

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成24年5月28日現在

機関番号：82110

研究種目：基盤研究（B）

研究期間：2008～2011

課題番号：20310064

研究課題名（和文）1次元Si(110)表面構造を利用したナノドット規則配列構造の創製とストレス制御

研究課題名（英文）Fabrication of ordered array structure using strained one-dimensional structure of Si(110)

研究代表者

朝岡 秀人 (ASAOKA HIDEHITO)

独立行政法人日本原子力研究開発機構・量子ビーム応用研究部門・研究主幹

研究者番号：40370340

研究成果の概要（和文）：

1次元構造を有するSi(110)表面のテンプレート作製技術の確立と、成長カイネティクス、ストレス生成機構の解明を通してナノ構造作製技術の指針を得ることを目的とし、研究を遂行した。その結果、Si(110)に加えGe(110)のシングルドメイン1次元16×2再構成構造を有するテンプレート作製を実現した。さらにフラーレンなどがナノワイヤー状に規則配列する16×2再構成構造内の結合サイトを見出すなど、自己組織化によるナノ構造作製技術のための端緒を得た。

研究成果の概要（英文）：

The well-controlled surface preparation method for Si(110) template, the surface kinetics, and the surface stress for fabrication of low-dimensional nanostructures were investigated. As a result, we obtained well-defined single domain of Ge(110)-16×2 and Si(110)-16×2 surfaces and found the alignment of C_{60} to the stable adsorption sites for realizing the one-dimensional structure. These results indicate the guideline to achieve well-ordered functional nanostructure on the templates.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	6,700,000	2,010,000	8,710,000
2009年度	4,500,000	1,350,000	5,850,000
2010年度	1,700,000	510,000	2,210,000
2011年度	1,700,000	510,000	2,210,000
年度			
総計	14,600,000	4,380,000	18,980,000

研究分野：複合新領域

科研費の分科・細目：ナノ・マイクロ科学・ナノ材料・ナノバイオサイエンス

キーワード：ナノ構造形成・制御

1. 研究開始当初の背景

Si(100)面上に構築されてきた半導体デバイスは、今や物理的限界に直面しており、次世代ナノテクノロジーを担う低次元系量子構造を実現する自己組織化技術が求められてきた。

Si(110)面はSi(100)面と異なり、面内異方

性をもつ表面構造・ストレスを有するとともに、ペンタゴン・ペアと呼ばれる表面アトム5員環対と、ステップを含む特徴的な表面再構成モデルが提案されており、低次元ナノ構造作製に適したテンプレートとなる可能性がある。しかしこれまでSi(110)清浄表面の作製方法が確立されておらず、表面再

構成構造はダブルドメイン化し、更に無秩序化した非平衡領域が混在していたため、その最表面構造を活用することができなかった。

今後、低次元構造を有する Si デバイスを実現するためには、次元性を制御したテンプレートの作製や、個々のナノ構造の形成位置・サイズ・形状の揺らぎを、高精度に制御する技術を自己組織化プロセスに付加することが必要である。

2. 研究の目的

本研究は、Si 面上へのヘテロ成長機構に関する研究代表者の知見と方法論を、Si(110)表面構造上の低次元ナノ構造作製研究に適用するものであり、以下を目的とする。Si(110)面をテンプレートとして、自己組織化による規則配列構造を作製するとともに、成長カイネティクスや、ナノ構造の異方性ストレスの解明を通してナノ構造作製技術の指針を得る。

3. 研究の方法

1次元化した Si(110)表面構造を利用して、規則配置されたペンタゴン・ペアもしくは直線状にのびたステップ端に影響を受けた核発生位置の制御とともに、ナノ構造の成長カイネティクスに基づく成長形態・条件を変化させることにより、そのストレスの制御、更にはナノ構造の作製ができる可能性がある。以下に具体的内容を述べる。

- (1) 構造的・化学的な秩序構造を配置した Si(110)テンプレートの作製と、その原子構造・電子状態の評価。
- (2) テンプレート上へのナノクラスターの配列構造の作製、生成過程の STM 観察による成長カイネティクスの解明。
- (3) 規則配列構造との相関を解明するため異方性を有するストレスの測定技術の開発。

4. 研究成果

1次元 Si(110)表面構造を利用した低次元ナノ構造の創製とストレス制御に関する研究においてこれまでの研究により得られた成果を、以下のテーマごとに記載する。

- (1) 構造的・化学的な秩序構造を配置した Si(110)テンプレートの作製と、その原子構造・電子状態の評価。

Si(110)に加え Ge(110)の1次元テンプレート作製のため、Ar スパッタ、ウェットエッチング、フラッシングなどによる表面清浄化、表面エレクトロマイグレーション効果による直流加熱電流・電圧の方向依存性、加熱温度の最適化を行い、規定された

Si(110)、Ge(110)両基板表面に、mm オーダーに及ぶ広範囲な一次元性を有する再構成表面を実現し、表面カイラリティを見出した。

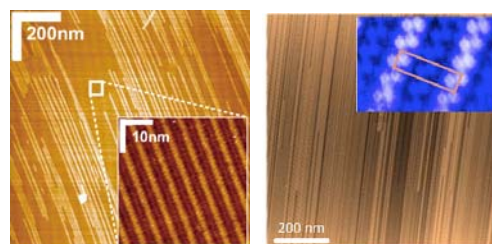


図1. 表面エレクトロマイグレーション効果による直流加熱 Si(110)-16×2 (左図)、Ge(110)-16×2 (右図) 単ドメイン表面の作製

- (2) テンプレート上へのナノクラスターの配列構造の作製、生成過程の STM 観察による成長カイネティクスの解明。

1次元構造を有する Si(110)表面に加え Ge(110)の1次元テンプレート上にフラーレンを蒸着し、アニール温度変化にともなう拡散、吸着位置を解析し、フラーレンが両基板表面の16×2構造内のステップエッジ部分に存在する結合サイトに規則配列することを見出した。

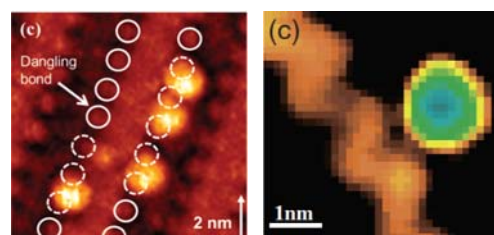


図2. Si(110)-16×2 (左図)、Ge(110)-16×2 (右図) 再構成構造上のフラーレン吸着サイト

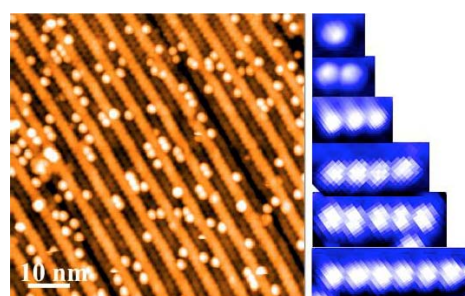


図3. Ge(110)-16×2 再構成構造上に規則配列したフラーレン

- (3) 規則配列構造との相関を解明するため異方性を有するストレスの測定技術の開発。

表面制御のための通電加熱・傍熱加熱、ストレス測定、構造解析のための反射高速

電子回折 (RHEED) 測定を同時に行うことが出来る非固定式通電加熱法を開発した。



図 4. ストレス測定、RHEED の同時測定が可能な非固定式通電加熱装置

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 (計 10 件)

- ① Ordering of C_{60} on one-dimensional template of single-domain Ge(110)-16x2 and Si(110)-16x2 surfaces, Y. Yokoyama, A. Sinsarp, Y. Yamada, H. Asaoka and M. Sasaki, *Appl. Phys. Express* 5 (2012) 025203 (1-3), 査読有
doi:10.1143/APEX.5.025203
 - ② Analysis of buried heterointerfacial hydrogen in highly lattice-mismatched epitaxy on silicon, T. Yamazaki, H. Asaoka, T. Taguchi, S. Yamamoto, D. Yamazaki, R. Mruyama, M. Takeda, S. Shamoto, *Thin Solid Films* 520 (2012) 3300-3303, 査読有
doi:10.1016/j.tsf.2011.10.081
 - ③ Surface analysis of single-crystalline β -FeSi₂, Y. Yamada, M. Wei, H. Asaoka, H. Yamamoto, F. Esaka, H. Uono and T. Tsuru, *Physics Procedia* 11 (2011) 67-70, 査読有
doi:10.1016/j.phpro.2011.01.034
 - ④ Epitaxial growth of largely mismatched crystals on H-terminated Si (111) surfaces, H. Asaoka, *J. Phys.* 22 (2010) 474007 (1-7), 査読有
doi:10.1088/0953-8984/22/47/474007
 - ⑤ Single-Domained Si(110)-16x2, Y. Yamada, A. Girard, H. Asaoka, *J. Phys.* 100 (2008) 072018 (1-4), 査読有
doi:10.1088/1742-6596/100/7/072018
 - ⑥ SR-PES and STM observation of metastable chemisorption state of oxygen on Si(1 1 0)-16x2 surface, Y. Yamamoto, H. Togashi, A. Kato, Y. Takahashi, A. Konno, Y. Teraoka, A. Yoshigoe, H. Asaoka, M. Suemitsu, *Appl. Surf. Sci.* 254 (2008) 6232-6234, 査読有
doi:10.1016/j.apsusc.2008.02.148
 - ⑦ Controlling the surface chirality of Si(110), Y. Yamada, A. Girard, H. Asaoka, H. Yamamoto, S. Shamoto, *Phys. Rev. B* 77 (2008) 153305 (1-3), 査読有
doi:10.1103/PhysRevB.77.153305
 - ⑧ Real-time stress analysis of Ge nanodot growth on H-terminated Si(111)-1x1 and Si(111)-7x7 surfaces, H. Asaoka, T. Yamazaki, S. Shamoto, *Curr. Appl. Phys.* 8 (2008) 246-248, 査読有
doi:10.1016/j.cap.2007.10.052
 - ⑨ Surface preparation and characterization of single crystalline β -FeSi₂, Y. Yamada, I. Wakaya, S. Ohuchi, H. Yamamoto, H. Asaoka, S. Shamoto, H. Uono, *Surf. Sci.* 602 (2008) 3006-3009, 査読有
doi:10.1016/j.susc.2008.07.035
 - ⑩ Si(110)-16x2 単一ドメイン表面の作製 山田洋一, Antoine Girard, 朝岡秀人, 山本博之, 社本真一, *表面科学* 29 (2008) 401-406, 査読有
https://www.jstage.jst.go.jp/article/jsssj/29/7/29_7_401/_pdf
- 〔学会発表〕 (計 19 件)
- ① Ge(110)-16x2 及び Si(110)-16x2 単一ドメイン表面をテンプレートとした分子ナノワイヤー作製, 山田洋一、アッサウインシンサップ、横山有太、朝岡秀人、佐々木正洋, 第 59 回応用物理学関係連合講演会、東京、2012 年 3 月 17 日
 - ② サーファクタントを利用した Ge/Si ヘテロ成長過程におけるストレス・表面構造の同時観察, 朝岡秀人、山崎竜也、社本真一、

- S. N. Filimonov, 末光真希, 第 59 回応用物理学関係連合講演会、東京、2012 年 3 月 15 日
- ③ Controlled clustering of Ge on Si(110) substrate,
Y. Yokoyama, Y. Yamada, H. Asaoka, M. Sasaki, The 6th International Symposium on Surface Science (ISSS-6), Tokyo Japan, 2011 年 12 月 13 日
- ④ Selectivity adsorption of organic molecules on the Si(110) - 16×2 single domain surface,
Y. Yokoyama, Y. Yamada, H. Asaoka, M. Sasaki, 15th International Conference on Thin Films (ICTF-15), Kyoto Japan, 2011 年 11 月 9 日
- ⑤ Analysis of buried heterointerfacial hydrogen in highly lattice-mismatched epitaxy on silicon,
T. Yamazaki, H. Asaoka, T. Taguchi, S. Yamamoto, D. Yamazaki, R. Mruyama, M. Takeda, S. Shamoto, 7th International Conference on Si Epitaxy and Heterostructures (ICSI-7), Leuven Belgium, 2011 年 8 月 30 日
- ⑥ In situ observation of stress and strain evolution during surfactant-mediated growth of Ge on Si,
H. Asaoka, T. Yamazaki, S. Shamoto, The XXII International Congress and General Assembly of the International Union of Crystallography (IUCr2011), Madrid Spain, 2011 年 8 月 25、26 日
- ⑦ Neutron reflectometry studies of hetero-interfacial H layer in highly lattice-mismatched epitaxy on Si,
H. Asaoka, T. Yamazaki, D. Yamazaki, M. Takeda and S. Shamoto, 17th European Molecular Beam Epitaxy Workshop (Euro-MBE), L'Alpe d'Huez France, 2011 年 3 月 21 日
- ⑧ Organic monolayers on the Si(110)- 16×2 single domain surface,
Y. Yokoyama, Y. Yamada, H. Asaoka, M. Sasaki, 18th International Colloquium on Scanning Probe Microscopy, Shizuoka, 2010 年 12 月 9 日
- ⑨ Si(110)- 16×2 単一ドメイン表面上の有機分子薄膜形成,
横山有太, 山田洋一, 朝岡秀人, 佐々木正洋, 第 30 回表面科学講演大会、大阪、2010 年 11 月 6 日
- ⑩ Surface analysis of single-crystalline β -FeSi₂,
Y. Yamada, M. Wei, H. Asaoka, H. Yamamoto, F. Esaka, H. Uono and T. Tsuru, Asia-Pacific Conference on Semiconducting Silicides Science and Technology Towards Sustainable Optoelectronics (APAC-SILICIDE 2010), Ibaraki, 2010 年 7 月 24 日
- ⑪ 終端された Si(110)- 16×2 単一ドメイン表面上の有機分子薄膜作製,
横山有太, 山田洋一, 朝岡秀人, 佐々木正洋, 第 57 回応用物理学関係連合講演会、神奈川、2010 年 3 月 18 日
- ⑫ Si(110) 16×2 表面の制御、
朝岡秀人、東北大学電気通信研究所共同プロジェクト研究会「半導体ゲートスタック・ナノ構造形成過程のダイナミクスと応用に関する研究」、東北大学電気通信研究所、宮城、2009 年 3 月 9 日
- ⑬ Surface stress relief in Bi-mediated Ge growth on Si,
H. Asaoka, T. Yamazaki, S. Shamoto, S. Filimonov, M. Suemitsu, 36th Korean Vacuum Society meeting, Seoul, 2009 年 2 月 11 日
- ⑭ 光電子分光と基板曲率測定による Si(110) 初期酸化過程の評価,
山本喜久, 鈴木康, 宮本優, ローランド・バンタクロー, 末光真希, 遠田義晴, 寺岡有殿, 吉越章隆, 朝岡秀人, 山崎竜也, 応用物理学会 薄膜・表面物理分科会・シリコンテクノロジー分科会、静岡、2009 年 1 月 23 日
- ⑮ Direct determination of surface stress during Bi-mediated Ge growth on Si,
H. Asaoka, T. Yamazaki, S. Shamoto, S. N. Filimonov, 14th International Conference on Thin Films & Reactive Sputter Deposition 2008 (ICTF14 & RSD2008), Ghent (Belgium), 2008 年 11 月 20 日

- ⑯ Stress evolution during hetero-epitaxial growth of Ge on Si, H. Asaoka, Forschungszentrum Jülich Seminar, 2008年11月14日
- ⑰ Stress evolution during surfactant-mediated growth of Ge on Si, H. Asaoka, 5th Japan-Korea Symposium on Surface Nanostructures, Miyagi, 2008年9月18日
- ⑱ Si(110)初期酸化時の化学結合状態および基板曲率のリアルタイム計測、山本喜久、鈴木康、宮本優、ローランド・バンタクロー、末光眞希、遠田義晴、寺岡有殿、吉越章隆、朝岡秀人、山崎竜也、第63回応用物理学会東北支部学術講演会、宮城、2008年11月5日
- ⑲ BiサーファクタントGe成長過程のストレス・RHEEDその場観察、朝岡秀人、山崎竜也、社本真一、S. N. Filimonov、末光眞希、第69回応用物理学会学術講演会、名古屋、2008年9月3日

[図書] (計1件)

- ① Direct determination of surface stress during Bi-mediated Ge growth on Si, H. Asaoka, T. Yamazaki, S. N. Filimonov, S. Shamoto, Proc. ICTF14&RSD2008, ISBN9789033473470 (2008) 179-182, 査読有

[産業財産権]

- 出願状況 (計2件)
- ① 名称：非固定式通電加熱ホルダー
 発明者：山崎竜也、朝岡秀人
 権利者：独立行政法人日本原子力研究開発機構
 種類：特許権
 番号：特願 2011-196724
 出願年月日：2011年9月9日
 国内外の別：国内
- ② 名称：Si(110)表面の一次元ナノ構造及びその製造方法
 発明者：山田洋一、朝岡秀人、山本博之、社本真一
 権利者：独立行政法人日本原子力研究開発機構
 種類：特許権
 番号：特願 2008-182426
 出願年月日：2008年7月14日
 国内外の別：国内

6. 研究組織

(1) 研究代表者

朝岡 秀人 (ASAOKA HIDEHITO)
 独立行政法人日本原子力研究開発機構・量子ビーム応用研究部門・研究主幹
 研究者番号：40370340

(2) 研究分担者

山田 洋一 (YAMADA YOICHI) 筑波大学・大学院数理物質科学研究科・助教
 研究者番号：20435598

山崎 竜也 (TATSUYA YAMAZAKI)
 独立行政法人日本原子力研究開発機構・量子ビーム応用研究部門・研究員
 研究者番号：30465992

社本 真一 (SHIN-ICNI SHAMOTO)
 独立行政法人日本原子力研究開発機構・量子ビーム応用研究部門・研究主席
 研究者番号：90235698

(3) 連携研究者

末光 眞希 (SUEMITSU MAKI) 東北大学・電気通信研究所・教授
 研究者番号：00134057

豊島 安健 (TOYOSHIMA YASUTAKE)
 産業技術総合研究所・エネルギー技術研究部門・主任研究員
 研究者番号：90357583