

平成22年 6月 1日現在

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2008～2009

課題番号：20760028

研究課題名（和文）Si(110)表面の広大な1次元ナノテクスチャの応用に関する研究

研究課題名（英文）Application of one-dimensional nano-texture on Si(110) surface

研究代表者

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

研究成果の概要（和文）：本研究では、Si(110)表面に実現する広大な一次元構造をテンプレートとしたナノ材料創製を目指した。本研究の第一段階では、一次元構造の更なる均質化と詳細な構造制御を達成した。また、各種分子を用いた表面終端処理により、一次元構造を保ったまま表面構造を化学的に不活性化することに成功した。本表面上で、多くの原子や分子はアモルファス状の一次元構造を形成した。これは原子・分子膜への一軸歪導入手法として有用である。

研究成果の概要（英文）：The purpose of this work is to create a one-dimensional nanostructure utilizing the characteristic one-dimensional surface structure of Si(110) as a template. In the first step, further controlling of the surface structure has been achieved. In addition, surface passivation by several molecules has also been demonstrated, realizing an inert, one-dimensional structure useful as a template. Atoms and molecules examined in this study formed amorphous-like one-dimensional structure on the template. This could be used as one-dimensional strain introduction into the thin atomic/molecular films.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	2,100,000	630,000	2,730,000
2009年度	1,300,000	390,000	1,690,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,400,000	1,020,000	4,420,000

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・表面界面物性

キーワード：Si(110), 一次元ナノ構造, 一軸歪

## 1. 研究開始当初の背景

本研究は、独自に作製したシリコン表面の新奇なナノ構造の応用研究を展開する。研究代表者らは、Si(110)表面に特有の16x2再構成構造を制御することで、数十 $\mu\text{m}^2$ に及ぶ広い

範囲でよく定義された、安定な一次元ナノテクスチャを新たに作製した。この構造は二つの有用な特徴：(1)よく定義された一次元性(図1)、及び(2)表面カイラリティの現出(図2)、を有する。これらを利用するこ

とで広範囲の研究が展開できる。本研究では、特に、本表面上での原子・分子ナノワイヤー作製研究、および不斉分子の反応研究を行う。

Si(110)表面の研究は、(111)や(100)面と比較して圧倒的に少ない。しかし Si(110)面は次世代マルチゲートデバイス[1]に使用されることから、近年新たに興味が集中している。特に日本国内において、Si(110)の高いホール移動度、特異な化学反応性、高い構造異方性などの特徴に着目した先駆的な基礎研究がそれぞれ行われている。しかし Si(110)の諸物性の理解は、いまだに黎明期にある。

Si(110)の理解を阻んでいる大きな要因は、表面準備の困難にあった。Si(110)清浄表面は、16x2 構造と呼ばれるストライプ状の再構成構造をとる。通常 16x2 再構成表面は、二つの等価なユニットセル(図2)からなる複雑な2ドメイン構造を示し、これを再現性よく準備することは極めて困難であった。

研究代表者らは、Si(110)表面に直流電流、電圧を印加することにより、16x2 構造のストライプを一方向のみにそろえ、複雑であった16x2 構造を単純な単一ドメインとすることに成功した。この発見は、今後の Si(110)の基礎研究の発展の基盤となるものである。本研究はこの発見を基礎におくものである。

## 2. 研究の目的

作製された Si(110)-16x2 構造の単一ドメインは、応用上有用である二つのユニークな特徴を有する。一つ目は、(1)よく定義された一次元性、である。16x2 構造の単一ドメインは数十 $\mu\text{m}^2$ にわたる広大な領域で均一な一次元構造を示すが、このような構造は稀有であり、低次元物性研究に有用である。特に、本表面のストライプ構造は、上下を繰り返す単原子ステップと等価であるため[5]、本表面は一次元ナノ構造(原子・分子ワイヤー)のテンプレートとしての応用が十分に期待できる。

二つ目は、(2)表面カイラリティの現出、である。図2に示す 16x2 構造の二つの等価なユニットセルは二次元不斉(カイラル)である。これらが混在する2ドメイン表面は全体としてカイラリティを示さないが、単一ドメインはホモカイラルとなる。このような広範囲で良く定義されたホモカイラル表面構造はほかに例がない。ここで、表面準備の直流方向を制御することで、表面カイラリティ(右手-左手系)を容易に制御することも可能である(図2)。本表面は分子の不斉合成反応の不均一触媒への応用が期待される。

これらを踏まえ、本研究の目的を以下の三点とした。

・表面構造の更なる制御と均質化

Si(110)-16x2 単一ドメイン表面のナノテクスチャ構造のカイラリティ制御、及び構造の最適化をおこなう。

・テンプレート上での一次元ナノ構造創製

Si(110)-16x2 構造をテンプレートとした原子・分子ワイヤー作製を行う。ナノワイヤー作製に有効な原子・分子を探索し、本表面の広範囲に、自己組織化による一次元ナノワイヤーを作製する。

・表面不斉を利用した不斉分子の反応

ここでは、本表面上での不斉分子の選択吸着に関する基礎研究を行う。

## 3. 研究の方法

本研究では、独自に作製した Si(110)-16x2 単一ドメイン表面の一次元ナノテクスチャの特徴である、

(1)よく定義された一次元性、(2)表面カイラリティの現出、をそれぞれ応用する研究を展開する。

前項②で述べたように、本研究は以下の三つのサブユニットに分類される。

[1,2 共通]：より高品位の Si(110)-16x2 ナノテクスチャの作製手法の確立に関する研究

[1 応用]：Si(110)-16x2 ナノテクスチャ上に作製した原子・分子ナノワイヤーに関する研究

[2 応用]：Si(110)-16x2 ナノテクスチャ上における不斉分子の吸着反応に関する研究

研究手段として、初期のナノ構造作製段階においては、主に走査トンネル顕微鏡をもちいた原子レベルの表面計測をおこなう。後期では、作製されたナノ構造を角度分解光電子分光法や He 原子線散乱法などのユニークな表面分析手法により計測し、ナノ構造体に発現される特異な電子物性を研究する。

## 4. 研究成果

(1) [1,2 共通] より高品位の Si(110)-16x2 ナノテクスチャの作製手法の確立に関する研究に関して

ここでは、Si(110)-16x2 単一ドメインの更なる均質化と制御とを達成した。良く準備された試料の LEED 計測により、単一ドメイン領域は数 mm の領域に渡っていることが確認された。また 1x3mm の試料領域をランダムにサンプリングして STM 計測を行った結果、いずれの位置でも同一の単一ドメインが確認さ

れた。

さらに、異なる二つの方位のストライプを有する Si(110)-16x2 単一ドメイン表面をそれぞれ再現性良くつくりわけることが可能となった。これにより、研究目的の一つである Si(110) 表面の表面カイラリティの高精度な制御が実現した。

また、水素終端処理を施すことで Si(110)-16x2 単一ドメイン表面を、ストライプ構造を保持したまま不活性化することに成功した

(図 1)。このように不活性化した表面は非常に安定であり、大気中に 10 分程度放置した後もその表面構造が保たれていることが STM 計測で確認された。これは本表面を一次元テンプレートとして用いる際に非常に重要になる技術である。

この段階での成果を論文にまとめ出版し、さらに特許を公開した。

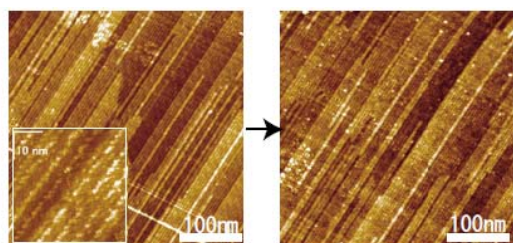


図 1 水素終端表面と、大気暴露後の表面

(2) [1 応用] : Si(110)-16x2 ナノテクスチャ上に作製した原子・分子ナノワイヤーに関する研究 に関して

Si(110)-16x2 単一ドメイン表面をテンプレートとして用いたナノ材料創製のため、種々の分子による薄膜作製実験を行った。これまでに C<sub>60</sub>、ペンタセン、コロネン、エチレン等の比較的低分子による薄膜作製を試みた。この結果、いずれの分子も Si(110)-16x2 単一ドメイン表面上においてアモルファスの単分子層を形成することがわかった。さらにそのアモルファス薄膜には、下地のストライプ構造を反映した一次元のストライプ状の凹凸を有することがわかった(図 2)。

この一次元的凹凸の存在は、アモルファス有機薄膜の電子状態を変調している可能性があり、現在その薄膜の電子状態の研究を行っている。この結果により、有機薄膜への一軸歪の導入が実現され、この一軸歪が電子状態へ及ぼす影響が解明されれば、有機薄膜の電子状態変調手法を確立することが可能となる。

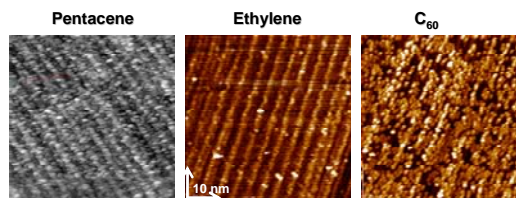


図 2 各種有機分子単分子層

さらに、一次元凹凸を有するアモルファス有機薄膜は、薄膜表面積が増大する。ここで、作製したアモルファス薄膜上に異種分子薄膜をさらに堆積させると、両分子膜の接触界面積を大きくすることが可能となる。これは有機薄膜太陽電池や有機 EL 等の、ドナー/アクセプター有機分子膜の積層デバイスの性能の向上に役立つ可能性がある。このため更なる薄膜作製実験を遂行中であるが、現時点では高品質の積層薄膜は達成されていない。今後、適切な分子の組み合わせを模索することが必要となる。

## 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 Y. Yamada et al., He/Ar-atom scattering from molecular monolayers: C<sub>60</sub>/Pt(111) and graphene/Pt(111), J. Phys. Condensed Matter, 査読あり, in press (2010).

② Y. Yokoyama et al., Associative desorption of adsorbed oxygen promoted by translational energy of incident O<sub>2</sub> molecules, Surface Science, 査読あり, 603, 2009, 2845

③ Y. Yamada et al., Controlling the surface chirality of Si(110), Phys. Rev. B, 査読あり, 77, 2008, 153305

④ Y. Yamada et al., Single-Domained Si(110)-16x2, J. Phys., 査読あり, 100, 2008, 072018

⑤ 山田洋一 et al., Si(110)-16x2 単一ドメイン表面の作製, 表面科学, 査読あり, 29, 2008, 401

〔学会発表〕(計2件)

①横山有太ら、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、2010年春季第 57 回応用物理学関連連合講演会、2010年3月16日、東海大学

②Y. Yamada et al. Controlling the surface chirality of Si(110)-16x2, ECOS 25, July 27, to Friday, August 1, 2008, Liverpool, England.

〔産業財産権〕

○出願状況 (計1件)

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：日本原子力研究開発機構

種類：特願

番号：2008-182426

出願年月日：平成20年8月13日出願

国内外の別：国内

○取得状況 (計1件)

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：日本原子力研究開発機構

種類：特開

番号：2010-18504(p2010-18504A)

取得年月日：平成22年1月28日

国内外の別：国内

〔その他〕

ホームページ等

<http://www.bk.tsukuba.ac.jp/~surflab/>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

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