

機関番号：12601

研究種目：若手研究（B）

研究期間：2010～2011

課題番号：22710095

研究課題名（和文）ゲルマニウム基板上に構築した金属ナノワイヤ構造とその電子物性

研究課題名（英文）Electronic properties of metallic nanowires  
grown on a germanium substrate

研究代表者

中辻 寛（NAKATSUJI KAN）

東京大学・物性研究所・助教

研究者番号：80311629

研究成果の概要（和文）：本研究では、半導体基板上に形成されるナノ構造として、ゲルマニウム(001)および(111)表面に金を1原子層程度蒸着することで形成されるナノワイヤ(1次元)構造および2次元構造について、その原子構造と電子状態を明らかにした。ナノワイヤ構造においては、構造から予測される1次元電子系ではなく、ワイヤ垂直方向に小さい有効質量をもつ金属的な表面状態があることを明らかにした。また2次元構造においては、大きなスピン軌道相互作用にともなうラッシュバ型のスピン分裂した電子状態をもつことを明らかにした。

研究成果の概要（英文）：The atomic and electronic structures of nanowire (one-dimensional; 1D) and two-dimensional (2D) structures which are formed by one atomic-layer of gold deposition on germanium (001) and (111) substrates have been investigated. The nanowire structure has been revealed to have a metallic surface state with smaller effective mass in the perpendicular direction to the wire, which is contrary to intuitive expectation of 1D electronic structure. The 2D structure has been revealed to have a metallic surface state with Rashba-type spin split due to a large spin-orbit interaction.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	2,300,000	690,000	2,990,000
2011年度	800,000	240,000	1,040,000
総計	3,100,000	930,000	4,030,000

研究分野：表面・界面物性

科研費の分科・細目：ナノ・マイクロ科学・ナノ構造科学

キーワード：表面物性、ナノ構造物性、低次元系、表面電子状態、角度分解光電子分光、走査トンネル顕微鏡、ゲルマニウム、金

## 1. 研究開始当初の背景

固体表面においては、バルク物質には存在しない組成あるいは形状をもつ原子構造が安定化することがあり、その特異な物性の探索は、表面・界面の物性研究における重要な課題である。なかでも、金属/半導体表面における1次元構造は、パリエルス不安定性による金属・絶縁体転移や量子効果の発現、あるいはナノスケールでの1次元電気伝導を担う点で興味深く、In/Si(111)、Au/Si(557)表面といったシリコン(Si)を基板とする研究

例が多くある。ところがSi同様に重要な半導体基板であるにもかかわらず、ゲルマニウム(Ge)上における1次元構造とその電子状態に関する研究は殆ど例がなかった。本研究では、数原子層以下の金(Au)を蒸着したGe(001)半導体表面を扱ったが、研究開始時には、Auを670Kに保った基板に蒸着すると、ナノワイヤ構造が1.6nm周期で並ぶ様子が報告されていた[1]。研究代表者らは予備研究として、Au/Ge(001)表面の価電子帯電子構造と表面原子構造を、角度分解光電子分光

(ARPES)と走査トンネル顕微鏡(STM)を用いて調べ、異方的な2次元金属表面状態の存在を明らかにした[2]。これは、別グループがSTM観察から提案した、Au吸着(111)ナノファセットが配列して畝状になった表面構造と矛盾しない[3]。すなわち、ファセット上の2次元電子系が、ナノワイヤ構造によって異方的に変調されたと考えることができる。しかし、詳細な原子構造や電子物性は不明であった。一方、このようなナノワイヤ配列を、1原子(分子)層高さ程度の有機分子や金属原子ナノワイヤ作成のテンプレートに用いる試みは、金属表面上では研究が進んでいるが、半導体基板では、国内外ともに先行研究はほとんどない状況であった。

[1] J. Wang et al., Phys. Rev. B 70 (2004) 233312.

[2] K. Nakatsuji et al., Phys. Rev. B 80 (2009) 081406(R).

[3] A. van Houselt et al., Phys. Rev. B 78 (2008) 233410.

## 2. 研究の目的

本研究は Au/Ge(001)の系でナノワイヤ構造を作成し、原子構造と電子物性を明らかにする。さらにこれらをテンプレートに用いて有機分子や金属原子などの1次元配列を作成し、新奇な物性の発現をねらう。

・Au/Ge(001)表面：予備研究をさらに進め、温度変化による金属・絶縁体転移の有無とその起源を電子状態の変化から調べる。さらに、表面原子構造を明らかにする。

・ナノワイヤ構造をテンプレートとした有機分子・磁性原子ナノワイヤ構造の作成と評価：ナノワイヤ構造上にフラレン分子(C60)やコバルト(Co)原子を蒸着し、それらのナノワイヤ作成を行う。

またこれらに関連して、Au/Ge(111)表面に形成される  $3 \times 3$  再構成表面の原子構造と電子構造を明らかにする。

## 3. 研究の方法

試料作製と実験は全て超高真空槽内で行った。Ge表面はアルゴンイオンスパッタリングとアニールを繰り返すことで清浄化し、670 K程度の基板温度で1原子層程度のAuを蒸着することで、ナノワイヤ構造や  $3 \times 3$  構造を作成した。原子構造は室温および80 KでのSTM観察により、電子状態は室温および130 KでのARPES測定によって調べた。またGe 2pおよびAu 4f コアレベルの放射光光電子分光測定を、高エネルギー加速器研究機構の放射光実験施設・BL-18Aにて実施した。

## 4. 研究成果

(1) Au/Ge(001)表面のナノワイヤ構造：

前述の予備研究で明らかになった異方的2次元金属状態の起源を探るため、光電子分光(PES)とSTMを用いて、原子構造と局所電子状態の知見を得た。図1にSTM像を示す。ナノワイヤ構造が1.6 nm周期で並ぶ様子がわかる。原子構造は先行研究にていくつかのモデルが提案されていたが、

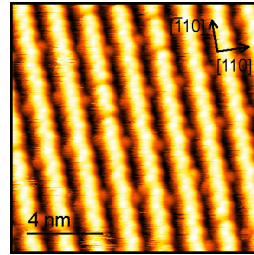


図1 Au/Ge(001)のSTM像  
STM観察ではナノワイヤ間に数原子層深さの溝が観察され、(111)マイクロファセットを含むモデル(図2)を支持する結果を得た。ただしPESによるGe 3d

コアレベル測定からは、マイクロファセットモデルが正しいとしても、モデルがもつGeダイマ

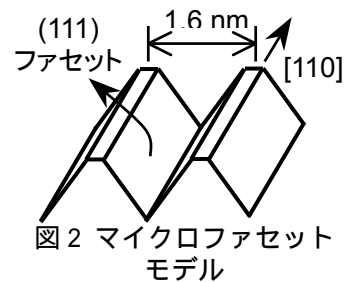


図2 マイクロファセットモデル

ー列は存在しないことがわかった。一方STM観察から、ナノワイヤ頂上の原子配列を明らかにした。ナノワイヤ平行方向に下地ユニットセルの8倍周期の構造があることを明らかにした。これに対応して、異方的2次元金属状態の電子状態密度も8倍周期を示すことと、ワイヤ垂直方向にも広がりがあることがわかった。これが電子状態の2次元性に寄与していると考えられる。

次に、予備研究で明らかにされていた異方的2次元金属バンドにおいて、ナノワイヤに平行又は垂直のどちらに電気伝導しやすいかを明らかにするため、微傾斜(001)基板を用いてナノワイヤ構造のシングルドメイン試料を作成し、走査トンネル顕微鏡(STM)観察および角度分解光電子分光(ARPES)測定することで、電子状態の異方性とナノワイヤ構造の相関を調べた。まずSTM観察で、シングルドメイン試料の形成条件を明らかにした。基板温度740 K、Auの蒸着レート1-1.5原子層/分程度で成長させると、基板のステップに平行方向に延びるナノワイヤ構造が優勢になることがわかった。次にARPES測定で、異方的2次元金属バンドの形状を調べた。図3はこのバンドの等エネルギー面であり、ナノワイヤに平行方向に延びた楕円形である。このことから、電子有効質量が小さい(電気伝導しやすい)方向が、ナノワイヤに平行ではなく垂直方向であることが明らかとなった。この結果は、ナノワイヤ方向に電気伝導

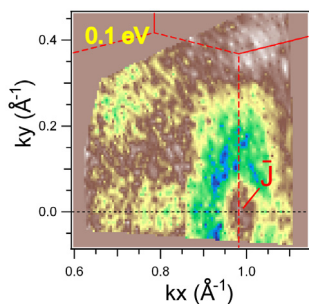


図 3 金属的表面状態の等エネルギー面。ナノワイヤは y 方向に延びている。

しやすいという単純な予想と異なり、電子状態を正確に評価することの重要性を示す結論となった。

以上のような (001) 表面での結果に関連して、Au/Ge(111) 3×3 表面の

電子状態を角度分解光電子分光 (ARPES) で調べた。4 つの金属的なバンドがあり、2 つはホールの、2 つは面内の対称性をもつ電子的バンドであること、また第一原理計算で求めたバンド構造との比較により、電子的バンドはフェルミレベル直下でラシュバ型のスピン分裂を示すことを明らかにした。

一方この表面の STM 観察を行うと、Au 1 原子層以下では Au 吸着領域に一定割合の三角形構造 (欠陥) が観察されたが、Au の平均膜厚が 1 原子層を越えるとその数が急激に増加した。これは ARPES 測定した金属バンドの結合エネルギーが、Au 1 原子層以上で急激に高エネルギー側にシフトすることに対応しており、この欠陥構造が金属バンドに対する電子ドナーであり、バンド内の電子数を制御できることが明らかになった。また、Ge(111) 面についても微傾斜基板を用いて新しい 1 次元構造の形成を試み、ステップに平行方向に延びる 1 次元鎖構造が形成されることを明らかにした。ARPES 測定からは金属的なバンドは見つからなかったものの、この構造由来のバンドが 1 次元鎖平行方向に有効質量の小さい異方的 2 次元バンドであることを明らかにした。

## 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 4 件)

K. Nakatsuji and F. Komori, Correspondence: Debate over dispersion direction in a Tomonaga-Luttinger-liquid system, Nature Physics, 査読有、8 巻、2012、174  
doi:10.1038/nphys2240

K. Nakatsuji, Y. Motomura, R. Niikura and F. Komori, Shape of metallic band at single-domain Au-adsorbed Ge(001) surface studied by angle-resolved photoemission

spectroscopy, Physical Review B, 査読有、84 巻、2011、115411  
doi:10.1103/PhysRevB.84.115411

K. Nakatsuji, R. Niikura, Y. Shibata, M. Yamada, T. Imori, F. Komori, Y. Oda and A. Ishii, Anisotropic splitting and spin polarization of metallic bands due to spin-orbit interaction at the Ge(111)(3×3)R30°-Au surface, Physical Review B, 査読有、84 巻、2011、035436  
doi:10.1103/PhysRevB.84.115411

R. Niikura, K. Nakatsuji and F. Komori, Local atomic and electronic structure of Au-adsorbed Ge(001) surfaces: Scanning tunneling microscopy and X-ray photoemission spectroscopy, Physical Review B, 査読有、83 巻、2011、035311  
doi:10.1103/PhysRevB.83.035311

〔学会発表〕(計 9 件)

元村勇也, 中辻寛, 小森文夫, Ge(111)微傾斜面の Au 蒸着量に依る 1 次元原子構造の変化、日本物理学会第 67 回年次大会、2012 年 3 月 24 日、関西学院大学

元村勇也, 中辻寛, 新倉涼太, 小森文夫, Au/Ge(111)表面の STM による原子構造研究、日本物理学会 2011 年秋季大会、2011 年 9 月 21 日、富山大学

中辻寛, 元村勇也, 新倉涼太, 飯盛拓嗣, 吉村継生, 岩崎悠真, 小森文夫, Ge(001)-Au 表面における 1 次元鎖構造の電子バンド形状、日本物理学会 2011 年秋季大会、2011 年 9 月 22 日、富山大学

K. Nakatsuji, Y. Motomura, R. Niikura, Y. Shibata, M. Yamada, T. Imori, F. Komori, Y. Oda and A. Ishii, Two dimensional metallic states and their modification on Ge(111) 3×3-Au surface, 6th International Symposium on Surface Science (ISSS-6), 2011 年 12 月 12 日、Tokyo, Japan

K. Nakatsuji, Y. Motomura, R. Niikura, T. Imori, T. Yoshimura, Y. Iwasaki and F. Komori, Metallic surface state at a single-domain Au-adsorbed Ge(001) surface studied by angle-resolved photoelectron spectroscopy, 28th European Conference on Surface Science (ECOSS 28), 2011 年 8 月 31 日、Wroclaw, Poland

中辻寛, 新倉涼太, 元村勇也, 柴田祐樹,

山田正理, 飯盛拓嗣, 小森文夫, Ge(001)-Au 表面の 1 次元鎖構造と電子状態、第 30 回表面科学学術講演会、2010 年 11 月 6 日、大阪大学

中辻寛, 新倉涼太, 元村勇也, 柴田祐樹, 山田正理, 飯盛拓嗣, 小森文夫, Ge(111)  $3 \times 3$ -Au 表面の電子状態 II、日本物理学会 2010 年秋季大会、2010 年 9 月 23 日、大阪府立大学

K. Nakatsuji, R. Niikura, Y. Shibata, M. Yamada, T. Iimori, Y. Oda, A. Ishii and F. Komori, Two dimensional electronic structure of Ge(111)  $3 \times 3$ -Au surface, 27th European Conference on Surface Science (ECOSS 27)、2010 年 8 月 30 日、Groningen, Netherlands

K. Nakatsuji, R. Niikura, Y. Motomura, Y. Shibata, M. Yamada, T. Iimori, Y. Oda, A. Ishii and F. Komori, Two dimensional metallic state and its modification on Ge(111)  $3 \times 3$ -Au surface, SSSJ-A3 Foresight Joint Symposium on Nanomaterials and Nanostructures, 2010 年 7 月 5 日、Tokyo, Japan

[その他]

ホームページ等

<http://komori.issp.u-tokyo.ac.jp/>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

中辻 寛 (NAKATSUJI KAN)  
東京大学・物性研究所・助教  
研究者番号：80311629

### (2) 研究分担者

### (3) 連携研究者

### (4) 研究協力者

小森 文夫 (KOMORI FUMIO)  
東京大学・物性研究所・教授  
山田 正理 (YAMADA MASAMICHI)  
東京大学・物性研究所・技術補佐員  
飯盛 拓嗣 (IIMORI TAKUSHI)  
東京大学・物性研究所・技術専門職員  
新倉 涼太 (NIKURA RYOTA)  
東京大学・物性研究所・D1  
柴田 祐樹 (SHIBATA YUKI)  
東京大学・物性研究所・M2  
岩崎 悠真 (IWASAKI YUMA)  
東京大学・物性研究所・M2  
元村 勇也 (MOTOMURA YUYA)  
東京大学・物性研究所・M2

吉村 継生 (YOSHIMURA TSUGUO)

東京大学・物性研究所・M2

石井 晃 (ISHII AKIRA)

鳥取大学・教授

小田 泰丈 (ODA YASUHIRO)

鳥取大学・D2