

機関番号：14401

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2010～2013

課題番号：22560023

研究課題名(和文) 表面拡散による形態変化を利用したシリコン表面における三次元微細構造形成

研究課題名(英文) Three Dimensional Micro-structure Formation on Si Surfaces Using Surface-Diffusion-Driven Shape Transformation

研究代表者

須藤 孝一 (SUDOH, Koichi)

大阪大学・産業科学研究所・准教授

研究者番号：90314426

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,200,000円、(間接経費) 960,000円

研究成果の概要(和文)：シリコン基板上に形成した高アスペクト比微細ホールパターンを非酸化雰囲気中で高温アニールすると自発的な形態変化が起こる。本研究では、この自発的な形態変化を利用した3次元微細構造形成技術について研究した。様々な構造・寸法の微細ホールパターンについて形態変化過程を観察し、自発的な形態変化を利用して形成することができる3次元構造を明らかにした。連続体モデルに基づいた高アスペクト比ホールの形態変化の数値シミュレーションを行い、シリコン基板上のホールパターンの形態変化が表面拡散によって引き起こされていることを明らかにした。

研究成果の概要(英文)：Spontaneous shape transformation occurs as high-aspect-ratio hole patterns fabricated on Si substrates are annealed in non-oxidizing ambient at high temperatures. In this project, formation technology of three dimensional micro-structures applying the spontaneous shape transformation was investigated. Observing the shape transformation processes for various hole patterns, three dimensional structures created using this method were shown. Performing numerical simulations based on continuum theory, the dominant mass transport mechanism for the observed shape transformation was found to be surface diffusion.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：応用物理学・工学基礎 薄膜・表面物性

キーワード：表面 シリコン 微細構造 表面拡散

1. 研究開始当初の背景

近年、半導体デバイス構造の微細化・複雑化が急速に進んでおり、より高度な半導体微細加工技術が要求されている。リソグラフィ技術をベースとした微細加工技術は2次元の微細構造形成に関してはナノスケールの加工精度を実現しているが、複雑な3次元の微細構造を形成する技術はまだ確立されていない。

最近の研究によって、シリコン基板上に形成した高アスペクト比の微細パターンを非酸化雰囲気中で高温アニールすると、表面拡散によって特異な形態変化が起こることが知られている。本研究では、この形態変化現象を利用した新しい3次元微細構造形成技術を実現することを目指して研究を行った。

2. 研究の目的

本研究の目的は、表面拡散による高アスペクト比微細ホールパターンの特異な形態変化を利用して、シリコン基板上に3次元微細構造を形成する技術を実現することである。形態変化過程を制御するために、形態変化のメカニズムを理解する。そして、初期微細パターンを適切に設計することによって、デバイス作製に応用可能な3次元微細構造を形成する。

3. 研究の方法

(1)Si(001)基板上にボッシュプロセスにより様々な構造・寸法の高アスペクト比微細ホールパターンを作製した(図1)。作製したサンプルは、超高真空もしくは水素雰囲気中で1000以上でアニール処理を施して形態変化を誘起した。サンプルの断面及び表面構造は、それぞれ走査電子顕微鏡(SEM)と原子間力顕微鏡(AFM)を用いて分析した。

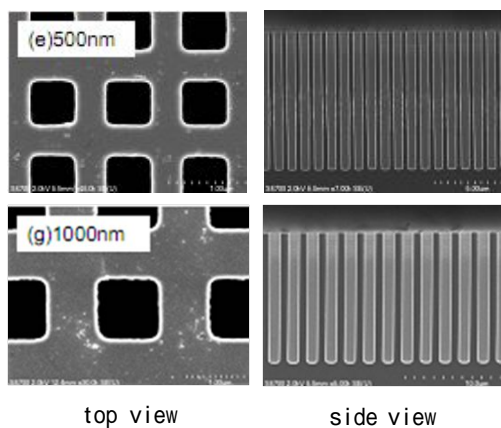


図1. 作製した高アスペクト比ホールパターンの例.

(2)実験で観察された高アスペクト比微細ホールパターンの形態変化のメカニズムを理解するために、連続体モデルによる形態変化の数値シミュレーションを行う。特に、モデルにSiの表面エネルギーの異方性を取り込んだ数値計算を実現し、形態変化過程の定量的な予測を可能にする。

(3)高温アニール処理やドライエッチングを利用して、微細ホールパターンから形成したSi-on-nothing(SON)構造の表面平坦化や表面Si層の薄膜化技術を実現する。

4. 研究成果

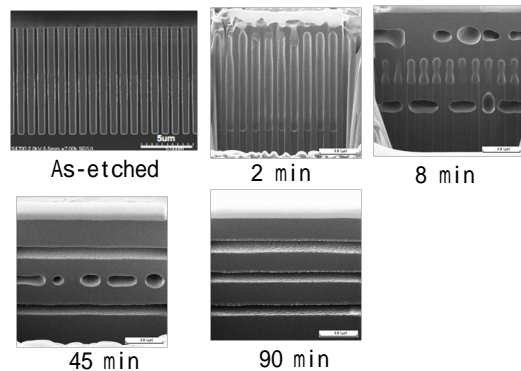


図2. 高アスペクト比ホールパターンの高温アニールによる形態変化の様子.

(1)Si(001)基板上に形成した高アスペクト比ホールの正方配列パターンを高温アニールした時の形態変化の様子をSEMで観察した(図2)。高アスペクト比ホールの開口付近は構造的に不安定であり、形態変化の初期段階において開口が閉塞し、基板内部に空洞が形成される。その後、初期ホールパターンのアスペクト比が大きい場合には、空洞の分裂が起こる。さらに、ホール間の距離が十分に小さい場合には、空洞同士の融合が起こり、

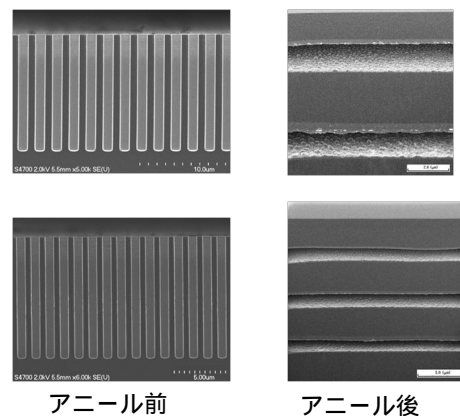


図3. ホールパターンのアスペクト比に依存した多層空洞形成.

最終的には大きな板状の空洞が形成されることになる。

また、空洞が分裂する数は、初期ホールのアスペクト比のみで決まっていることが分かった。アスペクト比とホールの間隔を適切に設計することで図3に示すようにシリコン基板中に様々な多層空洞構造を形成できる。

(2)連続体理論に基づく数値シミュレーションを行い、Si(001)表面上における高アスペクト比ホールの形態変化が表面拡散によって引き起こされている事を明らかにした。表面エネルギーの異方性の効果を考慮することで、数値シミュレーションにより観察結果を定量的に再現できることを示した(図4)。

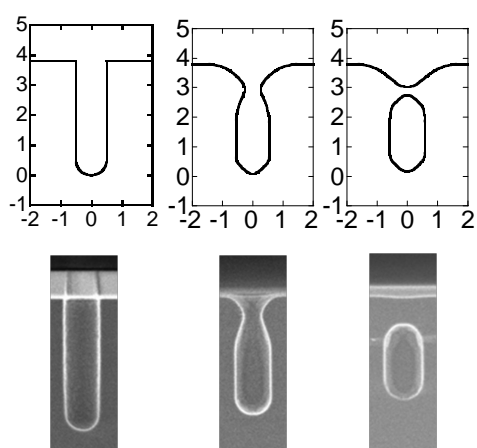


図4. 高アスペクト比ホールの形態変化の数値シミュレーション結果(上段)と観察結果(下段)。

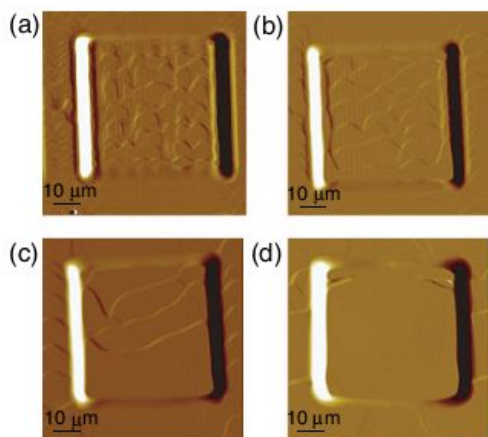


図5. ステップフロー昇華による Silicon-on-nothing 構造表面の平坦化過程。

(3)微細ホールパターンの形態変化によって形成した Silicon-on-nothing(SON)構造の表面 Si 層を高温アニールによってナノスケールレベルで平坦化することに成功した。ステップから選択的に蒸発が起こる温度領域で SON 構造をアニールすると Si 層表面のステップが SON 領域の周辺へと掃き出され、表面が平坦化されることが分かった(図5)。

(4)SON 構造における表面シリコン層を反応性イオンエッチングにより 100nm 以下の厚さまで薄膜化して単結晶シリコン・ナノメンブレンを形成することに成功した(図6)。

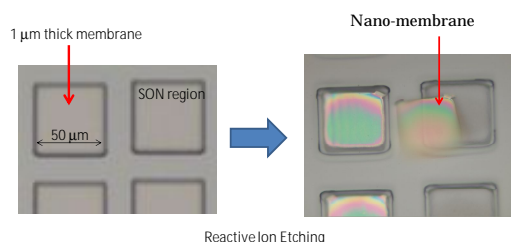


図6. シリコンナノメンブレンの形成

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計5件)

X. Hao, S. Tanaka, A. Masuda, J. Nakamura, K. Sudoh, K. Maenaka, H. Takao, K. Higuchi, Application of Silicon on Nothing Structure for Developing a Novel Capacitive Absolute Pressure Sensor, IEEE Sensors J., 査読有, 14, 2014, 808-815  
DOI:10.1109/JSEN.2013.2288681

T. Fujii, T. Namazu, K. Sudoh, S. Inoue, Focused Ion Beam Induced Surface Damage Effect on the Mechanical Properties of Silicon Nanowires, J. Eng. Mat. & Tech., 査読有, 135, 2013, 041002-1-7  
DOI:10.1115/1.4024545

T. Fujii, K. Sudoh, S. Sakakihara, M. Naito, S. Inoue, T. Namazu, Nano-Scale Tensile Testing and Sample Preparation Techniques for Silicon Nanowires, Jpn. J. Appl. Phys., 査読有, 52, 2013, 110118-1-9  
DOI:10.7567/JJAP.52.110118

K. Sudoh, R. Hiruta, H. Kuribayashi, Shape Evolution of High Aspect Ratio Holes on Si(001) during Hydrogen Annealing, J. Appl. Phys., 査読有, 114, 2013, 183512-1-6

DOI:10.1063/1.4829912

K. Sudoh, J. Nakamura, M. Naito, K. Higuchi, K. Maenaka, Formation of Silicon-on-Nothing Structures with Extremely Flat Surfaces, Jpn. J. Appl. Phys., 査読有, 52, 2013, 075601-1-4  
DOI:10.7567/JJAP.52.075601

〔学会発表〕(計4件)

須藤孝一、蛭田玲子、栗林均、Si(001)表面における高アスペクト比ホールの高温アニールによる空洞形成、応用物理学会、2013.9.18、同志社大学

須藤孝一、榊原昇一、表面拡散による形態変化を利用した超平坦シリコン・メンブレンの形成、日本機械学会、2013.9.9、岡山大学

K. Sudoh, R. Hiruta, H. Kuribayashi, Evolution of Hole Patterns by Surface Diffusion on Si(001), 2011 MRS Fall Meeting, 2011.11.29, Boston, Massachusetts, USA.

K. Sudoh, R. Hiruta, H. Kuribayashi, R. Shimizu, Aspect Ratio Dependence in Evolution of Hole Arrays by Surface Diffusion on Si(001), 2010 MRS Fall Meeting, 2010.11.29, Boston, Massachusetts, USA.

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

須藤 孝一 (SUDOH, Koichi)  
大阪大学・産業科学研究所・准教授  
研究者番号：90314426

### (2) 研究分担者

内藤 宗幸 (NAITO, Muneyuki)  
甲南大学・理工学部・准教授  
研究者番号：10397721