

令和 5 年 5 月 26 日現在

機関番号：14603
研究種目：基盤研究(B) (一般)
研究期間：2020～2022
課題番号：20H02483
研究課題名(和文)欠陥サイト選択反応を駆使した三次元ナノデバイス側壁面の原子平坦仕上げ加工法の開発

研究課題名(英文) Development of finishing methods for creation of atomically flat side-surfaces of three-dimensional nano-devices utilizing defect-site selective reactions

研究代表者
服部 賢 (HATTORI, Ken)
奈良先端科学技術大学院大学・先端科学技術研究科・准教授

研究者番号：00222216
交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 14,100,000円

研究成果の概要(和文)：原子精度で平坦なファセット表面(基板面から傾いた表面)をもつマイクロスケールの立体形状のシリコン試料を、シリコン基板をリソグラフィー法で切削加工、更に真空加熱することにより作製しました。原子平坦にする工夫の1つは、リソグラフィーの最終工程であるエッチング処理での溶液の選択で、表面の荒れを軽減することのできる特定の欠陥サイトからのエッチング反応を進行させました。もう1つの工夫は、表面原子拡散により表面凹凸を整える真空加熱の条件最適化で、通常の加熱温度よりも150～200 ほど低温が、原子平坦表面の仕上げと立体形状維持に良いことが分かりました。

研究成果の学術的意義や社会的意義

立体形状をもつシリコン・デバイスの精緻な形状制御は、医療用マイクロ流路や加速度センサー等のMEMSデバイス、高密度立体トランジスタなどの最新の立体半導体デバイスなど、多くのテクノロジーを支える基盤技術の1つです。立体形状シリコンの表面は原子精度で平坦とは言えず、最先端のデバイスにおいてはパフォーマンスの劣化を招いていました。本研究の成果は、原子平坦な立体形状シリコンを創り出す技術に直結しており、デバイス・パフォーマンスの向上に寄与するものです。

研究成果の概要(英文)：Micro-scale three-dimensional silicon samples with atomically flat faceted surfaces (surfaces tilted from the substrate surface) were fabricated from a silicon substrate by lithography and then heating it in a vacuum.

One of the innovations for the atomically flattening is the selection of the solution in the etching process as the final step of the lithography; we promote the etching reaction from specific defect sites that can reduce the roughness of the surface. Another idea is to optimize the vacuum heating conditions to flatten the surface roughness by surface atom diffusion; we found that a temperature lower than a typical heating temperature of 150 to 200 is better for finishing the atomic flat surface and maintaining the three-dimensional shape.

研究分野：表面科学

キーワード：三次元立体形状試料 表面原子平坦化 側壁表面 ファセット表面 ウェットプロセス 走査トンネル顕微鏡 電子回折

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

1. 研究開始当初の背景

シリコンデバイスの中心であるトランジスタ FET のサイズは 10 nm 台に突入し、構造は二次元平面型から三次元立体型へ、高密度化へと進化してきた。IRDS ロードマップでは、2030 年代には FET が積層した超高密度三次元ナノデバイスの実用化が予定されている。現在の問題点はデバイスを囲う側壁面(ファセット面)の凹凸が 2~3 nm と大きく、輸送チャンネル断面積の 20~30% が結晶の乱れた領域であるため、移動度の低下など多くの性能劣化を引き起こすことである。これを解決するには、側壁面の凹凸を原子平坦面である 0.1 nm 台 (乱れ領域 1~2% 以下) にする必要がある。即ち、立体形状シリコン試料の側壁面に対する原子平坦仕上げ加工が望まれている。

三次元立体形状シリコン試料作製にはリソグラフィー加工が使用され、およそその目的とする形状まで加工した後の最終工程はウェットエッチング処理である。更にリソグラフィー加工の後、立体形状側壁表面を整えるのに真空加熱処理を行う。従って、立体形状表面の原子平坦仕上げ加工の鍵を握るのは、これらウェットエッチング処理、真空加熱処理である。

エッチング反応は Si の場合、原子論的には溶液の OH-基が Si のバックボンドを切断することで生じ、バックボンドの数が少ない欠陥サイトほど容易に切断し易いため、エッチング反応は表面のステップやキック等の欠陥サイトから進行する(図 1)。このことは欠陥サイトを選択してエッチング反応を制御すれば、表面凹凸を原子平坦まで近づけた反応が出来ることを意味しているが、その基本原理や詳細は不明である。また最終的に表面を整える真空加熱処理も、欠陥サイトからの Si 原子の表面移動が主な過程であるが、立体形状 Si 試料に対して、具体的にどの加熱条件が適切なのかも不明である。

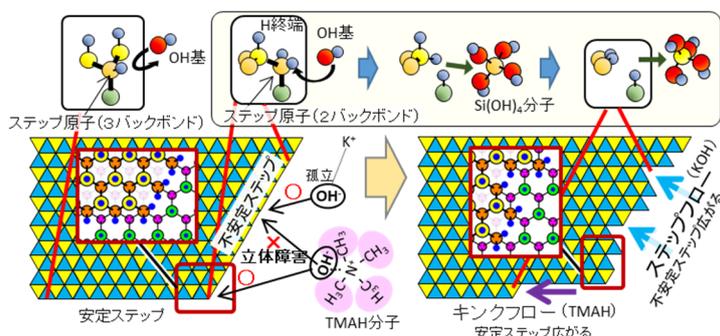


図 1. 原子論的なエッチング反応。

2. 研究の目的

そこで本研究では、欠陥サイトを選択し得るエッチング反応の基本原理を理解し、真空加熱の適切な条件について知見を得ることを目的とした。エッチング反応では、孤立した小さな OH-基と大きな分子に緩く束縛された OH-基とでは、分子の立体障害のため、欠陥サイトの種類で反応性が異なると考え(図 1)、OH-基の様相が異なるエッチング溶液中での差異を調査することとした。また、真空加熱では、Si 原子の表面移動を促す適切なフラッシュ加熱温度が 3 次元立体形状 Si 試料では、通常の 2 次元板状形状 Si 試料よりも、その幾何学的形状に起因して低温化が期待できる。そこでフラッシュ加熱処理後の原子平坦性(表面原子秩序構造)や立体形状を調査することとした。更に、得られた知見を基に、新たな物性探索という展開も目指した。

3. 研究の方法

本研究では、ファセット状の側壁面をもつ三次元ナノデバイスの典型例として、ファセット表面をもつライン状立体形状 Si 試料、およびピラミッド状立体形状 Si 試料を対象とした。それらのウェットエッチング処理、及び真空加熱処理に対するファセット表面の原子平坦性を低速電子回折(LEED)で、更には立体形状の尖鋭性を走査電子顕微鏡(SEM)で調べ、原子平坦なファセット表面かつ鋭い立体形状エッジが得られる条件を精査した。

【試料作製】 本研究では 3 種類の立体形状 Si 試料：(1) Si(110)基板上的 Si{111}ファセット表面をもつライン状立体形状試料、(2) Si(001)基板上的 Si{111}ファセット表面をもつライン状立体形状試料、(3) Si(001)基板上的 Si{111}ファセット表面をもつピラミッド状立体形状試料を準備した(図 2)。試料作製には、エッチング過程における結晶面の安定性を利用した。即ち、Si 結晶では{111}面が最安定であるため、特定形状・特定方向のマスクパターンを設計することにより、最安定{111}表面を出現させた。

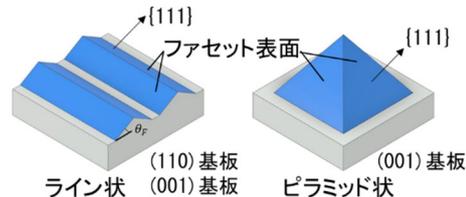


図 2. 作製した立体形状 Si 試料の概略図。

例えば、(1) Si(110)基板上的 Si{111}ファセット表面をもつライン状立体形状試料については、Si(110)基板の上にレジスト塗布後、 $\langle 1\bar{1}0 \rangle$ 方向に細長い矩形のマスクパターンをライン幅 L [μm]、間隔スペース幅 S [μm]でフォトリソグラフィー法を利用して作製し、反応性イオンエッ

チング(RIE)でのドライエッチング、更にウェットエッチングの条件を調整して施すことで、ファセット角 $\theta_F = 35^\circ$ をもつ2つのファセット面(111)及び(11 $\bar{1}$)を作製した(図3)。このファセット面は等価なので{111}面と記す)。同様に(2) Si(001)基板上の{111}ファセット面をもつライン状試料については $\langle 1\bar{1}0 \rangle$ 方向の細長い矩形状のマスクパターンで $\theta_F = 55^\circ$ をもつ2面の{111}、(3) ピラミッド状試料については $\langle 1\bar{1}0 \rangle$ 及び $\langle 110 \rangle$ 方向の正形状のマスクパターンで $\theta_F = 55^\circ$ の4面の{111}を作製した。Si基板としてSb高ドープ($<0.02 \Omega\text{cm}$)の鏡面研磨試料を用い、レジストにはgラインのポジティブ光レジストを用いRIEにはSF₆ガスを圧力4 Pa、流量51 sccm、投入電力60 Wの条件、ウェットエッチングには水酸化カリウムKOH、水酸化テトラメチルアンモニウムTMAH等のエッチャント溶液を用いた。

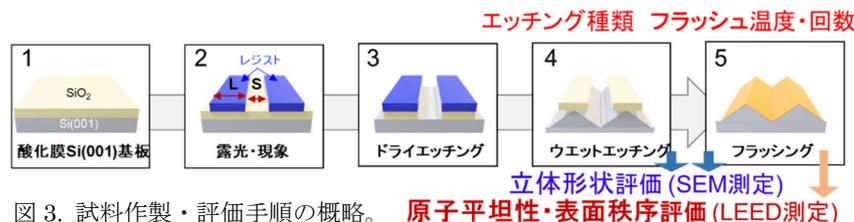


図3. 試料作製・評価手順の概略。 エッチング種類 フラッシュ温度・回数
立体形状評価 (SEM測定) 原子平坦性・表面秩序評価 (LEED測定)

エッチング後の試料を必要に応じて超高真空中において加熱処理を施した。加熱処理には2種類、即ち(1) 低温(約550°C)で長時間(約3時間)加熱し、表面での化学反応による強固な生成物析出を避けながら試料全体からの吸着種の脱離を促す脱ガス処理、(2) 高温(>900°C)で短時間(昇温・降温速度は2°C/s以上、ピーク温度保持は0.2 s以下)加熱し真空を保持した状態で最表面の原子移動を促すフラッシュ処理がある。これらウェットエッチング処理、加熱処理を組み合わせることで立体形状 Si 試料を作製し、LEED 及び SEM 評価結果をフィードバックすることにより、目的とする立体形状へと調整した。

【評価】作製した立体形状 Si 試料について主に2種類の評価を行った。立体試料のファセット表面の原子平坦性を反映する表面原子秩序は LEED で、試料の立体形状、特に隣同士のファセット面が接する稜線の尖鋭性は SEM で評価した(図4)。表面原子が秩序的に配置して明瞭な回折スポットが出現する条件では表面が原子レベルで平坦(凹凸~0.2 nm 以下)であることを保証している。LEED 評価では Si{111}7x7 再構成ファセット表面の代表的な基本スポット強度(電子エネルギー100 eV でのビーム電流で規格化した(1,2)スポット強度)を対象とした。

また SEM 評価では稜線の尖鋭性を、稜線を反映する SEM 像の凹凸のある輝線の直線性からのズレ量(LER) $\sqrt{\frac{1}{L} \int_0^L (Y_{meas}(x) - Y_{fit}(x))^2 dx}$ として評価した。ここでLは輝線距離、Y_{meas}は輝線に沿った距離xに対する実測位置、Y_{fit}は直線近似した際の位置で、LER の値が小さければ直線性は良いことを示している。更に SEM 像から稜線の広がりである稜線幅も評価した。

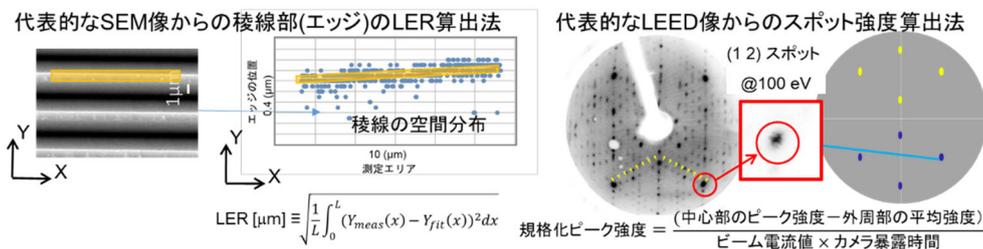


図4. SEM での LER 評価、LEED でのスポット強度評価の概略。

4. 研究成果

【エッチング溶液依存性】立体形状 Si 試料の作製にあたり、結晶面の安定性を利用したエッチング反応の制御は大きな鍵の1つである。SiのエッチングはOH-基によるSi原子のバックボンド切断により生じる。バックボンド3本の表面テラス上のSi原子は耐性があるが、2本のみの表面ステップ上のSi原子からエッチングが進行する。単独のOH-基がSi表面にアタックする場合は、ステップの大部分の箇所から反応を進行させ、結局直線性の乏しいギザギザ形状の不安定ステップ形成が予想できる。一方、大きな分子に緩やかに束縛されたOH-基の場合は、分子の立体障害のため唯一反応が可能なステップの端であるキックサイトからの反応による直線的な安定なステップ形成が予想できる。この予想仮説の確証を得るために、単独OH-基を解離供出するKOH溶液と、束縛OH-基を供出するTMAH溶液での反応性の差異を調べた。

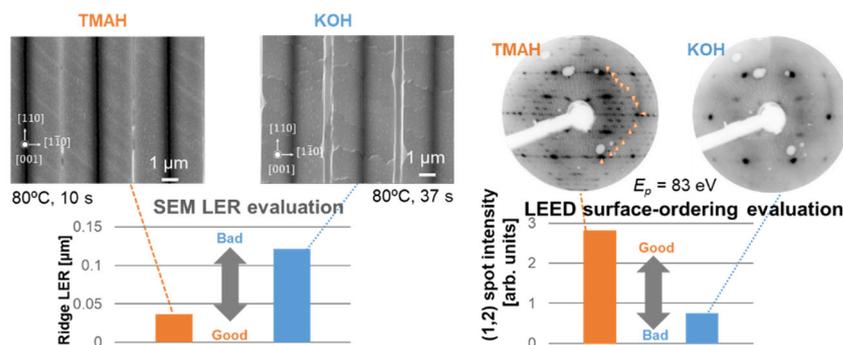


図5. 立体形状 Si{111}/(001)ライン状試料におけるエッチング溶液種(TMAH, KOH)依存性: SEM LER 評価、LEED スポット強度評価。

上図は Si(001)上の{111}ライン状試料(L 2 μm, S 2 μm)のエッチング直後の SEM 結果である。KOH 処理試料と比べて TMAH 処理試料での稜線の直線性、尖鋭性が明らかに良いことが LER 結果からも分かる。更にフラッシュ加熱処理(1050°C, 2 回)後の LEED 結果も TMAH 処理試料が明瞭な回折スポットや強いスポット強度を示していることから、良い表面原子秩序、表面平坦性を示していることが分かる。以上の結果は、束縛 OH-基によるエッチングが直線的な安定なステップ形成を促すことを強く支持しており、TMAH 処理が立体形状、及び立体表面の制御に有用であることを示している。

【フラッシュ加熱依存性】エッチング直後の立体形状試料表面にはエッチャント分子等の吸着種が存在し、かつ多くの場合、原子平坦にするのは難しい。そこで、真空加熱により、吸着種の脱離、表面原子の移動を促し、積極的に平坦化を行う。そこでどのフラッシュ加熱条件からファセット表面の原子平坦性、即ち表面原子秩序性が良くなるのか、その際の立体形状稜線の尖鋭性はどのように変化するかを調べた。

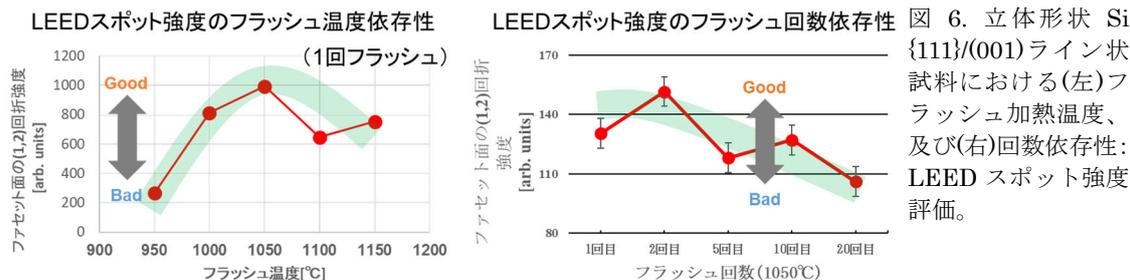


図 6. 立体形状 Si {111}/(001)ライン状試料における(左)フラッシュ加熱温度、及び(右)回数依存性: LEED スポット強度評価。

図 6 左は(エッチング溶液依存性が良かった)TMAH で処理を行った Si(001)上の{111}ライン状試料(L 2 μm, S 2 μm)を 950°C~1150°Cの温度で 1 回フラッシュ加熱した際の LEED 結果を示している。Si{111}7×7 ファセット表面秩序に由来する長周期スポットが出現しており、グラフからおよそ 1050°Cフラッシュでの(1,2)スポット強度は極大になることが分かる。950°Cよりも低い温度では回折スポットは出現しなかった。通常、板状形状 Si 試料では 1200~1250°Cフラッシュで最適化が図られているので、板状形状試料よりも低いフラッシュ温度が立体形状 Si 試料では最適であると言える。次に最適な 1050°Cでのフラッシュ回数依存性を調べた。図 6 右は 1 回~20 回に対する(1,2)スポット強度を表しており、フラッシュ回数とともにスポット強度が減少することが分かる。つまり 1~2 回のフラッシュが最適であると言える。以上の結果は、最低限の表面原子移動を促すフラッシュ操作は、表面原子秩序や原子平坦性の確保に必要であるものの、立体形状試料の場合、初期のフラッシュ操作に留めるべき、必要以上の操作は逆に原子平坦なファセット表面の形成を阻害することを意味している。

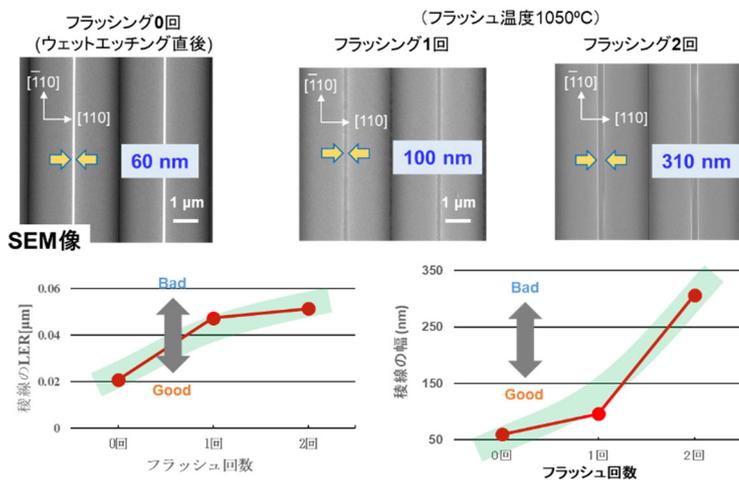


図 7. 立体形状 Si{111}/(001)ライン状試料におけるフラッシュ回数依存性:(上)SEM 像、(左下)SEM LER 評価、(右下)SEM 稜線の幅の評価。

その原因を探るために、立体形状稜線の尖鋭性の変化を調べた。図 7 は 1050°Cのフラッシュ前(0 回)と、1~2 回のフラッシュ後の稜線の LER の値を示している。フラッシュとともに LER 値が増加する、即ち直線性が悪くなることが分かる。更に、稜線の幅を調べたところ、フラッシュとともに稜線幅が増加することが分かった。以上の結果から、必要以上のフラッシュ操作は、立体形状表面のステップエッジが集合した稜線からの多大な表面原子移動を進行させ、そのため稜線が先鋭な直線形状から崩れ広がり、ファセット表面の荒れを誘起すると考察することができる。

【展開】研究の途中で表面原子秩序や原子平坦性、立体形状を制御した Si 試料の興味深い物性が発見されることを見出した。Si(110)上の{111}ライン状試料(L 11 μm, S 5 μm)を同様な手順で、エッチング処理、フラッシュ処理を施し、Si{111}7×7 ファセット表面を作製した。7×7 再構成構造は LEED から判断できるものの、再構成構造に由来する電子状態が形成されているかどうか

かは自明ではない。これは、回折強度は秩序原子数 N の二乗に比例して大きくなるが、電子状態強度は N 自身に比例のまま大きな増大は見込めないことに依る。立体形状表面の電子状態の確認は、立体形状を利用した電子バンド工学への展開において重要な意味をもつ。そこで Si(110) 上の{111}7×7 ライン状試料に対し角度分解光電子分光(ARPES)測定を行った。用いたのは実験室で通常使用される(放射光施設ほどは強力ではない)He 光源であるが、{111}面に特有の明瞭な表面準位バンド分散が得られた。この結果は作製した立体形状試料が、電子デバイスとして十分に機能し得ることを意味している。

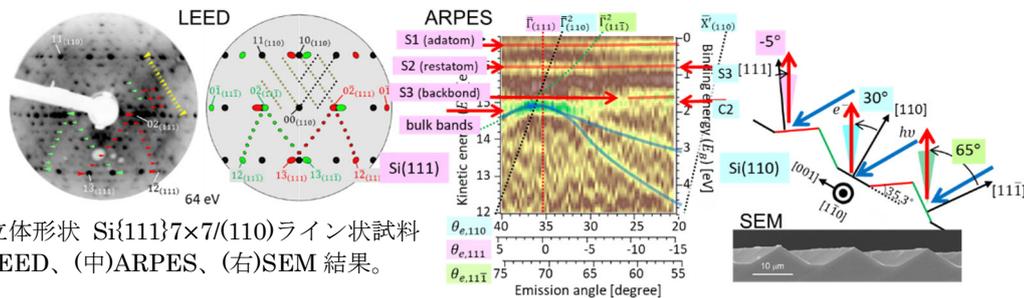


図 8. 立体形状 Si{111}7×7(110)ライン状試料の(左)LEED、(中)ARPES、(右)SEM 結果。

また立体形状の幾何学的なファセット面による特異な磁気安定構造の出現も見出した(図 9)。通常、板状形状のパターン化された磁性薄膜は、安定な磁気渦構造(ループした複数の磁区)を形成する。高密度化のためパターン寸法を小さくすると、磁気渦構造ではなくなり単一磁区が安定構造となるが、これは熱擾乱に弱いため、磁気メモリー等への応用が困難という問題がある。この解決の 1 手法として、磁性薄膜の立体ピラミッド形状化による安定な磁気渦構造の保持というアイデアがある。しかし今まで技術的な問題のため原子レベルで制御された立体磁性ナノ薄膜が作製できていなかった。そこで、制御した Si(001) 上の{111}ピラミッド状試料 (L 16 μm , S 3 μm) に Fe を 30 nm 蒸着し、振動式磁力計(VSM)測定を行ったところ、磁化-磁場(M-H)曲線において、シミュレーションで予想された磁気渦形成に起因する折曲点を見出した。この結果は本研究で開発した技術の応用により、今までできなかった精緻な立体磁性ナノ薄膜の作製が可能になったことを示しており、また立体ピラミッド形状化による高密度な磁気渦メモリー等への展開を目指した立体形状磁性という新たな分野開拓の基礎となるものである。

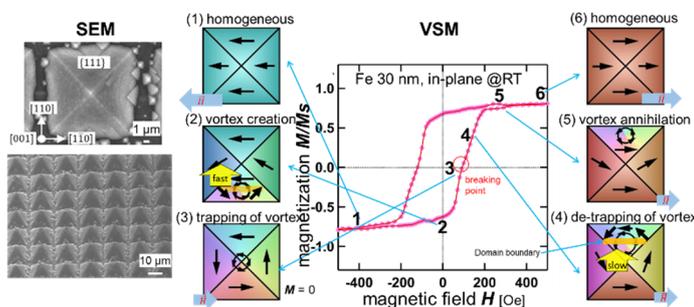


図 9. 立体形状 Fe(30 nm)/Si{111}/(001)ピラミッド状試料の(左)SEM、(右)VSM 結果、及び対応する磁気渦の概略図。

作製した立体試料の直接的な顕微鏡観察は将来展開する基礎研究の基盤となる。原子像観察を可能とする重要な計測器の 1 つが走査トンネル顕微鏡観(STM)である。立体試料の STM 観察においては基板面垂直方向の高低差が大きい、大きなダイナミックレンジをもたせる、探針自身の立体障害効果を軽減されるなど幾つかの工夫が必要となる。それらの工夫を施した STM を準備し、Si(001) 上の{111}7×7 ファセットライン状試料を観察した。図 10 のように STM においても明瞭なファセットライン形状が確認できた。この結果は今後、更なる高分解能でファセット表面の原子像観察という技術的基盤に対応している。

【まとめ】本研究では、立体形状シリコン試料のファセット表面、側壁表面を原子平坦に仕上げるために、その終工程であるウェットエッチング処理、真空加熱処理を精査した。欠陥サイトを選択するエッチング反応の基本原則を理解するために、分子の立体障害を利用した OH-基の導入を行ったところ、より原子平坦に近い立体表面を得ることができた。このことは表面のキックサイトをエッチング反応の始点に選択することで、直線的な安定なステップ形成を延いては凹凸の少ないテラス面を形成するものと理解できる。また、真空フラッシュ加熱では通常の 2 次元板状形状 Si 試料よりも 150~200°Cほど低い温度が最適であることが分かった。このことは最低限の表面原子移動を促すフラッシュは、表面原子秩序や原子平坦性の確保に必要であるが、必要以上の処理は稜線からの多大な表面原子移動を促しファセット表面の荒れを誘起するため好ましくないことを意味している。これらの理解や知見は立体デバイス開発に向けた大きな礎になることが期待できる。また展開研究として、立体形状試料における表面電子状態の確認、立体形状に起因するナノ磁性薄膜の安定な磁気渦の形成、STM 観察のための技術開発を行い、立体形状に関わる将来の研究基盤構築にむけた基礎を成した。

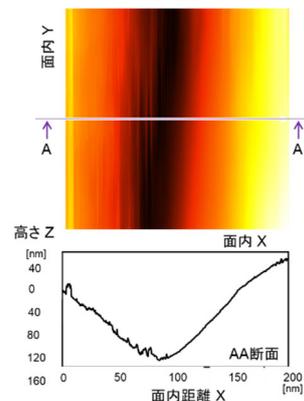


図 10. 立体形状 Si{111}/(001)ライン状試料の STM 結果。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 4件/うち国際共著 2件/うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Hattori Ken, Sakai Yuya, Pamasii Liliiany N., Irmikimov Aydar, Higashi Takaaki, Yang HaoBang, Shi XiaoQian, Guo FangZhun, Osaka Ai I., Tanaka Hidekazu, Iimori Takushi, Komori Fumio, Hattori Azusa N.	4. 巻 20
2. 論文標題 Accessibility of ARPES for Three-dimensionally Architected Si{111}7×7 Facet Surfaces on Micro-patterned Si(110)	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 e-Journal of Surface Science and Nanotechnology	6. 最初と最後の頁 214 ~ 220
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1380/ejssnt.2022-038	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている(また、その予定である)	国際共著 該当する
1. 著者名 Pamasii Liliiany Noviyanty, Nishida Shota, Takemoto Shohei, Hattori Ken	4. 巻 90
2. 論文標題 Growth of Fe Islands on Clean and Ammonia-saturated Si(111)7 × 7 Surfaces Studied by in situ Electron Diffraction	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of the Physical Society of Japan	6. 最初と最後の頁 034601 ~ 034601
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7566/JPSJ.90.034601	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Irmikimov Aydar, Pamasii Liliiany N., Hattori Azusa N., Higashi Takaaki, Takahashi Shunta, Hashamova Emilia E., Shi Xiaoqian, Guo Fangzhun, Hosoito Nobuyoshi, Osaka Ai I., Tanaka Hidekazu, Hattori Ken	4. 巻 21
2. 論文標題 Atomically Architected Silicon Pyramid Single-Crystalline Structure Supporting Epitaxial Material Growth and Characteristic Magnetism	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Crystal Growth & Design	6. 最初と最後の頁 946 ~ 953
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acs.cgd.0c01286	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する
1. 著者名 Nakatsuka Sohei, Imaizumi Taishi, Abukawa Tadashi, Hattori Azusa N., Tanaka Hidekazu, Hattori Ken	4. 巻 19
2. 論文標題 Spatial Analytical Surface Structure Mapping for Three-dimensional Micro-shaped Si by Micro-beam Reflection High-energy Electron Diffraction	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 e-Journal of Surface Science and Nanotechnology	6. 最初と最後の頁 13 ~ 19
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1380/ejssnt.2021.13	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている(また、その予定である)	国際共著 -

〔学会発表〕 計31件（うち招待講演 3件 / うち国際学会 6件）

1. 発表者名 井田有紀, 北川喜宏, 清水智也, 高橋駿太, Paması Lıliany, 服部 梓, 桃野浩樹, 田中秀和, 服部 賢
2. 発表標題 3次元構造表面の逆格子マッピングのための多軸制御RHEEDシステムの開発
3. 学会等名 第8回材料WEEK 「材料シンポジウム」
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 今山 航, 木元康成, 木元康成, 阪井雄也, 東嵩晃, Irmikimov Aydar, 楊浩邦, 服部 梓, 大阪 藍, 田中秀和, 服部 賢
2. 発表標題 原子レベルで平坦な{111}ファセット面をもつ三次元Siライン構造の作製
3. 学会等名 第8回材料WEEK 「材料シンポジウム」
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Ken Hattori, Liliany N. Paması, Aydar Irmikimov, Takaaki Higashi, HaoBang Yang, Yuya Sakai, Tomoya Shimizu, Yuki Ida, Wataru Imayama, Juharnı Juharnı, Ai I. Osaka, Hidekazu Tanaka, XiaoQian Shi, FangZhun Guo, Takuji Iimori, Fumio Komori, Shigemasa Suga, Kiyohisa Tanaka, Shin-ichiro Tanaka, Azusa N. Hattori
2. 発表標題 Photoelectron spectroscopy of artificially designed three-dimensional Si structures with {111} facet surfaces
3. 学会等名 The 22nd International Vacuum congress (IVC-22) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Liliany N. Paması, Juharnı juharnı, Nobuyoshi Hosoiıto, Aydar Irmikimov, Takaaki Higashi, Yuya Sakai, Azusa N. Hattori, Ai I. Osaka, Hidekazu Tanaka, Satoru Yoshimura, Ken Hattori
2. 発表標題 Ferromagnetic properties induced by artificially designed three-dimensional shapes in Fe nanofilm pattern
3. 学会等名 The 22nd International Vacuum congress (IVC-22) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Yuki Ida, Tomoya Shimizu, Yoshihiro Kitagawa, Shunta Takahashi, Liliany N. Pamasi, Azusa N. Hattori, Ai I. Osaka, Hidekazu Tanaka, Hiroki Momono, Ken Hattori
2. 発表標題 Development of multiple-axes controlled RHEED system for reciprocal space mapping of three-dimensional structure surfaces
3. 学会等名 The 22nd International Vacuum congress (IVC-22) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Wataru Imayama, Yuya Sakai, Takaaki Higashi, Aydar Irmikimov, Haobang Yang, Liliany N. Pamasi, Azusa N. Hattori, Ai I. Osaka, Hidekazu Tanaka, Ken Hattori
2. 発表標題 Creation of three-dimensional Si lined structures with atomically flat {111} faceted surfaces
3. 学会等名 The 22nd International Vacuum congress (IVC-22) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Ken Hattori
2. 発表標題 Artificially designed three-dimensional shaped surfaces and films in atomic precision: Creation, structure evaluation, and application of unique properties
3. 学会等名 1st International Conference on Frontier in Sciences (ICFS-2022) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 井田有紀, 北川喜宏, Juharni, 清水智也, 高橋駿太, 大坂藍, 服部梓, 田中秀和, 桃野浩樹, 服部賢
2. 発表標題 RHEEDパターンの表面粗さ依存性
3. 学会等名 日本物理学会2023年春季大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 今山航, 木元康成, Ni'matil Mabarroh, 阪井雄也, 東嵩晃, 服部梓, 大坂藍, 田中秀和, 服部賢
2. 発表標題 サブマイクロサイズの三次元Si{111}ファセットライン構造の表面制御
3. 学会等名 日本物理学会2023年春季大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Ni'matil Mabarroh, Juharni, Yuki Ida, Wataru Imayama, Yasunari Kimoto, Yoshihiro Kitagawa, Liliany N. Pamasi, HaoBang Yang, Yuya Sakai, Tomoya Shimizu, Ai I. Osaka, Hidekazu Tanaka, XiaoQian Shi, FangZhun Guo, Kiyohisa Tanaka, Shigemasa Suga, Shin-ichiro Tanaka, Azusa N. Hattori, Ken Hattori
2. 発表標題 Photoelectron spectroscopy of artificially designed three-dimensional Si facet-line structures with clean {111} facet surfaces
3. 学会等名 日本物理学会2023年春季大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Juharni, Liliany N. Pamasi, Nobuyoshi Hosoito, Ni'matil Mabarro, Azusa N. Hattori, Ai I. OsakaA, Hidekazu TanakaA, Satoru Yoshimura, Ken Hattori
2. 発表標題 Magnetic interaction between three-dimensional pyramids with ferromagnetic nano-film
3. 学会等名 日本物理学会2023年春季大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 服部 梓、服部 賢、阪井 雄也、Haobang Yang、Aydar. Irmikimov、Liliany. N. Pamasi、東 嵩晃、田中 秀和、飯盛拓嗣、小森文夫
2. 発表標題 原子精度で構造制御した立体形状Si試料からの光電子分光
3. 学会等名 第82回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 清水智也、高橋駿太、Liliany.N.Pamasi、服部梓、田中秀和、桃野浩樹、服部 賢
2. 発表標題 立体構造表面の逆空間マップ多軸制御RHEEDシステムの改良
3. 学会等名 日本物理学会2021年秋季大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Liliany N. Pamasi、Aydar Irmikimov、阪井雄也、清水智也、Haobang Yang、服部梓、大坂藍、田中秀和、服部 賢
2. 発表標題 ピラミッド構造ファセット面上の鉄ナノ薄膜の立体形状磁性
3. 学会等名 日本物理学会2021年秋季大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 服部 梓、大坂 藍、田中 秀和、Liliany N. Pamasi、細糸信好、Aydar Irmikimov、東 嵩晃、阪井 雄也、Haobang Yang、服部 賢
2. 発表標題 3次元立体形状Fe薄膜での特異な磁気特性
3. 学会等名 日本材料学会第7回材料WEEK材料シンポジウム
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 阪井雄也、東嵩晃、Irmikimov Aydar、Haobang Yang、今山航、Pamasi L. Noviyanty、服部梓、大坂藍、田中秀和、服部 賢
2. 発表標題 立体Si構造の作製及び立体ファセット表面の原子制御秩序
3. 学会等名 日本材料学会第7回材料WEEK材料シンポジウム
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 服部 賢
2. 発表標題 原子制御した立体構造表面でのものづくりと立体形状が織りなす特性
3. 学会等名 第8回電子デバイスフォーラム京都（招待講演）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 清水 智也、井田 有妃、高橋 駿太、Liliany N. Pamasi、服部 梓、田中 秀和、桃野 浩樹、服部 賢
2. 発表標題 多軸制御RHEEDシステムの構築と Si 立体構造表面 の逆空間マップ評価法の開発
3. 学会等名 2021年日本表面真空学会 学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Liliany N. Pamasi、Irmikimov Aydar、阪井 雄也、清水 智也、Haobang Yang、細糸 信好、服部 梓、大坂 藍、田中 秀和、Ken Hattori
2. 発表標題 Magnetism of epitaxial Fe nanofilms on threedimensionally structuralized Si {111} facet surfaces
3. 学会等名 2021年日本表面真空学会 学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 服部 賢
2. 発表標題 原子平坦立体表面をもつマイクロピラミッドシリコンの創成： 立体表面構造分析と特異物性
3. 学会等名 第101回（令和3年度第2回）産研テクノサロン 表面・界面現象の分析技術（招待講演）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Liliany N Pamasi, Aydar Irmikimov, Yuya Sakai, Tomohiro Shimizua, Haobang Yang, Nobuyoshi Hosoito, Azusa N. Hattori, Ai I. Osaka, Hidekazu Tanaka, and Ken Hattori
2. 発表標題 Modulated three-dimensional ferromagnetic anisotropy of pyramidal shape Fe nanofilms
3. 学会等名 The 25th SANKEN international symposium (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 服部 梓、Liliany N. Pamasi、阪井 雄也、Haobang Yang、細 糸 信好、Irmikimov Aydar、東 嵩晃、大坂 藍、田中 秀和、服部 賢
2. 発表標題 3次元立体表面上の鉄ナノ薄膜での特異な磁気特性
3. 学会等名 第69回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 中塚 聡平、内藤 完、今泉 太志、虻川 匡司、江口 豊明、服部 梓、田中 秀和、服部 賢
2. 発表標題 ナノビームRHEEDによるSi基板上マイクロ構造の局所表面構造解析
3. 学会等名 第81回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 内藤 完、中塚 聡平、小川 修一、虻川 匡司、江口 豊明、服部 賢、服部 梓、黒田 理人
2. 発表標題 Si (551)表面のW-RHEEDとSTMによる構造解析
3. 学会等名 2020年日本表面真空学会学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 高橋 駿太、山本 幸弘、Liliany N. Paması、清水 智也、服部 梓、田中 秀和、桃野 浩樹、服部 賢
2. 発表標題 立体構造における任意方位表面の逆空間マップ評価法の開発：多軸制御RHEEDシステムの構築
3. 学会等名 2020年日本表面真空学会学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 東 高晃、Aydar Irmikimov、Liliany N. Paması、Emilia E. Hashamova、高橋 駿太、服部 梓、田中 秀和、Fangzhun Guo、Xiaoqian Shi、服部 賢
2. 発表標題 3D Si{111}ピラミッド作製、及び7×7ファセット表面上のナノ薄膜形成
3. 学会等名 2020年日本表面真空学会学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 中塚 聡平、内藤 完、今泉 太志、虻川 匡司、江口 豊明、服部 梓、田中 秀和、服部 賢
2. 発表標題 フラッシング加熱によるSi3Dマイクロ構造と表面の構造変化
3. 学会等名 2020年日本表面真空学会学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 東高晃、Aydar Irmikimov、楊浩邦、阪井雄也、Emilia E. Hashamova、服部梓、大坂藍、田中秀和、Fangzhun Guo、Xiaoqian Shi、服部賢
2. 発表標題 原子秩序ファセット表面をもつ多様な三次元Si構造の創成
3. 学会等名 日本物理学会第76回年次大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 高橋駿太、山本幸弘、Liliany N. Pamasi、清水智也、服部梓、田中秀和、桃野浩樹、服部 賢
2. 発表標題 多軸制御RHEEDシステムの構築による立体構造任意表面の逆空間マップ評価
3. 学会等名 日本物理学会第76回年次大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Liliany N. Pamasi, Aydar Imirkimov, Takaaki Higashi, Shunta Takahashi, Emilia E. Hasamova, Tomoya Shimizu, Nobuyoshi Hosoi, Ai I. Osaka, Azusa N. Hattori, Hidekazu Tanaka, Ken Hattori
2. 発表標題 Magnetic property of ferromagnetic nanofilms on facet surfaces of three-dimensional structures
3. 学会等名 日本物理学会第76回年次大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 青山大晃、内藤完、中塚聡平、小川修一、虻川匡司、江口豊明、服部 賢、服部梓、黒田理人
2. 発表標題 Si(551)基板上に形成されたSi(15 17 3)3x1ファセット表面の表面構造解析
3. 学会等名 日本物理学会第76回年次大会
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 Azusa N. Hattori and Ken Hattori (eds. by Phuong Pham, Pratibha Goel, Samir Kumar and Kavita Yadav)	4. 発行年 2020年
2. 出版社 IntechOpen (London)	5. 総ページ数 21
3. 書名 Chap. 6. "Creation and evaluation of atomically ordered side- and facet-surface structures of three-dimensional silicon nano-architectures" in "21st Century Surface Science"	

〔産業財産権〕

〔その他〕

研究室紹介 https://mswebs.naist.jp/LABs/surface-material-physics/index.html
研究概要 https://mswebs.naist.jp/LABs/surface-material-physics/project.html
研究業績 https://mswebs.naist.jp/LABs/surface-material-physics/achievement.html
研究室紹介 https://mswebs.naist.jp/LABs/surface-material-physics/index.html
研究概要 https://mswebs.naist.jp/LABs/surface-material-physics/project.html
研究業績 https://mswebs.naist.jp/LABs/surface-material-physics/achievement.html

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	服部 梓 (Hattori Azusa) (80464238)	大阪大学・産業科学研究所・准教授 (14401)	

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究協力者	イリミキモフ アイダール (Irmikimov Aydar)	奈良先端科学技術大学院大学・先端科学技術研究科・博士課程後期課程学生 (14603)	
研究協力者	パマシ リリアニ (Pamasi Liliany)	奈良先端科学技術大学院大学・先端科学技術研究科・博士課程後期課程学生 (14603)	
研究協力者	東 嵩晃 (Higashi Takaaki)	奈良先端科学技術大学院大学・先端科学技術研究科・博士課程前期課程学生 (14603)	
研究協力者	高橋 駿太 (Takahashi Shunta)	奈良先端科学技術大学院大学・先端科学技術研究科・博士課程前期課程学生 (14603)	

6. 研究組織（つづき）

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究協力者	ハシャモヴァ エミリア (Hashamova Emilia)	奈良先端科学技術大学院大学・先端科学技術研究科・特別研究生 (14603)	(ドイツ)カールスルーエ工科大学・工学部 博士課程前期課程学生
研究協力者	阪井 雄也 (Sakai Yuya)	奈良先端科学技術大学院大学・先端科学技術研究科・博士課程前期課程学生 (14603)	
研究協力者	清水 智也 (Shimizu Tomoya)	奈良先端科学技術大学院大学・先端科学技術研究科・博士課程前期課程学生 (14603)	
研究協力者	楊 浩邦 (Yang Haobang)	奈良先端科学技術大学院大学・先端科学技術研究科・博士課程前期課程学生 (14603)	
研究協力者	井田 有紀 (Ida Yuki)	奈良先端科学技術大学院大学・先端科学技術研究科・博士課程前期課程学生 (14603)	
研究協力者	今山 航 (Imayama Wataru)	奈良先端科学技術大学院大学・先端科学技術研究科・博士課程前期課程学生 (14603)	
研究協力者	長谷川 菜 (Hasegawa Sai)	奈良先端科学技術大学院大学・先端科学技術研究科・博士課程後期課程学生 (14603)	
研究協力者	ジュハルニ (Juharni)	奈良先端科学技術大学院大学・先端科学技術研究科・博士課程後期課程学生 (14603)	

6. 研究組織（つづき）

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究協力者	北川 喜宏 (Kitagawa Yoshihiro)	奈良先端科学技術大学院大学・先端科学技術研究科・博士課程前期課程学生 (14603)	
研究協力者	木元 康成 (Kimoto Yasunari)	奈良先端科学技術大学院大学・先端科学技術研究科・博士課程前期課程学生 (14603)	
研究協力者	マバロウ ニマティル (Mabarroh Ni'matil)	奈良先端科学技術大学院大学・先端科学技術研究科・博士課程後期課程学生 (14603)	
研究協力者	細糸 信好 (Hosoi to Nobuyoshi)	奈良先端科学技術大学院大学・先端科学技術研究科・准教授 (14603)	
研究協力者	頓田 佐映子 (Tonda Saeko)	大阪大学・産業科学研究所・技術補佐員 (14401)	
研究協力者	石橋 武 (Ishibashi Takeshi)	大阪大学・産業科学研究所・技術補佐員 (14401)	
研究協力者	榊原 昇一 (Sakakihara Shoichi)	大阪大学・産業科学研究所・技術職員 (14401)	
研究協力者	大坂 藍 (Osaka Ai)	大阪大学・産業科学研究所・特任助教 (14401)	

6. 研究組織（つづき）

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究協力者	田中 秀和 (Tanaka Hidekazu)	大阪大学・産業科学研究所・教授 (14401)	
研究協力者	郭 方准 (Guo Fangzhun)	(中国)大連交通大学・先端技術研究所・教授	
研究協力者	石 曉倩 (Shi Xiaoqian)	(中国)大連交通大学・先端技術研究所・博士課程後期課程学生	
研究協力者	飯森 拓嗣 (Iimori Takushi)	東京大学・物性研究所・技術職員 (12601)	
研究協力者	小森 文夫 (Komori Fumio)	東京大学・物性研究所・教授 (12601)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関