

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 5 月 21 日現在

機関番号：12102

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2010～2014

課題番号：22360015

研究課題名(和文)結晶表面の原子ステップの位置・構造制御と原子・分子修飾

研究課題名(英文)Position- and structure-Control of Atomic Steps on Crystal Surfaces and Its Atom/Molecule Modification

研究代表者

山部 紀久夫(YAMABE, Kikuo)

筑波大学・数理物質系・教授

研究者番号：10272171

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 14,500,000円

研究成果の概要(和文)：ナノスケールの電子デバイスでは、原子レベルまで微細な構造を制御する技術が求められる。同時に、種々の不具合の原因を解明したりその抑制技術を開発したりするために、原子レベルの精度で制御された構造を用いて、より感度高く現象を把握することは重要である。

本研究では、主に(111)面方位の単結晶シリコンを低溶存酸素純水に浸漬して、原子ステップと幅広い原子的に平坦な原子テラスを形成した。さらに、ナノテクノロジーとして原子ステップの位置制御性を検討した。また、原子テラスの究極の平坦面を利用して、その表面に熱酸化法によって形成されるシリコン酸化膜の原子レベルの膜厚均一性などに伴う現象を明らかにした。

研究成果の概要(英文)：Nano-scale electronic devices demand technologies which control fine structures at atomic level. At the same time, In order to clarify origins of various kinds of faults or develop their suppression technologies, it is important to more precisely understand the phenomena using well-defined atomically-controlled structures.

In this study, the well-defined structures with the atomic steps and atomically-flat terraces were formed by immersing the (111)-oriented, Si mono-crystal wafers in the ultralow-dissolved oxygen water. Controllability of the atomic step lines was studied as a kind of nanotechnology. In addition, correlating to reliability, two-dimensional distribution of the thermally grown SiO₂ film thickness was investigated using the atomic terraces with ultimate flatness.

研究分野：半導体デバイスプロセス技術

キーワード：シリコン 単結晶 原子ステップ 原子テラス 平坦性 ラフネス 均一性

1. 研究開始当初の背景

(1) 単結晶シリコン表面を超低溶存酸素水 (LOW: ultra-Low dissolved Oxygen Water) 中に浸漬することによって、幅の広い原子テラスと原子ステップからなる、いわゆる原子的によく定義された Si 表面を簡単に形成できる技術を有している。一方、(2) 極限的なナノテクノロジーは原子配列を制御することである。(3) ナノテクノロジーを実現するためには原子レベルで評価された現象に基づくナノサイエンスが必要である。(4) ナノ構造による高いセンシング機能と集積回路の高い信号処理能力を融合させるには、シリコン基板あるいは絶縁膜表面に、ナノ構造を形成できることが必要となる。

2. 研究の目的

原子ステップの形状や位置制御は、サイエンスからテクノロジーへの橋渡しとして必須であり、これがなければ、ナノワイヤなども単なる探索にしか過ぎない。

ナノテクノロジーへの一貫として、結晶表面の原子ステップテラス構造の形状と位置を制御したり、原子ステップへの原子修飾によるナノワイヤを形成したりすることは、ナノ構造制御のもっとも基本的な技術である。

本研究では、Si の結晶表面に、産業化に適したウェット処理を中心として、上記構造制御を行うための基礎技術を構築し、同時に原子ステップを原子修飾により、ナノワイヤを形成する。また、原子的に平坦な原子テラス面を用い、熱酸化 SiO₂ 膜の不均一な劣化の原因を明らかにすることでナノサイエンスの手掛かりを提示する。

3. 研究の方法

Si(111)面の LOW への浸漬により原子ステップ/原子テラスからなる原子的によく制御された表面を形成する。

(1) 原子ステップの位置制御法の調査

AFM カンチレバーを用いた Si 表面へのナノインデンテーションにより原子ステップの発生を促し、原子ステップの位置制御法の可能性を調査する。

(2) クォーツを用いた SiO₂ 原子ステップの制御の検討

SiO₂ 単結晶としてのクォーツを用いて、Si と同様に原子ステップの制御性を調査する。

(3) 原子的に平坦な Si 表面の酸化をモチーフとした SiO₂ 信頼性のナノサイエンス

Si の原子テラス表面の熱酸化により、形成される SiO₂ 膜の二次元の膜厚不均一性を調査し、極薄 SiO₂ 膜の課題を明らかにし、その解決策を模索する。

(4) 有機分子の SiO₂ 表面の被着位置の制御 有機物質を高精度に測定し、集積回路の高

いデータ処理能力を活かし、種々の次世代電子デバイスの基礎技術を検討する。MOS デバイスをセンサーデバイスとして用いることを想定すると、SiO₂ 表面への有機分子の吸着を制御することが望まれ、本実験では、(2)のクォーツ表面や Si 原子ステップ表面の熱酸化 SiO₂ 膜への吸着箇所の制御性を検討する。

4. 研究成果

(1) 原子的に平坦な Si テラスへのナノインデンテーションによるステップの発生の研究において、インデンテーション後の低溶存酸素水処理によって、三角ピットが発生する。三角ピットの形状等の詳細な観察から、以下のことが明らかとなった。三角ピットの各辺は、Si の <1,1,-2> と等価な 3 つの結晶方位に垂直である。辺の長さの異なる三角ピットが、順次発生するが、発生する三角ピットは、同一の中心を有し、低溶存酸素水への浸漬時間とともに、ステップフローエッチングが進行し、各辺の長さが伸張する。これらの形状変化から、ステップの発生が、インデンテーションによるものであることが明らかである。つぎに、浸漬時間に対するステップフローエッチング距離との関係から、ステップフローエッチング速度が 2 段階で進行することが明らかとなった。つまり、浸漬時間が 1 時間程度までは、比較的高速にエッチングされ、1 時間以降は減速されるが一定の速度を有する。初期のステップ長が短い領域で早くなっていることから、インデンテーション固有の機構が作用している。つまり、インデンテーションによる凹みや盛り上がり等の極微細な形状変化およびその周辺の結晶表面近傍の損傷がステップフローを促進していると考えられる。一方、後半の領域の主要因として、上記の溶液中の酸素ラジカルと、三角ピットコーナーのキンクの 2 通りが挙げられる。インデンテーション時のプローブにかかる負荷と三角ピットのステップ数が比例関係にあることが明らかとなり、低負荷インデンテーションによるわずかな歪の導入が原子 1 層分の原子ステップを可能にすると期待されるが、単一ステップに留めるには至っていない。

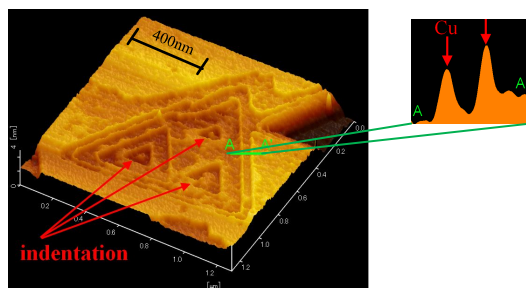


図 1 Si 表面に AFM 像。ナノインデンテーションによる三角ピット形成とステップ端への Cu ナノワイヤ形成。

工学的には、直線的な原子ステップを所定の位置に形成する一つの方法である。また、学術的には、インデンテーションでは、従来、微小押し込み領域で、弾性変形が数 $10\mu\text{N}$ で観測されたことが報告されているが、本実験では、数 μN でも十分に、インデンテーションの履歴が観測され、弾性変形に留まらず、シリコン単結晶に対して塑性変形をもたらしていることが明らかとなった。つまり、塑性変形のしきい値応力は極めて低いことを物語っている。

図 1 は、3カ所にナノインデンテーションした Si 表面の LOW 処理後の AFM 像である。3カ所の三角ピットが合体し、大きな三角になっている。それぞれの原子ステップが Cu ナノワイヤにより修飾されている。

(2) 酸化物単結晶の代表として、y-cut クォーツ面を用いたところ、シリコン同様に、ステップ/テラス構造を作成することに成功した。形成されたテラス表面は、極めて安定であり、シリコンに比較して外乱に対して強いことがわかった。また、原子ステップ直線性も得られ、ステップ端への外乱によるキック発生に対する耐性も、シリコンに比較して、十分高いことが明らかとなった。クォーツは、耐薬品性が強いので、シリコンの SiO_2 フェンスのような機能を発揮させることが困難である。

(3)- 原子的平坦な、水素終端された Si(111) 表面における自然酸化膜成長形態を、AFM、FTIR を用いて評価した。酸化前の Si 表面テラスは原子的に平坦であることが確認されている。自然酸化が始まると、酸化に伴う堆積膨張により酸化箇所が確認できる。評価の結果、以下のことが明らかになった。自然酸化は原子ステップの上端からのステップフロー酸化とテラス上における核形成から始まる 2 次元島成長を基本とし、いずれも layer-by-layer 成長をなることが明らかとなった。AFM 画像の詳細な評価から、Si バックボンドへの酸素の挿入という観点において、2 段階の酸化過程を踏むことがあきらかになった。さらに、FTIR による評価から、大気中湿度が上昇するにつれて自然酸化速度が大きくなることが明らかとなった。溶存酸素を極力排除した純水中では酸化が進行しないことから、自然酸化には酸素と水の両方が必要であることが示唆された。

(3)- Si 表面を熱酸化して得られる極薄ゲート絶縁膜は、Si 集積回路のゲート絶縁膜としてだけでなく、極めて制御された絶縁膜として、絶縁特性の劣化機構や諸原因を学術的に明らかにするのに極めて有効であり、精度が高く原子論的な議論をするための貴重な実験データを得ることができる。特に、原子的に平坦な Si テラス表面は、熱酸化の二次元的な不均一性の発生原因を明らかにするの

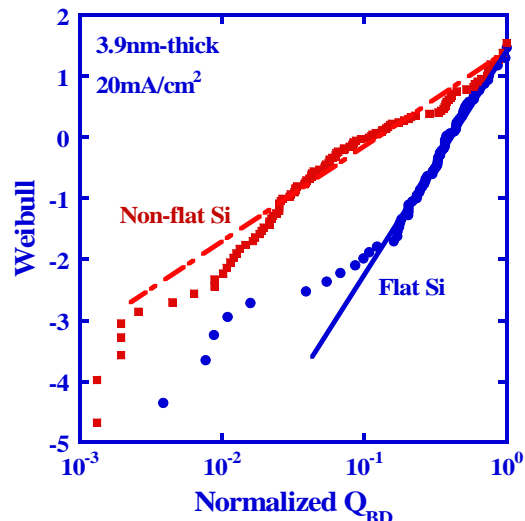


図 2 鏡面 Si 表面と原子的平坦化された Si 表面に形成された厚さ 3.9nm の熱酸化

に有効である。当該年度では、原子的平坦な Si 表面での熱酸化の成長を、同一領域をスナップショット的に変化を追跡した結果を議論し論文化した。中で、 SiO_2 表面の突起は、極初期に発生することを示している。熱酸化直前には、表面保護のため、自然酸化膜が形成されている。これまで SREM(Scanning reflection electron microscopy) 観察などの平均情報に基づき、原子層毎酸化とされてきたが、数%オーダーでは多原子層酸化が進行していることもわかっている。発生した突起は、同じ位置で成長し続け、高さが増していくことが明らかとなった。一方、 SiO_2 表面のラフネスを AFM 観察した後、熱酸化膜を剥離し、Si/SiO₂ 界面の同一領域を観察し、表面・界面を見比べると、表面の突起は界面の凹み、あるいは表面の凹みは界面の突起と互いの位置が対応している箇所が多くみられ、局所的な膜厚の不均一が起こっていることが直接観察された。膜厚不均一は、約 10nm 以下の領域で膜厚の減少とともに、より顕著になることが判明した。同様の膜厚領域の熱酸化 SiO_2 膜の TDDB(経時絶縁破壊寿命)のワイブル分布の傾きが膜厚と共に減少することと対応することが明らかとなった。このような現象に対して、ストレス印加中に発生する膜中の欠陥がランダムに発生し、それらが確率的に重なった箇所では絶縁破壊とするパーコレーションモデルが提唱されているが、実際には、むしろ膜厚の不均一さが主たる要因であることが実証された。

図 2 は、LOW 処理により原子的平坦化された Si 表面と購入鏡面 Si 表面に形成されたそれぞれの熱酸化 SiO_2 の TDDB ワイブルプロットを示したもので、酸化前の Si の原子的平坦化が、膜厚不均一を抑制したことによる。

(4) SiO₂ 表面の特定箇所への有機分子の吸着を試みたが、成功しなかった。応用の可能性として以下を試み、結果を得た。Si(100)基板上に形成した熱酸化膜への有機分子吸着を電氣的にとらえる試みを行った。扱った有機分子は biotin および avidin である。まず酸化膜表面に biotin 分子を固着させた。次に電気化学セル内にて biotin/SiO₂ のみを生理食塩水に浸漬する。Si 基板裏面に Al 電極、生理食塩水に Pt 対向電極用意し、系全体の容量を測定する。その後、生理食塩水に avidin を添加する。avidin は biotin と非常に強い親和性を示すため、時間経過とともに酸化膜表面に固着した biotin と結合していく。容量観察の結果、avidin 添加のおよそ 30 分後から容量の変化が現れ、avidin の吸着を反映しているものと考えられる。MOS キャパシタの、有機分子センサーとしての応用が期待される。今後は対象分子の濃度依存性を明らかにし、感度を向上させること、対象範囲の拡張、多様化などが課題である。

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 12 件)

(1) 山部紀久夫、蓮沼隆、「極薄シリコン酸化膜における原子レベルの膜厚均一性と信頼性」, J. Vac. Soc. Jpn., **58**, 27 (2015), 査読有.

(2) Yoshiro Kabe, Ryu Hasunuma, and Kikuo Yamabe, 'Oxidation characteristics of silicon exposed to O(1D2) and O(3P2) radicals and stress-relaxation oxidation model for O(1D2) radicals', Japanese Journal of Applied Physics **53**, 031501 (2014), 査読有.

(3) Soshi Sato, Yuki Hiroi, Kikuo Yamabe, Makoto Kitabatake, Tetsuo Endoh, and Masaaki Niwa, "Multiple breakdown model of carpet-bombing-like concaves formed during dielectric breakdown of silicon carbide metal-oxide-semiconductor capacitors", Japanese Journal of Applied Physics **53**, 08LA01 (2014), 査読有.

(4) Ryu Hasunuma, Yusuke Hayashi, Masahiro Ota, and Kikuo Yamabe, 'Microscopic Thickness Uniformity and Time-Dependent Dielectric Breakdown Lifetime Dispersion of Thermally Grown Ultrathin SiO₂ Film on Atomically Flat Si Surface', Japanese Journal of Applied Physics **52** (2013) 031301, 査読有.

(5) Ryu Hasunuma, Shun Kudo, Katsuya Kamata, and Kikuo Yamabe, 'Nano-indentation Damage near Silicon Surface Embossed by Immersion in Ultralow-

Dissolved-Oxygen Water', ECS Journal of Solid State Science and Technology, **2** (5), 225 (2013), 査読有.

(6) Ryu Hasunuma and Kikuo Yamabe, 'Evaluation of Kink Generation Rate and Step Flow Velocity on Si(111) during Wet Etching', Japanese Journal of Applied Physics, **52**, 110127 (2013), 査読有.

(7) Masafumi Kubota, Shigenori Hayashi, Mototsugu Ogura, Yuichiro Sasaki, Susumu Okada, and Kikuo Yamabe, 'Effects of Plasma Irradiation in Arsenic Plasma Doping Using Overhang Test Structures' Japanese Journal of Applied Physics **52**, 021301 (2013), 査読有.

(8) Yoshiro Kabe, Ryu Hasunuma, and Kikuo Yamabe, 'Oxidation of Silicon Utilizing a Microwave Plasma System: Electric-Stress Hardening of SiO₂ Films by Controlling the Surface and Interface Roughness', Japanese Journal of Applied Physics., **51**, 041104 (2012), 査読有.

(9) M. Sometani, R. Hasunuma, M. Ogino, H. Kuribayashi, Y. Sugahara, A. Uedono, and K. Yamabe; 'Variation of Chemical Vapor Deposited SiO₂ Density Due to Generation and Shrinkage of Open Space During Thermal Annealing', Japanese Journal of Applied Physics. **51**, 021101 (2012), 査読有.

(10) Yuusuke Hayashi, Ryu Hasunuma and Kikuo Yamabe; "Generation and Growth of Atomic-scale Roughness at Surface and Interface of Silicon Dioxide Thermally Grown on Atomically Flat Si Surface", Key Engineering Materials **470**, 110 (2011), 査読有.

(11) Tokuda N, Umezawa H, Yamabe K, Okushi H, Yamasaki S; "Growth of atomically step-free surface on diamond {111} mesas", DIAMOND AND RELATED MATERIALS, **19**, 288 (2010), 査読有.

(12) 杉井俊介, 蓮沼隆, 山部紀久夫; 「quartz 表面における原子ステップ/テラス構造の形成」, 表面科学, 1P21 (2010), 査読有.

〔学会発表〕(計 48 件)

(1) 林 真理子, 蓮沼隆, 山部紀久夫, 「SiC 熱酸化膜の深さ方向密度分布」, 第 20 回ゲートスタック研究会, p.157, 2015 1/26-31, 東レ総合研修センター(静岡県三島市).

(2) Masahito Nagoshi, Mariko Hayashi, R. Hasunuma, and K. Yamabe, 「SiC 熱酸化膜の密度緩和」, 先進パワー半導体分科会チュートリアルおよび第 1 回講演会, 2014 11/19-20, ウィンクあいち(愛知県名古屋市).

(3) Yusuke Tomura, Ryu Hasunuma, Kikuo Yamabe and Shinji Migita, "TDDB characteristics of thin polycrystalline and amorphous HfO₂ films", IIRW, OP07 (2014), アメ

リカ(サンフランシスコ).

(4)戸村有佑、蓮沼隆、山部紀久夫、"Extraction of leakage current through grain boundary in MOS capacitor with ultrathin polycrystalline HfO₂ films", 第19回ゲートスタック研究会, p.167, 2014年1月23日~25日, ニューウェルシティ湯河原(神奈川県湯河原町).

(5)滝ヶ浦佑介、蓮沼隆、山部紀久夫、「高温下でのSiO₂膜の劣化評価」, 第19回ゲートスタック研究会, p.171, 2014年1月23日~25日, 湯河原(神奈川県湯河原町).

(6)土井修平、蓮沼隆、山部紀久夫、「シリコン表面の酸化膜密度分布」, 第19回ゲートスタック研究会, p.85, 2014年1月23日~25日, ニューウェルシティ湯河原(神奈川県湯河原町).

(7)戸村有佑、蓮沼隆、山部紀久夫、右田真司、「多結晶HfO₂膜における絶縁破壊箇所の同定」, 第75回応用物理学会秋季学術講演会, 2014年9月17日~20日, (北海道札幌市).

(8)林真理子、蓮沼隆、山部紀久夫、「SiC熱酸化膜の深さ方向密度分布」, 第75回応用物理学会秋季学術講演会 19a-PB5-10, 2014年9月17日~20日, (北海道札幌市).

(9)前田貴太、蓮沼隆、山部紀久夫、「SiC上に堆積したTEOS-SiO₂膜の電気的特性」, 第75回応用物理学会秋季学術講演会 19a-PB5-8, 2014年9月17日~20日, (北海道札幌市).

(10)戸村有佑、蓮沼隆、山部紀久夫、右田真司、「極薄アモルファス及び多結晶HfO₂膜の信頼性評価」, 第61回応用物学会春季学術講演会, 19a-PG2-4, 2014年3月17日~20日, 青山学院大学、(神奈川県相模原市).

(11)土井修平、林真理子、蓮沼隆、山部紀久夫、「シリコン表面の酸化膜密度分布」, 第61回応用物学会春季学術講演会, 19a-PG2-3, 2014年3月17日~20日, 青山学院大学、(神奈川県相模原市).

(12)Ryu Hasunuma and Kikuo Yamabe, "Microscopic Thickness Uniformity and Dielectric Breakdown Lifetime of Ultrathin SiO₂ Films Thermally Grown on Si(111)", 12th International Conference on Atomically Controlled Surfaces, Interfaces and Nanostructures (2013 Nov.4-8), つくば国際会議場、(茨城県つくば市).

(13)Ryu Hasunuma and Kikuo Yamabe, "Nanoindentation and Step Control on Si(111) Surfaces", 12th International Conference on Atomically Controlled Surfaces, Interfaces and Nanostructures (2013 Nov.4-8), つくば国際会議場、(茨城県つくば市).

(14)Syuhei Doi, Ryu Hasunuma, Kikuo Yamabe, "Morphological Analysis on Native Oxidation of Si(111) Surface", 12th International Conference on Atomically Controlled Surfaces, Interfaces and Nanostructures (2013 Nov.4-8), つくば国際会議場、(茨城県つくば市).

(15)Ryu Hasunuma and Kikuo Yamabe, "Si

Emission to Atmosphere during Thermal Oxidation of Si Substrates", 2013 International Workshop on DIELECTRIC THIN FILMS FOR FUTURE ELECTRON DEVICES (2013 Nov.7-9), つくば国際会議場、(茨城県つくば市).

(16)Ryu Hasunuma, Mariko Hayashi and Kikuo Yamabe, "Density Profile of SiO₂ Film and Its Relation with TDDB Lifetime", ICSCRM 2013, (2013 Sept.29-Oct.4), フェニックス・シーガイア・リゾート、(宮崎県宮崎市).

(17)土井修平、蓮沼隆、山部紀久夫、「Si(111)表面の自然酸化形態」, 第18回ゲートスタック研究会, 2013年1月25日~27日, ニューウェルシティ湯河原(神奈川県湯河原町).

(18)T.Nagasawa, R.Hasunuma, K.Yamabe, 「熱酸化における大気中へのシリコン放出」, 第18回ゲートスタック研究会, 2013年1月25日~27日, ニューウェルシティ湯河原(神奈川県湯河原町).

(19)戸村有佑、蓮沼隆、山部紀久夫、右田真司、「微小電極面積を有する極薄多結晶HfO₂膜の電気的特性」, 第74回応用物理学会秋季学術講演会, 2013年9月16日~9月19日, 同志社大学、(京都府京田辺市).

(20)滝ヶ浦佑介、蓮沼隆、山部紀久夫、「ストレスによりSiO₂膜中に生じた欠陥の回復」, 第74回応用物理学会秋季学術講演会, 2013年9月16日~9月19日, 同志社大学、(京都府京田辺市).

(21)土井修平、蓮沼隆、山部紀久夫、「シリコン表面の酸化膜密度とエッチングレートの相関性評価」, 第74回応用物理学会秋季学術講演会, 2013年9月16日~9月19日, 同志社大学、(京都府京田辺市).

(22)深澤辰哉、小杉亮治、石田夕起、蓮沼隆、山部紀久夫、「熱酸化に伴うSiO₂/4H-SiC(0001)表面および界面ラフネス増加」, 第17回ゲートスタック研究会, 2012年1月20日~21日, 東レ研修センター(静岡県三島市).

(23)滝ヶ浦佑介、蓮沼隆、山部紀久夫、「高温下でのSiO₂膜の劣化評価」, 第73回応用物理学会学術講演会, 2012年9月11日~14日, 松山大学、(愛媛県松山市).

(24)土井修平、蓮沼隆、山部紀久夫、「Si(111)表面の自然酸化形態に関する考察」, 第73回応用物理学会学術講演会, 2012年9月11日~14日, (愛媛県松山市).

(25)長澤達彦、蓮沼隆、山部紀久夫、「熱酸化における大気中へのシリコン放出」, 第73回応用物理学会学術講演会, 2012年9月11日~14日, 松山大学、(愛媛県松山市).

(26)深澤辰哉、蓮沼隆、山部紀久夫、「TEOS-CVD SiO₂/熱酸化SiO₂/Si MOSキャパシタにおける界面特性の熱処理効果」, 第73回応用物理学会学術講演会, 2012年9月11日~14日, 松山大学、(愛媛県松山市).

(27)門馬久典、宮本雄太、蓮沼隆、山部紀久夫、「HfO₂膜の結晶化による電気的

特性変化」第 73 回 応用物理学会学術講演会,2012 年 9 月 11 日~14 日,松山大学、(愛媛県松山市).

(28)土井修平、蓮沼隆、山部紀久夫、「Si(111)表面の自然酸化形態」第 32 回表面科学学術講演会,2012 年 11 月 20 日~22 日,東北大学、(宮城県仙台市).

(29)蓮沼隆、深澤辰哉、山部紀久夫、「NF₃添加酸化による SiC 基板起因容量-電圧特性劣化の低減」2012 年第 21 回 SiC 講演会,2012 年 11 月 19 日,大阪市中央公会堂、(大阪府大阪市).

(30)林 優介、染谷満、蓮沼隆、山部紀久夫、「極薄 SiO₂ 膜のラフネスが MOS の信頼性へ与える影響」第 16 回ゲートスタック研究会,2011 年 21 日~23 日,東京工業大学大岡山キャンパス、(東京都).

(31)染谷満、田村知大、蓮沼隆、山部紀久夫、「高温下での定電流ストレスに対する SiO₂ の信頼性」第 16 回ゲートスタック研究会,2011 年 21 日~23 日,東京工業大学大岡山キャンパス、(東京都).

(32) Mitsuru Sometani, Ryu Hasunuma, Masaaki Ogino, Hitoshi Kuribayashi, Yoshiyuki Sugahara, Akira Uedono, Kikuo Yamabe; "Effects of Thermal Annealing on Modification of CVD SiO₂ Network and Removal of Residual Impurities", 2011 International Workshop on Dielectric Thin Films for Future Electron Devices: Science and Technology(IWDTF-11), (2011) p.53-54, 東京工業大学大岡山キャンパス、(東京都).

(33)工藤 駿、鎌田勝也、蓮沼隆、山部紀久夫、「ナノインデンテーション法を用いた Si(111)表面の原子ステップ制御」アトミック/ポリスケールテクノロジー連携研究会,2011 年 9 月 4 日~6 日,東京理科大長万部キャンパス、(北海道長万部市).

(34)太田雅浩、林優介、蓮沼隆、山部紀久夫、「低温化による極薄シリコン熱酸化膜表面および界面のラフネス成長」アトミック/ポリスケールテクノロジー連携研究会,2011 年 9 月 4 日~6 日,東京理科大長万部キャンパス、(北海道長万部市).

(35)工藤 駿、蓮沼隆、山部紀久夫、「ナノインデンテーション法を用いた Si(111)表面の原子ステップ制御」第 72 回応用物理学会学術講演会,2011 年 8 月 29 日~9 月 2 日,山形大学、(山形県山形市).

(36)太田雅浩、蓮沼隆、山部紀久夫、「極薄シリコン熱酸化膜の膜厚均一性と表面・界面形状相関」第 72 回応用物理学会学術講演会,2011 年 8 月 29 日~9 月 2 日,山形大学、(山形県山形市).

(37)山下貴之、蓮沼隆、山部紀久夫、「高温下ストレス印加後の SiO₂ 膜中捕獲電荷」第 72 回応用物理学会学術講演会,2011 年 8 月 29 日~9 月 2 日,山形大学、(山形県山形市).

(38)太田雅浩、林優介、蓮沼隆、山部紀久夫、「低温熱酸化における極薄シリコン酸

化膜表面の凹凸成長」第 58 回応用物理学会関係連合講演会,2011 年 3 月 24 日~27 日,神奈川工科大学、(神奈川県厚木市).

(39)工藤 駿、蓮沼隆、山部紀久夫、「ナノインデンテーション法を用いた Si(111)表面の原子ステップ制御」第 58 回応用物理学会関係連合講演会,2011 年 3 月 24 日~27 日,神奈川工科大学、(神奈川県厚木市).

(40)Shun Kudo, Ryu Hasunuma and Kikuo Yamabe; "Silicon Atomistic Steps Formation in Predetermined Positions by Combination between Ultralight- Indentation and Immersion in Ultralow Dissolved-Oxygen Water", The 6th International Symposium on Surface Science,船堀タワーホール、(東京都).

(41)R. Hasunuma, T. Fukasawa, R. Kosugi, Y. Ishida, and K. Yamabe; "Two-dimensional Roughness Growth at Surface and Interface of SiO₂ Films during Thermal Oxidation of 4H-SiC(0001)", ICSCRM 2011, アメリカ.

(42)山部紀久夫、「ナノ半導体材料デバイスの信頼性と特性ゆらぎに関する研究」共同プロジェクト研究発表会 2010 年 12 月 1 日,東北大学、(宮城県仙台市).

(43)染谷満、蓮沼隆、山部紀久夫、「定電流ストレス印加による SiO₂ の高温劣化特性」第 19 回 SiC 及び関連ワイドギャップ半導体研究会,2010 年 10 月 21~22 日,つくば国際会議場、(茨城県つくば市).

(44)染谷満、蓮沼隆、荻野正明、栗林均、須ヶ原紀之、山部紀久夫、「定電流ストレス印加における SiO₂ の高温劣化特性」第 71 回応用物理学会学術講演会,2010 年 9 月 14 日~17 日,長崎大学、(長崎県長崎市).

(45)工藤 駿、杉井俊介、蓮沼隆、山部紀久夫、「単結晶シリコン表面の原子ステップ制御」アトミック/ポリスケールテクノロジー連携研究会,2010 年 8 月 26 日~28 日,長万部.

(46)杉井俊介、蓮沼隆、山部紀久夫、「quartz 表面上の自己組織化による低次元ナノ構造形成」アトミック/ポリスケールテクノロジー連携研究会,2010 年 8 月 26 日~28 日,東京理科大長万部キャンパス、(北海道長万部市).

(47)染谷満、蓮沼隆、上殿明良、山部紀久夫、「熱処理による CVD-SiO₂ 膜の改質過程」アトミック/ポリスケールテクノロジー連携研究会,2010 年 8 月 26 日~28 日,東京理科大長万部キャンパス、(北海道長万部市).

6. 研究組織

(1)研究代表者

山部紀久夫 (Yamabe Kikuo)
筑波大学・数理物質系・教授
研究者番号：10272171

(2)研究分担者

蓮沼隆 (Hasunuma Ryu)
筑波大学・数理物質系・准教授
研究者番号：90372341