

平成 23年 5月 24日

機関番号： 33401  
 研究種目： 基盤研究 (C)  
 研究期間： 2008 ~ 2010  
 課題番号： 20560017  
 研究課題名(和文) X線回折による歪シリコンウエーハの歪量測定に関する研究  
 研究課題名(英文) Measurements of the strain in strained Si wafers by X-ray diffraction methods  
 研究代表者  
 梅野 正隆 ( UMENO MASATAKA )  
 福井工業大学・工学部・教授  
 研究者番号： 50029071

## 研究成果の概要 (和文)：

LSI の高速化に期待される歪シリコンウエーハの極薄歪層の結晶性と歪量をウエーハ全面で評価する手法を確立することを目標とした。放射光 X 線トポグラフによりウエーハ全面の歪分布を求め、歪量は逆格子マップから求めた。入射角を変えた一連の X 線 CCD 画像から各位置でのロックイングカーブを求め、そのピーク位置、半値幅、積分強度を画像化した。これより市販の代表的な歪シリコンウエーハには 0.1%程度の<110>に平行な結晶面の傾きが存在すること、歪量は約 0.75%でほぼ一様であることを明らかにし、所期の目標を達成した。

## 研究成果の概要 (英文)：

The aim of this study was to establish a method for characterizing the crystalline perfection and strain on the whole area of the strained Si wafers which would be promising as the LSI wafers of the next era. Synchrotron radiation was used to obtain X-ray topographs of whole area of 30cm wafers and the amount of the strain was estimated with the reciprocal lattice mapping method. From the CCD topographic images obtained by successively changing incident angles, locking curves of all points corresponding to the pixels of the CCD were obtained. The peak positions, FWHMs and integrated intensities of the locking curves were imaged independently. From these images it was revealed that the commercial strained silicon wafers contain crystalline imperfections such as inclination of crystalline planes, while the amount of the strain was nearly 0.75% and almost constant whole over the wafers. The aim of the present study could be attained.

## 交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
20 年度	1,600,000 円	480,000 円	2,080,000 円
21 年度	1,000,000 円	300,000 円	1,300,000 円
22 年度	1,000,000 円	300,000 円	1,300,000 円
年度			
年度			
総計	3,600,000 円	1,080,000 円	4,680,000 円

研究分野： 工学

科研費の分科・細目： 応用物理学・工学基礎 応用物性・結晶工学

キーワード： 結晶評価、歪シリコンウエーハ、X線回折、トポグラフィ、

## 1. 研究開始当初の背景

限りなく高集積化を続けてきた Si-LSI は、配線容量による遅延が高速化を律速する段階となり、デザインルールの縮小だけでは動作速度の上昇は頭打ちになりつつあった。このため、Cu 配線による多層配線構造を離れて光配線によって配線容量による遅延を克服する研究が進みつつあり、デバイス構造による高速化がふたたび期待されるようになった。このようなデバイス構造による高速化を担うものとして、メタルゲートの利用とともにチャネルへの歪の導入が注目されていた。本研究はこのような背景から、Si-LSI の高速化の大きな柱である歪みシリコン技術を、定量的な評価によって促進しようとしたものである。

## 2. 研究の目的

MOSFET のチャネル駆動電流は電子の易導度に比例し、易導度は 0.5% の引っ張り歪で 50% 程度増大する。Si への歪みの印加には、素子のチャネル領域個々に歪みを印加する場合と、ウエーハ全面に歪み Si 層を形成した s Si ウエーハを用いるグローバル歪み技術があるが、本研究では後者のウエーハ全体の歪分布と歪量を定量的に測定評価する手法の確立を目的とした。

## 3. 研究の方法

LSI デバイスの高速化を目的とする歪シリコンウエーハは SOI (Silicon on Insulator) の Si 層を歪 Si で置き換えた構造をしており、その厚さは数 10 nm と非常に薄い。放射光 X 線トポグラフは SPring-8 および高エネルギー物理学研究機構の放射光施設 Pforon Factory (PF) で行った。30cm 径ウエーハ上の極薄層の評価には、ビーム幅の広い平行 X 線の得られる SPring-8 の BL20B2 を用いてウエーハ全面のトポグラフを観察した。

一方 PF の BL-15 では狭い領域のひずみ分布を入射角  $\omega$  を少しずつ変えた一連のトポグラフから、各ピクセルごとの強度曲線を求め、各ピクセルのピーク位置、半値幅、積分強度を画像化することにより、高分解能の 2 次元ひずみ分布を測定した。図 1 は SPring-8 における配置図である。また、局所的な歪量は実験室での 4 軸ゴニオメータを用いた 113 ブラッグ点周辺の逆格子マッピング解析により求めた。

試料は ①バルク歪 Si ウエーハ、②張り合わせ法による s-SOI (Si On Insulator) ウエーハ、③s-Si/SGOI (酸化濃縮法で作製した SiGe On Insulator 上に歪み Si 層を成長させたウエーハ)、④SC-sSOI (特殊な方法で s-SOI の歪 Si 層を臨界膜厚以上に厚く成長させた 30 センチウエーハ) の 4 種類である。

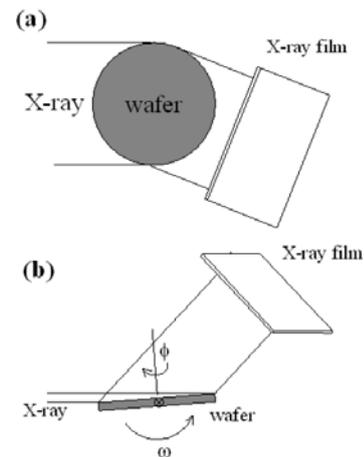


図 1 トポグラフ撮影法の概念図

## 4. 研究成果

直径 30cm の大口径 Si ウエーハ上の 100 ナノメートル以下の極薄歪 Si 層の結晶性とひずみ分布の定量的評価法を確立した。膜厚が 75nm と最も厚く、実用性の高いと云われている SC-sSOI ウエーハの場合について得られた成果を以下にまとめる。

(1) 全面トポグラフと平均歪み量

図2に図1の配置で得られた口径30cmの歪Si層(sSi)のトポグラフ像とウエーハ中央部の113反射点付近の逆格子マップを示す。ウエーハ全面に直交するクロスハッチパターンと不均一な濃淡コントラストが見られ、sSiの結晶性が不均一であることが分かる。断面TEM観察では転位等の結晶欠陥は見られず、X線トポグラフにより始めて観察された。逆格子マップから歪み量を推定すると0.75%であった。

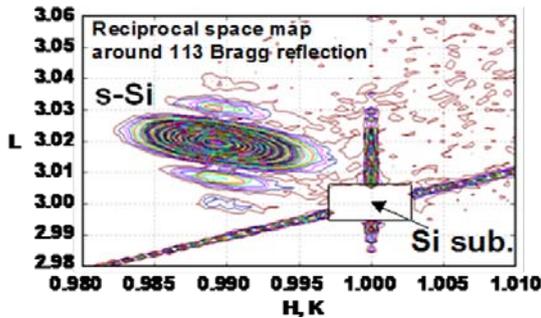
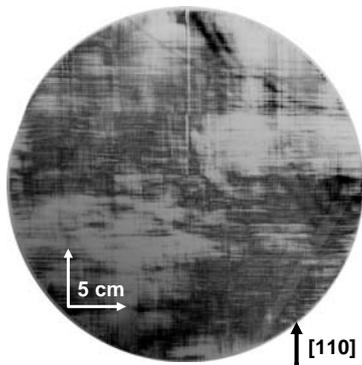
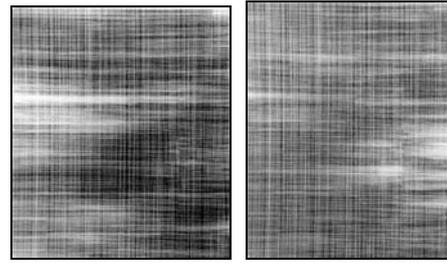


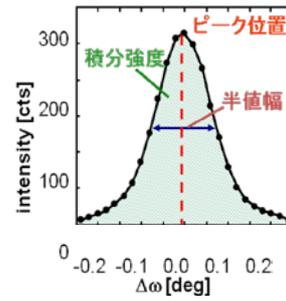
図2 SC-sSOI ウエーハの全面トポグラフ及び113反射付近の逆格子マップ

(2) 2次元歪み分布の測定

図2によりsSi層には全面にわたって結晶性の不均一性に起因するコントラストが見られる。X線によるコントラストは結晶面の傾きと格子面間隔の相異によって生じる。本研究ではこれらを区別して評価する手法を確立した。



(a) (b)



(c)

図3 (a)、(b) 入射角 $\omega$ が $0.02^\circ$ 異なる同じ場所のトポグラフ。(c) ロッキングカーブ

図3(a)、(b)はウエーハ上の同じ位置で入射角を $0.02^\circ$ 変えたCCDで得たトポグラフである。このような像を入射角 $0.02^\circ$ おきに30枚撮影し、CCDの同じピクセルの強度をプロットすると(c)のようなロックンクカーブが得られる。ピーク位置はその場所の格子面傾きと結晶面間隔(歪み)に関係し、入射角を逆にすることによってこれらを分離することができる。また半値幅はその点における揺らぎを表わしている。全てのピクセルについてロックンクカーブを求め、これらの量を画像化することにより、2次元歪み分布の像を得ることができる。図4にその例を示す。

これより、結晶面は $\langle 110 \rangle$ に沿って $\pm 1$ 度程度傾いており、格子歪の揺らぎはその $1/10$ 程度であることが分かる。これよりトポグラフ上に見られたクロスハッチパターンは結晶面の傾きによるものであることが分かる。また、格子歪はウエーハ全体にわたってほぼ均一には云っていることが分かった。

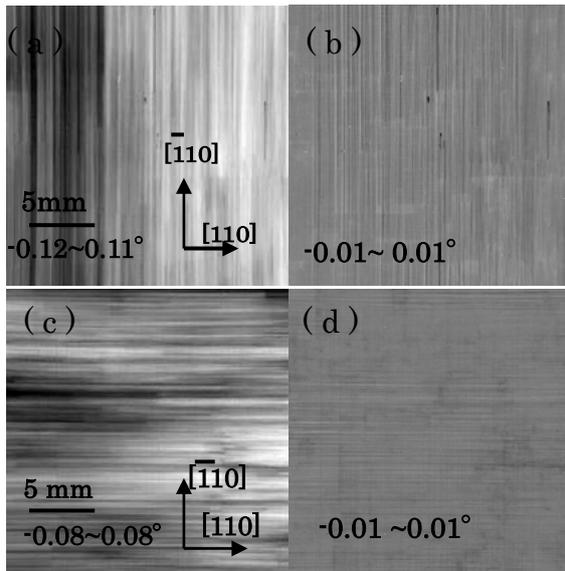


図4 90°異なる方向から求めた格子面傾斜  
((a),(c))と格子歪((b),(d))の2次元分布

### (3) 研究成果のまとめ

各種の歪シリコンウエーハについて、歪Si層のひずみ分布を可視化し、歪の値を定量的に測定することができた。さらに、歪Si層の結晶面傾斜と格子面間隔の面内分布を区別して可視化する手法を確立した。市販の歪Siウエーハについて調べたところ、歪量はほぼ一様であるが結晶性がウエーハ面内で不均一であり、今後の品質向上に本研究による評価手法が活用されることが期待される。

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 5 件)

1. T. Shimura, D. Shimokawa, T. Inoue, T. Hosoi, H. Watanabe, O. Sakata, and M. Umeno, "Thermal Stability and Electron Irradiation Damage of Ordered Structure in the Thermal Oxide Layer on Si", J. Electrochem. Soc. (査読有り), 157 (2010) H977-H981
2. T. Shimura, Y. Okamoto, T. Inoue, T. Hosoi, and H. Watanabe, "Residual Order in the Thermal Oxide of a Fully-strained SiGe

Alloy on Si", Phys. Rev. B (査読有り), 81 (2010) 033308-1-4.

3. T. Shimura, Y. Okamoto, S. Daisuke, T. Inoue, T. Hosoi, and H. Watanabe, "Synchrotron X-ray Diffraction Studies of Thermal Oxidation of Si and SiGe", ECS Transactions (査読有り), 19 (2009) 479-493.
4. T. Shimura, T. Inoue, Y. Okamoto, T. Hosoi, H. Edo, S. Iida, A. Ogura and H. Watanabe, "Observation of Crystalline Imperfections in Supercritical Thickness Strained Silicon on Insulator Wafers by Synchrotron X-ray Topography", ECS Transactions (査読有り), 16 (2008) 539-543.
5. T. Shimura, K. Kawamura, M. Asakawa, H. Watanabe, K. Yasutake, A. Ogura, K. Fukuda, O. Sakata, S. Kimura, T. Edo, S. Iida and M. Umeno, "Characterization of Strained Si Wafers by X-ray Diffraction Techniques", J. Mat. Sci.: Materials in Electronics (査読有り), 19 Suppl.1 (2008) 189-193.

[学会発表] (計 6 件)

1. T. Shimura, "Observation of Two-Dimensional Distribution of Lattice Inclination and Strain in Strained Si Wafers by Synchrotron X-Ray Topography", 13th International Conference on Defects-Recognition, Imaging and Physics in Semiconductors, 2009年9月, Wheeling, USA.
2. 志村 考功, 「放射光X線トポグラフィによるSGOIウエーハの歪み及び格子面傾斜揺らぎの2次元分布測定」、第70回応用物理学関係連合講演会、2009年9月、富山大学。
3. 志村 考功, 「放射光X線トポグラフィによる歪みSiウエーハの歪み及び格子面傾斜揺らぎの2次元分布測定」、第56回応用物理学関係連合講演会、2009年3月、筑波大学。
4. T. Shimura, "Observation of Crystalline Imperfections in Supercritical Thickness Strained Silicon on Insulator Wafers by Synchrotron X-ray Topography", 214th ECS Meeting, 2008年5月, Honolulu, USA.
5. T. Shimura, "Investigation of Structural Defects

in Strained Si Wafers by Synchrotron X-ray Topography”, The 5<sup>th</sup> International Symposium on Advanced Science and Technology of Silicon Materials, 2008年11月, Kona, USA.

6. 志村 考功、「放射光X線マイクロビームによるSiGe酸化濃縮時における歪み緩和過程の局所領域評価」、第69回応用物理学関係連合講演会、2008年9月。

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

梅野 正隆 (福井工業大学・工学部・教授)  
(MASATAKA UMENO)  
研究者番号：50029071

### (2) 研究分担者

志村 考功 (大阪大学大学院・工学研究科・  
准教授)  
(TAKAYOSHI SHIMURA)  
研究者番号：90252600

### (3) 連携研究者 なし