

平成 30 年 6 月 20 日現在

機関番号：12102

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2016～2017

課題番号：16K13678

研究課題名(和文) Ge(110)表面における単一配向極薄Geナノワイヤーの創製と応用開拓

研究課題名(英文) Fabrication of monodirectional nanowires on Ge(110) and their spintronic applications

研究代表者

山田 洋一 (YAMADA, Yoichi)

筑波大学・数理物質系・講師

研究者番号：20435598

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,800,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、Ge(110)表面にAuやPt等の重金属を添加することにより、単一配向のナノワイヤー構造を作製した。ナノワイヤーは、重金属がサブサーフェスに移動し、表面に極薄Geが析出した特異な構造を有する。極薄Ge層はスピン軌道相互作用が強くなることが知られており、このナノワイヤー構造をスピントロニクス材料の応用が期待できる。本研究後半では、この応用を見据え、grapheneやh-BNなどの原子層系元素材料と磁性重元素の界面におけるスピンの挙動を独自手法で研究した。その結果、原子層物質との界面において、磁性重元素のスピンの向きが変化することや、場合によっては垂直磁気異方性を発現することがわかった。

研究成果の概要(英文)：We fabricated monodirectional nanowires of the hybrid structure of ultra-thin Ge and heavy metals, utilizing the unique surface structure of Ge(110). This nanowire consists of ultrathin Ge sheet at the surface and the metal atoms incorporated in the subsurface region. Since the ultrathin Ge layer is known to host an enhanced spin-orbit coupling, this nanowire is useful in the application to the spintronics devices. In order to understand the spin-related interaction between ultrathin Ge layer and the subsurface metals, we performed basic studies using model systems. We especially focused on the interface of the well-defined monolayer materials and magnetic heavy atoms. We have found that, even at the weakly-interacting interface such as h-BN-Co and graphene-LSMO interfaces, spin-related interaction is significant. We demonstrated the induction of the perpendicular magnetic anisotropy (PMA) on magnetic atoms or spin polarization in monolayer materials at the interface.

研究分野：表面科学

キーワード：Ge ナノワイヤー 単原子層物質 スピン編極 PMA

1. 研究開始当初の背景

半導体表面上への金属原子吸着が表面にナノワイヤー(NW)構造を誘起することはよく知られている。このうち最近ではGe(100)表面上のAuおよびPt誘起NWが注目され、集中的に研究がなされてきた。この系の電子状態は強い一次元性を示し、朝永-ラッティンジャー液体の形成が示唆されるなど、低次元電子物性研究の理想的なモデル系として注目を集めている。

しかし、一般的に、表面上のNW構造では、巨視的な一次元性は発現しにくい。これは、表面が二次元系であり、等方的であるための本質的な問題である。これはこの系の応用上大きな障害となるのに加え、基礎研究においても原子構造や電子状態の詳細な解析の妨げとなる。このため、多く研究されているGe(100)の金属NWでさえ、構造と電子状態は未だに議論が続いている。

このためNWの単一配向化が望まれるが、これは通常困難であった。申請者らは、異方性の強いGe(110)面をテンプレートとし、そこにAuやPt原子を単原子層蒸着したのち、400程度で加熱処理することにより、単一配向のAu、Pt誘起NW構造を自己組織的に作製した。ここでNW構造は表面全体のcmの領域にわたる領域で単一ドメインであることがわかった。本構造は一次元電子系の新たな優れたモデル系となると期待できる。

2. 研究の目的

本研究では、今回発見されたGe(110)上のPt及びAu原子誘起の単一配向ナノワイヤーの原子構造と電子状態を詳細に決定する。この構造の電子/スピン状態の詳細な計測により、エレクトロニクスやスピントロニクス素子への応用を提案する。

3. 研究の方法

ここでは、様々な表面科学的手法を用いて単一配向Geナノワイヤーの原子構造と電子状態を決定する。さらに、ナノワイヤー構造の更なる構造制御を試みる。

まず、Ge(110)表面にPtやAuを蒸着し、その後のアニール処理により単一配向NWを作製する。表面構造は走査トンネル顕微鏡(STM)による直接原子観察とHe原子線回折(HAS)による最表面回折計測により、表面凹凸形状を決定する。ただしこれらだけでは表面の原子種の配置までは決定できないため、準安定He原子線脱励起分光

(MDS)を用い、表面の原子種がGeであることを決定する。

次にナノワイヤー構造の電子状態を、放射光光電子分光により解析する。このとき分子科学研究所のUVSOR-BL2Bの高感度角度分解紫外光電子分光装置を用い、価電子帯の詳細なバンド構造を計測する。これにより表面電子状態の一次元性を評価する。また、表面のGe層由来の電子状態を注視し、表面Geと下層との相互作用を検討し、ゲルマネンナノリボンの可能性を評価する。さらに、本構造のスピントロニクス応用を見据え、極薄Ge層/重金属界面でのスピンの振る舞いを、スピン偏極準安定He原子線脱励起分光(SP-MDS)とX線磁気円二色性(XMCD)により研究する。

4. 研究成果

本研究では、Ge(110)表面にAuやPt等の重金属を添加することにより、単一配向のナノワイヤー構造を作製した。図1にこれらのSTM像を示す。

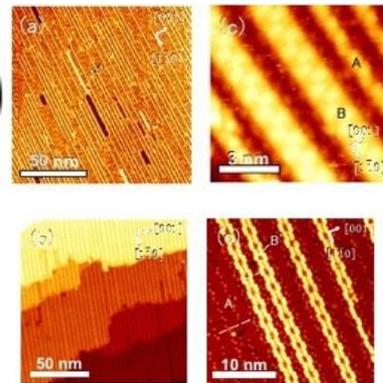


図1 (上段) Pt誘起ナノワイヤー (下段) Au誘起ナノワイヤー

図2に示すこれらのナノワイヤーのMDS計測により、これらのNWの最表面からのMDSスペクトルは、Ge表面のものと同様であり、PtやAu表面のスペクトルとは異なっていることがわかった。このことから、これらのナノワイヤー構造では、重金属がサブサーフェスに移動し、表面に極薄Geが析出した特異な構造であることがわかった(Surf.Sci. 653 L71)。

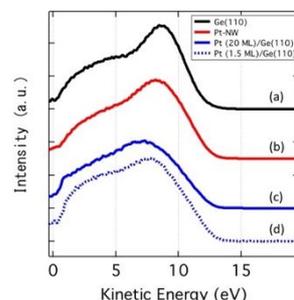


図2 ナノワイヤーのMDSスペクトル

ただし、同様の構造はヨーロッパの研究グループによっても作製され、詳細な電子状態計測がなされ始めたことがわかった。このため、本研究グループでは電子状態からスピン状態評価に主眼を移すこととした。

極薄 Ge 層はスピン軌道相互作用が強くなることが知られており、このナノワイヤー構造をスピントロニクス材料の応用が期待できる。本研究後半では、この応用を見据え、基礎研究として graphene や h-BN などの原子層系元素材料と磁性重元素の界面におけるスピンの挙動を独自手法で研究した。

ここでは、磁性絶縁体(YIG)、磁性半金属(LSMO)上に graphene を転写した際の graphene のスピン偏極の様子を SP-MDS で決定した。この結果、いずれの表面上でも graphene のバンドがスピン偏極している様子があった(図3)(Adv. Funct. Mater. 1800462 (2018), Nanoscale, 10, 1825 (2018))。

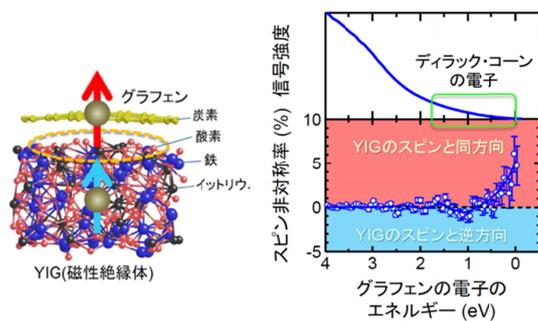


図3 gr/YIGのスピン偏極

また、一方で、graphene や h-BN の上に磁性金属を添加した系を用いて、磁性元素側の界面のスピンの計測を深さ分解 XMCD により行った。このため、h-BN 上に Co を微量添加した系の XMCD 計測を行った(図4)。

この結果、原子層物質との界面において、Co は垂直磁気異方性を発現していることがわかった。

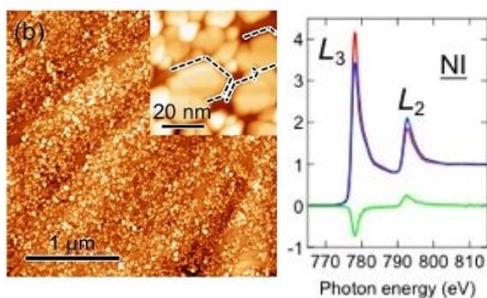


図4 Co/h-BN の AFM 像と XMCD

これらの結果を受け、現在は Ge(110)上に Co ナノワイヤーを作製し、そのスピン状態を制御する研究が展開しつつある。

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 13 件)

(1) 高配向ジナフトチエノチオフェン(DNTT)およびピセン(picene)分子膜の電子状態
長谷川友里・山田洋一・佐々木正洋
表面と真空(in press)

(2) Dirac Cone Spin Polarization of Graphene by Magnetic Insulator Proximity Effect Probed with Outermost Surface Spin Spectroscopy
Seiji Sakai, Sergei V. Erohin, Zakhar. Popov, Satoshi Haku, Takahiro Watanabe, Yoichi Yamada, Shiro Entani, Songtian Li, Pavel V. Avramov, Hiroshi Naramoto, Kazuya Ando, Pavel B. Sorokin, and Yasushi Yamauchi
Adv. Funct. Mater. 1800462 (2018)

(3) Electronic structure of Li+@C60: Photoelectron spectroscopy of the Li+@C60[PF6-] salt and STM of the single Li+@C60 molecules on Cu(111)
Yoichi Yamada; A. V. Kuklin; Sho Sato; Fumitaka Esaka; Naoya Sumi; Chunyang Zhang; Masahiro Sasaki; Eunsang KWON; Yasuhiko Kasama; P. V. Avramov; Seiji Sakai
Carbon, 133, 23 (2018)

(4) Well-Ordered 4CzIPN ((4s,6s)-2,4,5,6-tetra(9Hcarbazol-9-Yl)isophthalonitrile) Layers: Molecular Orientation, Electronic Structure, and Angular Distribution of Photoluminescence
Hasegawa, Yuri; Yamada, Yoichi; Sasaki, Masahiro; Hosokai, Takuya; Nakanotani, Hajime; Adachi, Chihaya
J. Phys. Chem. Lett. (2018), 9, pp853-867

(5) Well-ordered films of disk-shaped thermally activated delayed fluorescence (TADF) molecules
Hasegawa, Yuri; Minami, Hayato; Kanada, Satoru; Yamada, Yoichi; Sasaki, Masahiro; Hosokai, Takuya; Nakanotani, Hajime; Adachi, Chihaya
J. Photon Energy 8, 032110 (2018)

(6) Electron emission properties of graphene-oxide-semiconductor planar-type electron emission devices
Katsuhisa Murakami, Shunsuke Tanaka, Takuya Iijima, Masayoshi Nagao, Yoshihiro Nemoto, Masaki Takeguchi, Yoichi Yamada, Masahiro Sasaki
J. Vac. Sci. Technol. B 36 02C110 (2018)

(7) Interface-induced perpendicular magnetic anisotropy of Co nanoparticles on single-layer h-BN/Pt(111)

Takahiro Watanabe, *Yoichi Yamada, Akihiro Koide, Shiro Entani, Songtian Li, Zakhar I. Popov Pavel B. Sorokin, Hiroshi Naramoto, Masahiro Sasaki, Kenta Amemiya, and *Seiji Sakai

Appl. Phys. Lett. 112, 022407 (2018)

(8) Extensive First-Principles Molecular Dynamics Study on the Li Encapsulation into C60 and Its Experimental Confirmation

*K Ohno, A Manjanath, Y Kawazoe, R Hatakeyama, F Misaizu, E Kwon, H Fukumura, H Ogasawara, Y Yamada, C Zhang, N Sumi, T Kamigaki, K Kawachi, K Yokoo, S Ono, and Y Kasama

Nanoscale, 10, 1825 (2018)

(9) 尖鋭構造を持たない炭素膜からの電界放出

堀江翔太, 麻藤健, 明神拓真, 樋口敏春, 山田洋一, *佐々木正洋

Journal of the Vacuum Society of Japan 60 (1), 13-17 (2017)

(10) Pt- and Au-induced monodirectional nanowires on Ge(110)

T. Watanabe, *Y. Yamada, M. Sasaki, S. Sakai, Y. Yamauchi

Surf. Sci. Lett. 653. L71 (2016)

(11) Proximity-induced spin polarization of graphene in contact with half-metallic manganite

* Sakai, Seiji; Majumdar, Sayani; Popov, Zakhar; Avramov, Pavel; Entani, Shiro; Hasegawa, Yuri; Yamada, Yoichi; Huhtinen, Hannu; Naramoto, Hiroshi; Sorokin, Pavel; Yamauchi, Yasushi

ACS Nano, 2016, 10 (8), pp 7532-7541

(12) Overlapping of Frontier Orbitals in Well-Defined DNTT and Picene Monolayers

Yuri Hasegawa, * Yoichi Yamada, Takuya Hosokai, Yutaka Wakayama, Koswattage Rasika, Masahiro Yano and Masahiro Sasaki

J. Phys. Chem. C, 2016, 120 (38), pp 21536-21542

(13) Detection of Molecular Oxygen Adsorbate during Room-Temperature Oxidation of Si(100)2x1 Surface: In situ Synchrotron Radiation Photoemission Study

* Yoshigoe, Akitaka; Yamada, Yoichi; Taga, Ryo; Ogawa, Shuichi; Takakuwa, Yuji

Jpn. J. Appl. Phys. (RAPID COMMUNICATION) 55, 100307 (2016)

〔学会発表〕(計 21 件)

(1) 低真空・低電圧で動作するグラフェンを用いた高効率平面型電子源

○村上 勝久^{1,2,3}, 宮路 丈司⁴, 古家 遼⁵, 安達 学², 飯島 拓也², 長尾 昌善¹, 根本 善弘³, 竹口 雅樹³, 鷹尾 祥典⁵, 山田 洋一², 佐々木 正洋², 根尾 陽一郎⁴, 三村 秀典⁴(¹.産総研、².筑波大数理、³.物材機構、⁴.静岡大、⁵.横浜国大)

2018 年第 65 回応用物理学会春季学術講演会 (早稲田大学)

(2) 高配向 4CzIPN 分子膜の分子配列, 電子状態, および PL 角度依存性 ○(DC)長谷川 友里¹, 南 颯人¹, 金田 悟¹, 山田 洋一¹, 細貝 拓也², 佐々木 正洋¹, 中野谷 一³, 安達 千波矢³(¹.筑波大数理、².産総研、³.九大 OPERA)

2018 年第 65 回応用物理学会春季学術講演会 (早稲田大学)

(3) First Direct Synthesis of Graphene/Half-metallic Heusler Alloy Heterostructure for Spintronic Device Applications

○Songtian Li¹, Takahiro Watanabe², Yoichi Yamada², Shiro Entani¹, Pavel B. Sorokin³, Yuya Sakuraba⁴, Kenta Amemiya⁵, Seiji Sakai¹(¹.QST、².Univ. of Tsukuba、³.NUST MISiS、⁴.NIMS、⁵.KEK)

2018 年第 65 回応用物理学会春季学術講演会 (早稲田大学)

(4) ナノ炭素材料の FEM/FIM

山田洋一

日本学術振興会真空ナノエレクトロニクス第 158 委員会第 122 回研究会

2018/4/25

機械振興会館、東京

(5) 有機半導体単材料の分子レベル計測

山田洋一

第 14 回真空ナノエレクトロニクスシンポジウム

開催日時: 平成 29 年 3 月 2 日(木)、3 日(金)

開催場所: アクトシティー浜松(浜松市中区) コンgressセンター 2F

(6) Controlling magnetic property of metal nanoparticles utilizing single layer h-BN

T. Watanabe^{1,3}, Y. Yamada¹, M. Sasaki¹, A. Koide², S. Entani³, K. Amemiya⁴ and S. Sakai^{1,3} (1Univ. of Tsukuba, Japan, 2IMS, Japan, 3QST, Japan, 4KEK, Japan)

8th International Symposium on Surface Science (ISSS-8) Oct. 22, 2017, Tsukuba

(7) Fabrication of Highly Oriented Molecule Films Utilizing Well-ordered Monolayer as Template

C. Zhang¹, Y. Hasegawa¹, Y. Wakayama², Y. Yamada¹ and M. Sasaki¹ (1Univ. of Tsukuba, Japan, 2NIMS, Japan)

8th International Symposium on Surface Science (ISSS-8) Oct. 22, 2017, Tsukuba

(8) Doping to surface by adsorption of CuPc/ F16CuPc on surface superconductor of Si(111)-(7×3)-In

N. Sumi¹, Y. Yamada¹, M. Sasaki¹, S. Yoshizawa² and T. Uchihashi² (1Univ. of Tsukuba, Japan, 2NIMS, Japan)

8th International Symposium on Surface Science (ISSS-8) Oct. 22, 2017, Tsukuba

(9) Band structure of highly ordered Picene and DNTT thin film on Ag(110)

Y. Hasegawa, Y. Yamada and M. Sasaki (Univ. of Tsukuba, Japan)

8th International Symposium on Surface Science (ISSS-8) Oct. 22, 2017, Tsukuba

(10) Exciton Dynamics at the Controlled Interface of C60 and Pentacene

M. Iwasawa¹, Y. Hasegawa¹, T. Hosokai², H. Matsuzaki², Y. Nakayama³, R. Tsuruta³, Y.

Yamada¹ and M. Sasaki¹ (1Univ. of Tsukuba, Japan, 2AIST, Japan, 3Tokyo Univ. of

Science, Japan)
8th International Symposium on Surface Science (ISSS-8) Oct. 22, 2017, Tsukuba

(11) Hydrogen absorption on Pd(110), (210) studied with STM and HAS

M. Tominaga, T. Maeda, R. Shoji, R. Miyagi, Y. Yamada and M. Sasaki (Univ. of Tsukuba, Japan)

8th International Symposium on Surface Science (ISSS-8) Oct. 22, 2017, Tsukuba

(12) 熱活性型遅延蛍光 (TADF) 分子の配向制御と電子状態評価

(1) 筑波大, (2) 産総研, (3) 九大, (4) DIPIC) 山田洋一¹), 長谷川友里¹), 細貝拓也²), 中野谷一³), 安達千波矢³), Enrique Ortega⁴)

2017年真空・表面科学合同講演会 横浜市立大学金沢八景キャンパス

(13) ペンタセン単結晶上の C60/Pn 積層膜の界面制御と励起子ダイナミクス (1) 筑波大数理, (2) 産総研, (3) 東理大院) 岩澤 柁人¹), 長谷川友里¹), 細貝拓也²), 松崎

弘幸²), 中山泰生³), 鶴田諒平³), 山田洋一¹), 佐々木正洋¹)

2017年真空・表面科学合同講演会 横浜市立大学金沢八景キャンパス

(14) 高配向 Picene および DNTT 分子膜の電子状態 (1) 筑波大) 長谷川友里¹), 山田洋一¹), 佐々木正洋¹)

2017年真空・表面科学合同講演会 横浜市立大学金沢八景キャンパス

C60 からの電界電子放出パターン起源に関する研究 (1) 筑波大) 西山裕二¹), 安達学¹), 麻薙健¹), 山田洋一¹), 佐々木正洋¹)

2017年真空・表面科学合同講演会 横浜市立大学金沢八景キャンパス

(15) TADF 分子膜の配向制御及び発光特性計測 (1) 筑波大, (2) 産総研, (3) 九大) 南颯人¹), 佐々木正洋¹), 山田洋一¹), 細貝拓也²), 中野谷一³), 安達千波矢³), 長谷川友里¹)

2017年真空・表面科学合同講演会 横浜市立大学金沢八景キャンパス

(16) 水素吸蔵過程における Pd(110), (210) 表面の STM 計測及び HAS 計測

○ 冨永 正人¹、前田 拓郎¹、庄司 陸人¹、宮城 良世¹、山田 洋一¹、佐々木 正洋¹ (1. 筑波大数理)

2017年 第78回応用物理学会秋季学術講演会 (福岡国際会議場)

(17) 高配向 TADF 分子膜の分子レベル構造計測

○ (DC) 長谷川 友里¹、山田 洋一¹、細貝 拓也²、佐々木 正洋¹、中野谷 一³、安達 千波矢³ (1. 筑波大数理、2. 産総研、3. 九大 OPERA)

2017年 第78回応用物理学会秋季学術講演会 (福岡国際会議場)

(18) 単層 h-BN を用いた金属ナノ粒子の磁性制御

○ 渡邊 貴弘^{1,3}、山田 洋一¹、佐々木 正洋¹、小出 明広²、圓谷 志郎³、雨宮 健太⁴、境 誠司³ (1. 筑波大、2. 分子研、3. 量研機構、4. 高エネ研)

2017年 第78回応用物理学会秋季学術講演会 (福岡国際会議場)

(19) ペンタセン単結晶上の C60/Pn 積層膜の界面制御と励起子ダイナミクス ○ 岩澤 柁人¹、長谷川 友理¹、細貝 拓也²、松崎 弘幸²、鶴田 諒平³、中山 泰生³、山田 洋一¹、佐々木 正洋¹ (1. 筑波大数理、2. 産総研、3. 東理大院理工)

2017年 第78回応用物理学会秋季学術講演会 (福岡国際会議場)

(20) 超音速 He 原子線を用いた水素吸蔵中の Pd(110)表面の計測

山田洋一

材料中の水素機能解析技術 第 190 委員会
平成 29 年度第 3 回研究会

2017年10月13日(金)産総研・福島
再生可能エネルギー研究所

(21) 表面における機能性分子の自己組織化
によるマクロ機能創出の試み

山田洋一

日本学術振興会真空ナノエレクトロニクス
第 158 委員会第 117 回研究会

2017/4/27

機械振興会館、東京

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況(計 0 件)

取得状況(計 0 件)

〔その他〕

ホームページ等

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・数理物質系・講師

研究者番号：20435598

(2) 研究分担者

境誠司 (SAKAI Seiji)

量子科学技術研究開発機構・上席研究員

研究者番号：10354929