幅150 nm 程度であると考えられ、TRIM code での計算結果と大きく異なっている。実際、MeV 程度の入射エネルギーにおいて、TRIM code の計算結果は、20%程度の過小評価となることが知られている¹⁵⁾。よって、イオン分布曲線については、TEM 観察による結果をより確からしい値として考える。**Fig. 8(a)**において、TEM 像から見積もられたイオン分布曲線と格子歪み分布曲線を比較すると、450–700 nm に掛けての形状が非常に近い。このことから、歪んだ結晶層の界面深さは、イオンの射影飛程に依存すると考えられる。以上より、歪み層のバルク側の格子歪みは、Si 中にとどまった Au イオンが格子間配置 (interstitial) を取ることにより、伸張歪みが導入されたのではないかと考えられる。一方、歪み分布曲線と原子空孔分布曲線の比較より、表面側の格子歪みは、イオンとターゲット原子の弾性衝突による格子欠陥の形成が原因であると思われる。また、表面近傍にも伸張歪みが導入されていることから、入射イオンによる反跳 Si 原子が自己格子間配置 (self-interstitial) をとることにより、格子歪みが発生していると推察される。

Kuribayashi ら³⁾は、160 MeV Au イオンを照射された Si(1 1 1) 結晶表面について、X 線回折強度曲線から格子歪み分布を調べた。その結果、イオンの射影飛程 (~15 μm) 付近に0.09%程度の伸張歪みが導入されていることが分かった。この場合、格子歪みの原因は、固体中に停止したイオンによる寄与が支配的である。本研究での照射エネルギーは1.5 MeV であり、Kuribayashi らに比較して二桁小さい。従って、Au イオンの照射エネルギーが MeV 程度の場合には、固体中で停止したイオンだけでなく、イオン—原子相互作用による格子欠陥の形成も格子歪みに大きく寄与していると考えられる。

特に興味深いのは、試料作成条件（イオンの照射角度）によって、Si 結晶表面での格子歪みが大きく異なる点である。30°入射条件の場合、垂直入射条件に比べて、表面での歪み量は一桁ほど小さい。現時点では、この原因について結論を得ておらず、今後の課題としたい。

なお、本研究で用いた試料は、Si 結晶表面に酸化膜が存在している。これまでの研究で、結晶表面への酸化膜の形成は、表面近傍に格子歪みをもたらすことが分かっている⁵⁾。その意味では、本研究で明らかになった結晶表面での格子歪みは、酸化膜の存在による歪みと、イオン照射による歪みが競合した結果であると考えられる。

6. おわりに

イオン照射により結晶に導入される格子歪みについて、極端に非対称な X 線回折法を用いて調べた例について紹介した。回折強度曲線のサブピーク概形と、強度振動に着目することで、結晶深さ方向の格子歪み分布を明らかにすることができた。

謝辞

本稿で紹介した研究は、高エネルギー加速器研究機構・物質構造科学研究所の平野馨一氏の協力のもとで行われました。また、名古屋大学工学研究科・伊藤勝広氏には、実験のサポートをしてもらいました。また、著者の一人の P. V. Satyam の、共同研究のための来日は、日本学術振興会外国人招へい研究者（短期）(S-04062) の制度により行われました。ここに謝意を表します。この研究は、文部科学省科学研究費 (No. 16340088) および高エネルギー加速器研究機構 PF 共同利用実験課題 No. 2002G197, No. 2004G218 により行われました。

参考文献

- 1) B. Satpati, P. V. Satyam, T. Som and B. N. Dev: Appl. Phys. A79, 447 (2004) (Rapid Comm.).
- 2) K. Yagi, N. Miyamoto and J. Nishizawa: Jpn. J. Appl. Phys. 9, 246 (1970).
- 3) M. Kuribayashi, K. Takumi, A. Inoue, H. Tanaka, H. Tomita, Y.-C. Jiang, H. Katoh, K. Ishida, K. Aizawa, S. Okayasu, H. Tomimitsu and Y. Kazaumata: Jpn. J. Appl. Phys. 36, 7296 (1997).
- 4) T. Emoto, K. Akimoto and A. Ichimiya: J. Synchrotron Rad. 5, 964 (1998).
- 5) T. Emoto, K. Akimoto and A. Ichimiya: Surf. Sci. 438, 107 (1999).
- 6) T. Emoto, K. Akimoto, Y. Ishikawa, A. Ichimiya and A. Tanikawa: Thin Solid Films 369, 281 (2000).
- 7) T. Emoto, K. Akimoto, A. Ichimiya and K. Hirose: Appl. Surf. Sci. 190, 113 (2002).
- 8) T. Emoto, K. Akimoto, Y. Yoshida, A. Ichimiya, T. Nabatame and A. Toriumi: Appl. Surf. Sci. 244, 55 (2005).
- 9) Y. Yoshida, K. Akimoto, T. Emoto, S. Kikuchi, K. Itagaki and H. Namita: Appl. Surf. Sci. 234, 409 (2004).
- 10) T. Emoto, K. Akimoto, K. Ito, J. Ghatak and P. V. Satyam: e-J. Surf. Sci. Nanotech. 4, 25 (2006).
- 11) J. Ghatak, B. Satpati, M. Umananda, P. V. Satyam, K. Akimoto, K. Ito and T. Emoto: Nucl. Instrum. Methods B 244, 64 (2006).
- 12) J. Kamila, B. Satpati, D. K. Goswami, M. Rundhe, B. N. Dev and P. V. Satyam: Nucl. Instrum. Methods B 207, 291 (2003).
- 13) O. W. Holland, S. J. Pennycook and G. L. Albert: Appl. Phys. Lett. 55, 2503 (1989).
- 14) T. Motoka, S. Harada and M. Ishimaru: Phys. Rev. Lett. 78, 2980 (1997).
- 15) K.-M. Wang, F. Chen, H. Hu, J.-H. Zhang, X.-D. Liu, D.-Y. Shen, T. Narusawa and M. Nagaki: Jpn. J. Appl. Phys. 41, 918 (2002).
- 16) T. Takahashi and S. Nakatani: Surf. Sci. 326, 347 (1995).
- 17) J. F. Ziegler, J. P. Biersack and U. Littmark: "The Stopping and Range of Ions in Solids" (Pergamon Press, New York, 1985) Chap 8.

● 著者紹介 ●



榎本貴志

独立行政法人高等専門学校機構
国立豊田工業高等専門学校 助教授

E-mail: emoto@toyota-ct.ac.jp

専門：表面界面物理，X線回折

[略歴]

1999年名古屋大学大学院工学研究科量子工学専攻博士課程満了，博士(工学)。1999年名古屋大学工学研究科助手，2002年豊田高専講師を経て2004年より現職



秋本晃一

名古屋大学工学研究科 量子工学専攻
助教授

E-mail: akimoto@cc.nagoya-u.ac.jp

専門：表面界面物理，X線回折

[略歴]

1985年東京大学大学院工学系研究科物理工学専攻博士課程修了，工学博士，1985年日本電気株式会社基礎研究所勤務を経て1994年より現職



Parlapalli Venkata Satyam

Institute of Physics, Bhubaneswar, India (インド国立物理学研究所) Assistant Professor

E-mail: satyam@iopb.res.in

専門：X線回折，電子顕微鏡

[略歴]

1997年Utkal University, India, Ph.D., 1996年～1999年 Argonne National Laboratory, USA, 1999年 Senior Lecturer, Institute of Physics, Bhubaneswar, India を経て2003年より現職

Strain profile in Si substrate along to depth direction due to MeV ion-implantation

Takashi EMOTO

Department of Physics, Toyota National College of Technology,
2-1, Eisei-cho, Toyota 471-8525, Japan

P. V. SATYAM

Institute of Physics, Sachivalvaya, Bhubaneswar, 751005, India

Koichi AKIMOTO

Department of Quantum Engineering, Nagoya University,
Furo-cho, Chikusa-ku, Nagoya 464-8603, Japan

Abstract Strain profile in Si substrate due to 1.5 MeV Au ion-implantation was studied by extremely asymmetric x-ray diffraction. The rocking curve of Si 1 1 3 reflection showed a broad sub peak with intensity oscillation derived from the distorted layer. The strain profile in depth-direction was evaluated by curve fitting method between the measured curve and the curve calculated by dynamical diffraction theory. The result showed that the lattice spacing of (1 1 1) planes was expanded by ~ 500 nm under the Si surface. From the simulation of x-ray rocking curve, it is clarified that this diffraction method is sensitive to the strain distribution within a depth of ~ 80 nm.