

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 30 年 5 月 30 日現在

機関番号：32665

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2016～2017

課題番号：16K14236

研究課題名(和文) 一本の単層カーボンナノチューブに金属/半導体接合を作り込む革命的作製手法の確立

研究課題名(英文) Establishment of Innovative Method to Create Metal/Semiconductor Junctions in One Piece of Single Walled Carbon Nanotube

研究代表者

山本 寛 (YAMAMOTO, Hiroshi)

日本大学・理工学部・教授

研究者番号：90130632

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)：極超短パルス光である自由電子レーザー(FEL)をCVD成長中に照射し、共鳴吸収させることにより、半導体的単層カーボンナノチューブ(SWNTs)のカイラリティと直径を制御する手法の確立を目指した。結果として、照射したFELのエネルギーに相当する均一なバンドギャップを有するSWNTsを選択的に成長させる新規手法の開発に成功した。さらに、FEL照射をスイッチすることによって、SWNTs成長中にカイラリティを変化させ、任意のタイミングでナノスケールの金属/半導体接合(MSJ)を創り出すことを目指した。その結果、部分的ではあるが、SWNTs内にMSJを作製することに成功した。

研究成果の概要(英文)：The purpose of this work is to establish a method for chirality and diameter control of semiconducting single walled carbon nanotubes (SWNTs) by irradiation and resonant absorption of ultra-short pulse laser, free electron laser (FEL) during CVD growth. As a result, a novel technique has been developed in order to prepare selectively semiconducting SWNTs with the uniform energy gap which is corresponding to the energy of irradiated FEL. Furthermore, we have tried to create nanoscale metal/semiconductor junctions (MSJ) as our wishes in a SWNT with its chirality changes by operating a FEL irradiation switch, and partially succeeded in preparation of MSJ in SWNTs.

研究分野：電子電気材料

キーワード：単層カーボンナノチューブ 自由電子レーザー カイラリティ 化学気相成長法 金属/半導体接合

### 1. 研究開始当初の背景

研究代表者はアルコール触媒気相成長過程において、極超短パルス光(自由電子レーザー:FEL)を共鳴吸収させ、単層カーボンナノチューブ(SWNTs)のカイラリティをその場成長制御する世界で初めての技術を開発しつつある。これは全く新しい独創的な手法であり、すでに波長 800 nm の FEL 照射によって半導体 SWNTs のみの選択成長が実現できることを発表した。関連して、科研費・基盤研究(B)(H20~22年度)において、FEL 照射によって分子を破壊すること無くポリマー体を形成できることを明らかにした(特許第 5032019 号「フラーレン重合体の製造方法」、発明者 山本、岩田)。続いて、科研費・基盤研究(C)(H24~26年度)およびカシオ科学振興財団・研究助成において、SWNTs 成長中に 800 nm の FEL を照射することにより SWNTs カイラリティ数を劇的に減少させ、すべて半導体 SWNTs とする選択成長できることを見出した(K. Sakai *et al.*, IEICE Trans. Electron. E94-C, 1861 (2011))。再現性も確認済みであり、100%半導体 SWNTs を直接作り分けることができる革新的作製技術となるだろうことを確信した。

また、ナノカーボン系デバイス化の実績も積んでいる(S. Sato *et al.*, Jpn. J. Appl. Phys. 53, 02BD04-1(2014))。こうした実績を踏まえた研究代表者が SWNT カイラリティその場成長制御法をデバイスプロセスへ適用すれば、革新的プロセスを実証することとなる。

SWNTs についての最新のデバイス化の報告例(K. Seike *et al.*, Jpn. J. Appl. Phys. 54, 06FF05(2015))では、Si 基板上の電極間に単一の SWNT を配置し、ゲート絶縁膜を介して単電子の移動に基づく素子応答性が調べられている。今後、ナノスケールのデバイス開発は、成長限界が指摘されている超高密度集積シリコンデバイスを視野に入れつつ、様々なアプローチによってポストシリコン基礎研究が展開されるものと考えられる。本研究の試みは、そうした研究動向の一つとして位置付けられる。

### 2. 研究の目的

本研究では、世界的に未だ報告がなされていない SWNTs カイラル制御手法を適用し、1本の SWNT の中にナノスケール金属/半導体接合を形成することを目指す。さらに、そのナノ接合系を組み込んだ新規のナノ電子デバイスモデルを提案・試作し、期待される超低消費電力・超高速スイッチング特性を確認することも目的としている。

具体的に、本研究には大きく三つの目的が設定されている。

第 1 に、照射波長を選択して、極超短パルス光である FEL を共鳴吸収させ、SWNTs の

直径と共鳴波長で決定されるカイラリティを成長中に完全にコントロールし、エネルギーバンドギャップ  $E_g$  が均一な高密度充填された半導体 SWNTs を様々に作り分ける手法を確立することである。

第 2 の目的は、研究代表者らの開発した手法を直接的に適用し、FEL 照射の有無によって、SWNTs 成長中に任意のタイミングでカイラリティを変化させ、ナノスケール金属/半導体接合を作製することに挑戦する。

第 3 の目的は、形成されるナノ接合に挟まれた構造を作製し、従来の半導体ナノドット素子で明らかにされてきたものと同様、非線形伝導応答性や量子効果に基づく超低消費電力・超高速動作が期待できるデバイスを作製するところにある。

### 3. 研究の方法

本研究の方法には、以下の三つの新規性、斬新性に要約される特徴がある。

第 1 に、SWNTs の物性を決定するカイラリティを CVD 成長中に制御する、「SWNT カイラリティその場制御」技術を提案し、その手法を確立しようとする。現状では、電気特性の不均一性をその場(*in-situ*)成長下で解決する方法は開発されていない。

第 2 は、上記の手法を直接的に適用し、FEL 照射条件を SWNTs 成長中に変えることによって、図 1(a)に示すように、1本の SWNT 成長時に、金属/半導体接合(Metal-Semiconductor Junction:MSJ)を形成する。

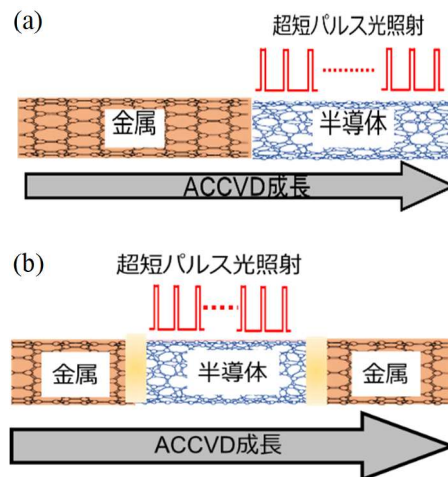


図 1 金属/半導体接合 (MSJ) 形成とナノ電子デバイスの概念図

(a) SWNT 成長中 FEL 照射による MSJ 形成

(b) 1本の SWNT ナノ電子デバイス

第 3 に、一本の SWNT の中に、任意の場所に所望の長さ、異なる伝導性を示す領域を作り込むことを目指す。これを端的に実証する

ため、二つの MSJ を含む、ハイブリッド構造 SWNT(図 1(b))を作製する素子形成プロセスを開発する。

具体的には、2種類のアルコール触媒 CVD (ACCVD) 装置を用いて、高品質 SWNTs の成長条件ならびにカイラリティに及ぼす超短パルスである FEL 照射効果を詳細に検討した。コールドウォール型化学気相成長(CW-CVD)法並びにホットウォール型 CVD(HW-CVD)法装置を用いて、FEL 照射(波長 700~1400 nm)によるカイラリティ制御結果を検討した。

CVD による SWNTs 成長中に FEL を照射するというプロセスの開発は本研究の最も重要なポイントである。図 2 に本学共通研究設備である FEL システム構成と基本性能を示す。

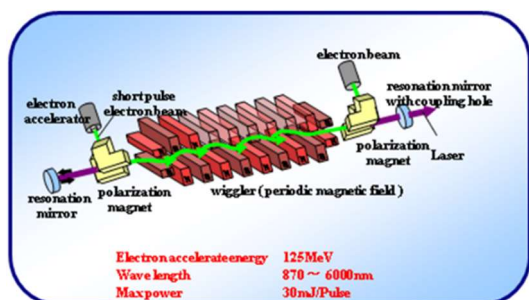


図 2 自由電子レーザー (FEL) システム

CW-CVD 装置においては *in-situ* ラマン測定を行った。HW-CVD 装置では、ラマン散乱、レーザー励起蛍光測定により、成長した SWNTs すべてのカイラリティを特定し、均一なカイラリティの SWNTs 成長を確認した。

SWNTs の径を触媒微粒の径で決定すれば、それに対応する固有の共鳴励起エネルギーが決定される。例えば、約 1.1 nm 径の SWNTs の半導体相は 800 nm 近傍の波長の光を共鳴吸収させられる。

実施例を示す。基板として ST-cut の人工水晶基板(10 mm × 10 mm)を用いた。基板上に付着した油分や塵の除去を目的として、アセトンで 5 分間、アセトンで 15 分間、その後エタノールで 5 分間超音波洗浄を行った。洗浄後、基板をるつぼに入れ 900°C の大気雰囲気電気炉にて 13 時間のアニール処理を行った。SWNTs の触媒となる Co と Fe を、RF マグネトロンスパッタ法により成膜した。Fe を 90 秒間成膜後、Co を 60 秒間成膜したが、平均膜厚は約 0.20 nm であった。基板全面に触媒粒子を成膜してしまうと、触媒粒子が面内配向成長しようとする SWNTs の妨げになり、配向性の低下に繋がるため、楕円パターンメタルマスクを用いて触媒成膜を行った。

SWNTs 成長には HW-CVD 装置を用いた。石英管内の残留炭素の除去を目的として、850 °C で 30 分間のアニール処理を行った。

その後、基板を石英管内の MAIN-HEATER 内に設置し成長を行った。還元剤として水素 2% とアルゴン 98% の混合ガスを 200 sccm 流

し、1kPa で 850 °C までの昇温を行った。その後 30 分間温度を保ち還元処理を行った。還元処理後、気化状態のエタノールを石英管内に流入し、10 分間 1 kPa で SWNTs 成長を行った。その際エタノールの流量が一定に保たれるように、エタノールの容器にキャリアガスとしてアルゴン水素混合ガスを 200 sccm 流入させ、ヒーターにより 30 °C までの昇温を行った。エタノールの流入と同時に波長 800 nm の FEL 照射を行った。SWNTs 成長後、エタノールを止めて、200 sccm のアルゴン水素混合ガスを流入し、1 kPa で降温度を行った。比較のため、SWNTs 成長中に FEL を照射していないサンプルの作製も行った。

走査型プローブ顕微鏡(SII 社製;SPA400)のダイナミックフォースモード(Dynamic Force Mode : DFM)を用いて基板表面の形状測定を行った。また、顕微ラマン分光装置(Kaiser Optical Systems 社製;Hololab 5000R)を用いて励起波長 532 nm における振動解析を行った。ラマン分光により得られた 1590  $\text{cm}^{-1}$  付近の六員環に起因する G-Band と 1340  $\text{cm}^{-1}$  付近の六員環の欠損やアモルファスに起因する D-Band、120~300  $\text{cm}^{-1}$  付近の SWNTs 特有の Radial Breathing Mode(RBM)の有無を確認した。

一方、FEL 照射の有無によるカイラリティの切り替えを行いながら、1 本の SWNT 成長過程において、 $E_g$  の異なる接合 MSJ を形成することを試みた。その第一段階として、r 面単結晶サファイア基板を用いて、ホットウォール型 CVD 法により高品質面内配向 SWNTs の成長条件を探索した。炭素源にはアセチレンを用い、蒸着 Fe 微粒子を触媒とし、雰囲気圧力 1 kPa で基板を 850°C まで昇温した。また、SWNTs 成長時に FEL 未照射から照射へ切り替えることにより、金属的な SWNTs から半導体的 SWNTs を成長させた。

#### 4. 研究成果

得られた SWNTs の特性について、FEL 照射有無の結果を比較して表 1 にまとめる。

表 1 RBM 波数, 直径, 電気特性, カイラル指数における FEL 照射の効果

(a)未照射

ラマン励起波長 (nm)	RBM ( $\text{cm}^{-1}$ )	直径 (nm)	電気特性	バンドギャップ (eV)	カイラル指数		
532	232.6	1.07	金属	2.40	(8,8)	(12,3)	(13,1)
785	156.3	1.59	金属	1.60	(17,5)	(13,10)	

(b)FEL 照射

ラマン励起波長 (nm)	RBM ( $\text{cm}^{-1}$ )	直径 (nm)	電気特性	バンドギャップ (eV)	カイラル指数		
785	156.4	1.59	金属	1.60	(13,10)	(17,5)	
	236.7	1.05	半導体	1.60	(10,5)	(11,4)	(12,2)
	227.7	1.08	半導体	1.60	(9,7)	(10,6)	
	218.8	1.13	半導体	1.60	(12,4)	(13,2)	(14,0)

FEL 未照射では励起波長 532 nm 及び 785 nm の両方で RBM ピークが観測されたのに対し、800 nm の FEL 照射時は励起波長 785 nm のみ RBM ピークが観測された。このことから、FEL 照射により FEL のエネルギーに相当する  $E_g$  を有する SWNTs が選択的に成長することが確かめられた。FEL 未照射では、励起波長 532 nm においては  $236.6 \text{ cm}^{-1}$  に RBM を確認した。また、励起波長 785 nm において  $156.3 \text{ cm}^{-1}$  に RBM を確認した。FEL 照射時では、励起波長 785 nm において  $156.4 \text{ cm}^{-1}$ 、 $218.8 \text{ cm}^{-1}$ 、 $227.7 \text{ cm}^{-1}$ 、 $236.7 \text{ cm}^{-1}$  に RBM を確認した。

結果として、FEL 未照射時の SWNTs は  $E_g$  約 1.60 eV、直径 1.59 nm 及び  $E_g$  約 2.40 eV、直径 1.07 nm の 2 種類である。これに対し、FEL 照射時の SWNTs は  $E_g$  約 1.60 eV、直径 1.59 nm 及び  $E_g$  約 1.60 eV、直径 1.05-1.13 nm 程度である。これらのことから、FEL 照射の有無にかかわらず  $E_g$  は一定であり、直径のみが変化していることがわかる。したがって、SWNTs の直径を 1.05-1.13 nm 程度のみに限定できれば、すべて半導体の SWNTs を成長させることができると考えられる。

FEL を照射して面内配向成長した SWNTs について、ラマンスペクトルと電気特性測定に基づいて評価した。FEL 照射時・未照射時ともに基板上に面内配向成長した SWNTs を確認した。多波長ラマンスペクトル解析結果から、照射した波長 800 nm FEL のエネルギーに対応したバンドギャップを持つ SWNTs が選択的に成長することが確かめられた。

さらに、成長方向のそろった SWNTs の作製条件を明らかにすることを試みた。単結晶基板のステップ-テラス溝に沿って SWNTs を配向成長させることに成功した。また、FEL の照射切り替えによって、一本の SWNT 成長中にカイラリティを変化させる実験を遂行し、金属/半導体接合を形成できる可能性を見出した。残念ながら、目標とした一本の SWNT の中で、明確な相変化を直接観察出来ず、最終的な目標とした、ナノスケールの接合に挟まれた構造を形成し、非線形伝導応答性や量子効果に基づく新規デバイスを作製するには至らなかった。

結論として、本研究において設定した三つの目的のうち、第 1 並びに第 2 の一部について達成することが出来た。

## 5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 4 件)

① Takashi Sumida, Kosuke Hashimoto, Shinjiro Fukui, Tsuyoshi Hirato, Tomoko Nagata, Hiroshi Yamamoto, and Nobuyuki Iwata, “Magnetic Properties and Crystal Structure Analysis of Ferromagnetic Metal /  $r$ -plane Oriented  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  Multilayer”, *Trans. Mater. Res. Soc. Jpn.* **42**

(2017)1-3 (査読有り)

② Kosuke Hashimoto, Takashi Sumida, Shinjiro Fukui, Tsuyoshi Hirato, Tomoko Nagata, Hiroshi Yamamoto, and Nobuyuki Iwata, “Crystal Growth of  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  Thin Films on  $\text{YAlO}_3(001)$  Substrate”, *Trans. Mater. Res. Soc. Jpn.* **42** (2017)5-7 (査読有り)

③ Tomoko Nagata, Hiroyuki Okazaki, Takanori Wakita, Tetsushi Fukura, Nobuyuki Iwata, Hiroshi Yamamoto, Takayoshi Yokoya, and Naoshi Ikeda, “Control of Fermi Level by Variation of Charge Ordering State in  $\text{Yb}_{1-x}\text{Ti}_x\text{Fe}_2\text{O}_4$ ”, *Trans. Mater. Res. Soc. Jpn.* **41** (2016) 269-271 (査読有り)

④ Takaaki Inaba, Yuta Watabe, Keisuke Oshima, Chun Wang, Shohei Ohashi, Huaping Song, Hirotaka Matsuyama, Tomoko Nagata, Takuya Hashimoto, Kouichi Takase, Hiroshi Ishida, Yoshiki Takano, Kousaku Shimizu, Hiroshi Yamamoto, and Nobuyuki Iwata, “Electric and Magnetic properties of  $\text{BiFe}_{1-x}\text{Mn}_x\text{O}_3$  Thin Films and  $\text{CaFeO}_x/\text{BiFe}_{1-x}\text{Mn}_x\text{O}_3$  Superlattices” *Trans. Mater. Res. Soc. Jpn.* **41**(2016)263-267 (査読有り)

[学会発表] (計 49 件) (招待講演 1 件含む)

① Hiroshi Yamamoto, Growth Control of Single-Walled Carbon Nanotubes by In-Situ Irradiation of Free Electron Laser in CVD Process, OB-11, 3<sup>rd</sup> Japan-Thailand Joint Symposium on Advanced Nanomaterials and Devices for Electronics and Photonics, 2018

② T. Nagata, T. Onodera, H. Yamamoto, and N. Iwata, Fabrication of Electronic Ferroelectric  $\text{YbFe}_2\text{O}_4$  Film under Stoichiometric Consideration, C-P6-006, 27th Annual Meeting of MRS-J (2017), 2017

③ S. Ohashi, H. Matsuyama, T. Akazawa, T. Koyama, T. Okamoto, T. Nagata, H. Song, H. Yamamoto, and N. Iwata, Electric Properties and The origin of induced Ferromagnetism in  $[(\text{CaFeO}_x)_n/(\text{LaFeO}_3)_n]$  ( $n=1, 3, 5, 7$ ) Artificial Superlattices, C-P7-013, *ibid*, 2017

④ H. Matsuyama, S. Ohashi, T. Koyama, T. Akazawa, T. Okamoto, T. Nagata, H. Song, H. Yamamoto, and N. Iwata, Electric Properties of  $\text{BiFe}_{1-x}\text{Mn}_x\text{O}_3$  Films Related Superlattices Grown by Pulsed Laser Deposition method, C-P7-014, *ibid*, 2017

⑤ S. Fukui, T. Hirato, T. Nagata, H. Yamamoto and N. Iwata, Fabrication and Structure Analysis of  $(\text{Cr}_{1-x}\text{Fe}_x)_2\text{O}_3$  Film by Sputtering Method, C-P7-016, *ibid*, 2017

⑥ Hiroshi Yamamoto, Application of Free Electron Laser in Synthesis Process of Nano Carbon Materials, Xi'an University of Technology-College of Sci. & Technol., Nihon University Joint Workshop, Xi'an University of Technology, Xi'an, 2017

⑦ シャーマ ロヒト, 保延, 高橋, 永田, 岩田, 山本,  $r$  面サファイア基板上に成長させた単層カーボンナノチューブの自由電子レーザ照射

- 効果, CPM2017-59, 電子情報通信学会 電子部品・材料研究会 (CPM), 2017
- ⑧倉金, 荒木, 鈴木, 永田, 岩田, 高橋, 山本, 金属インターカレートした 2 層グラフェンの電気特性と高圧印加による効果, CPM2017-60, 全上, 2017
- ⑨榎本, 福井, 平戸, 小野寺, 永田, 山本, 岩田, 酸化物単結晶基板上に成膜した Cr2O3 薄膜の結晶性向上のための成長条件探索, CPM2017-61, 全上, 2017
- ⑩平戸, 福井, 榎本, 小野寺, 永田, 山本, 岩田, Co/Pt/Cr2O3 単結晶積層膜の結晶構造解析およびホール効果, CPM2017-62, 全上, 2017
- ⑪N. Iwata, T. Akazawa, S. Ohashi, H. Matsuyama, T. Koyama, H. Song, J. Geessinck, G. Koster, M. Huijben, G. Rijnders, T. Nagata, H. Yamamoto, Mechanism and Development of Induced Ferromagnetism at the Interface in CaFeOx / LaFeO3 Superlattices and Multilayers, A4-O01-006, International Union of Materials Research Societies - The 15th International Conference on Advanced Materials (IUMRS-ICAM 2017), 2017
- ⑫T. Nagata, Y. Watabe, T. Koyama, K. Nakayama, H. Yamamoto, and N. Iwata, Stoichiometric Study of Electronic Ferroelectric, YbFe2O4 Film, A4-P31-002, ibid, 2017
- ⑬ S. Fukui, T. Hirato, T. Nagata, H. Yamamoto, and N. Iwata, Fabrication and Structure Analysis of (Cr1-xFex)2O3 Film by Sputtering Method, A4-P31-003, ibid, 2017
- ⑭ T. Akazawa, S. Ohashi, H. Matsuyama, T. Koyama, H. Song, J. Geessinck, G. Koster, G. Rijnders, T. Nagata, H. Yamamoto, and N. Iwata, Preparation and Magnetic Property of CaFeO3/LaFeO3 Hetero-Structure Grown on SrTiO3(001) and LaAlO3(001) Substrates, A4-P31-004, ibid, 2017
- ⑮H. Matsuyama, C. Wang, H. Song, T. Akazawa, S. Ohashi, T. Koyama, T. Nagata, H. Yamamoto, and N. Iwata, Crystal Structure Analysis and Interface Electric Properties of LaMnO3/BiFeO3/SrRuO3 Multilayered Thin Films Grown by Pulsed Laser Deposition Method, A4-P31-007, ibid, 2017
- ⑯ S. Ohashi, H. Matsuyama, T. Akazawa, T. Koyama, H. Song, J. Geessinck, G. Koster, M. Huijben, G. Rijnders, T. Nagata, H. Yamamoto, and N. Iwata, The Origin of Induced Ferromagnetism in [(CaFeOx)/(LaFeO3)] Artificial Superlattices, A4-P31-008, ibid, 2017
- ⑰ H. Matsuyama, S. Ohashi, T. Koyama, T. Akazawa, H. Song, T. Nagata, H. Yamamoto, and N. Iwata, Crystal Structure Analysis and Magnetic / Electric Properties of [CaFeOx/BiFeO3] Superlattice Grown on SrTiO3(110) Substrate, A4-P31-009, ibid, 2017
- ⑱T. Hirato, S. Fukui, T. Nagata, H. Yamamoto, and N. Iwata, Exchange Bias Field of Co/Pt/r-oriented and c-oriented Cr2O3 Multilayer, A4-P31-010, ibid, 2017
- ⑲ K. Honobe, T. Nagata, N. Iwata, and H. Yamamoto, Chirality Control and Electric Property of in-plane Oriented Single-Walled Carbon Nanotubes Grown on Single Crystal Substrate under Free Electron Laser Irradiation during Growth, B3-P29-001, ibid, 2017
- ⑳N. Kuragane, T. Nagata, N. Iwata, H. Yamamoto, and H. Takahashi, Fabrication and Electric Properties of Fe and Ca Intercalated Bilayer Graphenes, B3-P29-002, ibid, 2017
- ㉑山本, 岩田, 永田, 高圧力下での極超短パルスレーザー照射による C60 分子の重合反応促進, DEI-17-80, 電子情報通信学会 有機エレクトロニクス研究会 (OME), 2017
- ㉒大橋, 松山, 赤澤, 宋, 小山, 岡本, 館野, 永田, 山本, 岩田, CaFeOx / LaFeO3 人工超格子界面に現れる誘起強磁性とその起源, CPM2017-29, 電子情報通信学会 電子部品・材料研究会 (CPM), 2017
- ㉓松山, 大橋, 小山, 赤澤, 宋, 館野, 岡本, 永田, 山本, 岩田, BiFe1-xMnxO3 単相膜及び [CaFeOx/BiFe1-xMnxO3] 人工超格子の面直方向に関する電気特性, CPM2017-30, 全上, 2017
- ㉔ 永田, 小野寺, 山本, 岩田, 電子型強誘電体 YbFe2O4 薄膜の作製と化学当量性の評価, CPM2017-28, 全上, 2017
- ㉕ 山本 寛, [招待講演]電子材料研究に関わる私的 40 年史, CPM2017-31, 全上, 2017
- ㉖保延, 高橋, シャーマ ロヒト, 永田, 岩田, 山本, 単層カーボンナノチューブ成長中の配向制と自由電子レーザー照射効果, DEI-17-67/EFM-17-5, 電気学会 誘電・絶縁材料/電子材料合同研究会, 2017
- ㉗星野, 倉金, 櫻井, 山岸, 永田, 岩田, 山本, 金属層をインターカレートした 2 層グラフェンの電気特性, C1-021-002, 第 26 回日本 MRS 年次大会, 2016
- ㉘倉金, 星野, 櫻井, 山岸, 永田, 岩田, 山本, 金属層をインターカレートした 2 層グラフェン作製条件最適化, C1-P21-011, 全上, 2016
- ㉙ K. Hashimoto, T. Sumida, S. Fukui, T. Hirato, Y. Yanagihara, C. Wang, T. Akazawa, T. Koyama, Q. Zhang, H. Song, T. Nagata, H. Yamamoto, and N. Iwata, Magnetic and Electric Properties of Co/Pt/r-Oriented Cr2O3/Ca1-xCexMnO3 Multilayer Grown on YAlO3 (001) Substrate, A3-P21-002, ibid, 2016
- ㉚T. Sumida, T. Hirato, K. Hashimoto, S. Fukui, Y. Yanagihara, T. Nagata, H. Yamamoto, and N. Iwata, Exchange Bias Field and Anomalous Hall Effect of Co/Pt/ r-oriented Cr2O3 multilayer, A3-P21-003, ibid, 2016
- ㉛T. Hirato, K. Hashimoto, T. Sumida, S. Fukui, Y. Yanagihara, C. Wang, T. Akazawa, T. Koyama, Q. Zhang, H. Song, T. Nagata, H. Yamamoto, and N. Iwata, Preparation of Co/Pt/r-oriented Cr2O3/Ca1-xCexMnO3 multilayer grown on YAlO3(001) substrate, A3-P21-004, ibid, 2016
- ㉜T. Hirato, K. Hashimoto, T. Sumida, S. Fukui, Y. Yanagihara, C. Wang, T. Akazawa, T. Koyama, Q.

Zhang, H. Song, T. Nagata, H. Yamamoto, and N. Iwata, Fabrication of Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and (Cr<sub>1-x</sub>Fe<sub>x</sub>)<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Films by Sputtering Method, A3-P21-005, *ibid*, 2016

③③ T. Akazawa, S. Ohashi, H. Matsuyama, T. Koyama, Q. Zhang, C. Wang, Y. Watabe, H. Song, T. Nagata, H. Yamamoto, and N. Iwata, Preparation of CaFeO<sub>3</sub>/LaFeO<sub>3</sub> Hetero-interface on SrTiO<sub>3</sub>(001) and LaAlO<sub>3</sub>(001) Substrates, A3-P21-006, *ibid*, 2016

③④ H. Matuyama, W. Chun, S. Ohashi, Q. Chang, H. Song, Y. Watabe, K. Takase, T. Nagata, T. Hashimoto, H. Yamamoto, and N. Iwata, Magnetic and Electric Properties of BiFeO<sub>3</sub> and BiFe<sub>1-x</sub>Mn<sub>x</sub>O<sub>3</sub> Films Related Superlattices Grown by Pulsed Laser Deposition method, A3-P21-007, *ibid*, 2016

③⑤ C. Wang, Q. Zhang, S. Ohashi, H. Matsuyama, T. Koyama, T. Akazawa, H. Song, Y. Watabe, T. Nagata, K. Takase, T. Hashimoto, H. Yamamoto, and N. Iwata, Growth of BiFeO<sub>3</sub> Films Using Bi Excess Bi<sub>1+x</sub>FeO<sub>3</sub> Target Prepared by Pechini Method, A3-P21-010, *ibid*, 2016

③⑥ T. Nagata, Y. Watabe, C. Wang, T. Koyama, H. Yamamoto, and N. Iwata, Crystal Structure and Stoichiometry of Electronic Ferroelectric, YbFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub> Film, A3-P21-011, *ibid*, 2016

③⑦ S. Ohashi, H. Matsuyama, T. Akazawa, T. Koyama, Y. Watabe, C. Wang, Q. Zhang, K. Takase, T. Hashimoto, T. Nagata, H. Song, H. Yamamoto, and N. Iwata, Electric Properties of [(CaFeO<sub>x</sub>)/(LaFeO<sub>3</sub>)] Artificial Superlattices, A3-022-006, *ibid*, 2016

③⑧ 松山, 王, 大橋, 張, 宋, 渡部, 永田, 橋本, 山本, 岩田, SrTiO<sub>3</sub> 基板上に成膜した BiFeO<sub>3</sub>、BiFe<sub>1-x</sub>Mn<sub>x</sub>O<sub>3</sub> 薄膜の結晶構造解析及び電氣的磁氣的特性, CPM2016-66, 電子情報通信学会 電子部品・材料研究会 (CPM), 2016

③⑨ 橋本, 隅田, 福井, 平戸, 柳原, 王, 赤澤, 小山, 張, H. Song, 永田, 山本, 岩田, Co/Pt/Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Ca<sub>0.96</sub>Ce<sub>0.04</sub>MnO<sub>3</sub>//YAlO<sub>3</sub> 積層膜の結晶構造解析及び電気特性, CPM2016-67, 全上, 2016

④⑩ 川口, 保延, 石川, 永田, 山本, 岩田, 自由電子レーザー照射によってカイラリティ制御された面内配向単層カーボンナノチューブの電気特性, CPM2016-68, 全上, 2016

④⑪ S. Ohashi, H. Matsuyama, T. Akazawa, T. Koyama, Y. Watabe, C. Wang, Q. Zhang, K. Takase, T. Hashimoto, T. Nagata, H. Song, H. Yamamoto, and N. Iwata, Preparation and Electric / Magnetic Properties of CaFeO<sub>x</sub>/LaFeO<sub>3</sub> Artificial Superlattices, P-18, International workshop on novel photo induced phenomena and applications, 2016

④⑫ 永田, 岩田, 山本, 自由電子レーザー照射による単層カーボンナノチューブ成長中のカイラリティ制御, 3, 将来加工技術第 136 委員会平成 28 年度 第 4 回研究会, 2016

④⑬ 倉金, 星野, 櫻井, 山岸, 永田, 岩田, 山本,

金属層をインターカレートした二層グラフェンの作製と電気特性, CPM 2016-55, 電子情報通信学会 電子部品・材料研究会 (CPM), 2016

④⑭ 保延, 川口, 石川, 永田, 岩田, 山本, 自由電子レーザー照射下で成長させた単層カーボンナノチューブのカイラリティ制御及び電気特性, CPM 2016-56, 全上, 2016

④⑮ 隅田, 平戸, 橋本, 福井, 柳原, 永田, 山本, 岩田, Co/Pt/Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 積層膜における交換バイアス磁場の電場磁場冷却効果, CPM2016-25, 電子情報通信学会 電子部品・材料研究会 (CPM), 2016

④⑯ 永田, 渡部, 王, 小山, 山本, 岩田, 電子型強誘電体 YbFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub> 薄膜の作製と結晶構造の評価, CPM2016, 全上, 2016

④⑰ 大橋, 松山, 赤沢, 渡部, 王, 張, 小山, 村田, 宋, 橋本, 高瀬, 永田, 山本, 岩田, [(CaFeO<sub>x</sub>)<sub>n</sub>/(LaFeO<sub>3</sub>)<sub>n</sub>]<sub>m</sub> {m=14 for n=3, 5, 7 and (n, m)=(1, 98), (3, 33), (5, 20)} 人工超格子の作製と結晶構造解析, CPM2016-31, 全上, 2016

④⑱ C. Wang, K. Oshima, T. Inaba, H. Song, Y. Watabe, Q. Zhang, T. Nagata, T. Hashimoto, K. Takase, H. Yamamoto, and N. Iwata, Preparation and Evaluation of BiFeO<sub>3</sub> Thin Films using Bi excess Bi<sub>1+δ</sub>FeO<sub>x</sub> Target Synthesized by Pechini Method, P55, 13th Russia/CIS/Baltic/Japan Symposium on Ferroelectricity (RCBJSF) and International Workshop on Relaxor Ferroelectrics 2016 (IWRWF), 2016

④⑲ 橋本, 隅田, 福井, 平戸, 柳原, 永田, 山本, 岩田, YAlO<sub>3</sub>(001)基板上での Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 薄膜の成膜条件の最適化および結晶構造解析, CPM2016-18, 電子情報通信学会 電子部品・材料研究会 (CPM)・EMD・OME 共催研究会, 2016

[その他]

ホームページ等

<http://yamanoya.ecs.cst.nihon-u.ac.jp/>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

山本 寛 (YAMAMOTO, Hiroshi)

日本大学・理工学部・教授

研究者番号: 90130632

### (2) 研究分担者

永田 知子 (NAGATA, Tomoko)

日本大学・理工学部・助教

研究者番号: 00733065

岩田 展幸 (IWATA, Nobuyuki)

日本大学・理工学部・准教授

研究者番号: 20328686