

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 15 日現在

機関番号：15401

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25420331

研究課題名(和文) ワイドバンドギャップSiC半導体による放射線耐性に優れたCMOS集積回路の研究

研究課題名(英文) High radiation resistant CMOS integrated circuits using Wide-Band Gap SiC Semiconductor

研究代表者

黒木 伸一郎 (Shin-Ichiro, Kuroki)

広島大学・ナノデバイス・バイオ融合科学研究所・准教授

研究者番号：70400281

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,900,000円

研究成果の概要(和文)：福島第一原子力発電所廃炉では超高放射線環境での作業が必要であり、ロボットの投入による速やかな廃炉活動が求められている。しかし通常ロボットの頭脳であるSi半導体集積回路は、放射線耐性が低く、高い放射線環境下では容易に破損する。本研究では4H-SiC半導体による放射線耐性に優れた集積回路の研究を行った。本研究で作製した4H-SiC MOSFETsについて高ガンマ線曝露実験および高温動作実験を行い、それぞれ1.13 MGy曝露後の動作および、450 °Cでの高温動作を示した。また集積回路の基本構造であるインバータ回路について、nMOSインバータ、Pseudo-CMOSインバータ回路の研究を行った。

研究成果の概要(英文)：Radiation-hardened electronics has been required for the decommissioning of the Fukushima-1 plant accident. 4H-SiC with wide-bandgap energy is one of the candidate for base semiconductor for the radiation-hardened electronics. In this work, 4H-SiC nMOSFETs with As-doped S/D and NbNi silicide contacts were demonstrated in harsh environments of high gamma-ray radiation up to over 100 Mrad and high-temperature up to 450 °C. For an integrated logic circuits, pseudo-CMOS and nMOS inverters were also demonstrated.

研究分野：半導体デバイス・プロセス

キーワード：極限環境エレクトロニクス シリコンカーバイド 集積回路 MOSFET 耐放射線 耐高温 原子力発電所廃炉

1. 研究開始当初の背景

2011年3月11日(金)に東日本大震災が発生した。福島第一原子力発電所(福島第一原発)も、地震及び津波で被災した。廃炉に向けた工程表では廃炉完了は最長で40年後とし、4年後~40年後で原子炉格納容器を水で満たした冠水状態にし、並行して原子炉内を遠隔操作で調査するロボット(除染装置)など、廃炉に必要な機材を準備するとしている。福島第一原発の原子炉格納容器内の放射線量は、10Gy/h程度であり、この環境下で動作可能なロボット開発が求められている。しかしロボット駆動には、その制御用半導体集積回路(LSI)CPUやモータドライブ回路、各種センサが必須であり、原子炉内で継続して動作可能な強い放射線耐性をもつ半導体素子の開発が待たれている。

2. 研究の目的

原子炉廃炉工程には高放射線環境での作業が必要であり、ロボット(除染装置)の投入による速やかな廃炉活動が求められている。しかし通常ロボットの頭脳であるシリコン半導体集積回路は、放射線耐性が低く、高い放射線環境下では容易に破損する。本研究では、ワイドバンドギャップ4H-SiC半導体による放射線耐性に優れた集積回路の研究を行い、廃炉工程に関わるロボット(除染装置)群の頭脳を構築する。

3. 研究の方法

本研究ではまず4H-SiC MOSFETsのためのデバイス構造設計および各プロセスの構築を行った。特にデバイス設計ではしきい値電圧設計、プロセスではソース・ドレイン領域へのオーミックコンタクトの研究、ゲート絶縁膜の研究を進めた。これら設計・プロセス構築後、4H-SiC MOSFETs デバイスの試作を行い、動作特性の研究を進めた。さらに高放射線曝露後および高温での4H-SiC MOSFETs 動作実験を行った。単体デバイスでの評価後、Pseudo-CMOS インバータ回路および nMOS インバータ回路を試作し研究を進めた。

4. 研究成果

(1) 4H-SiC MOSFETs プロセスの構築

4H-SiC MOSFETs 作製に先立ち、S/D オーミック電極の研究を進めた。通常 Ni のみのシリサイドによりオーミックコンタクトが取られるが、NiSi と SiC の界面に炭素凝集が形成される。本研究ではこれを抑制するために、炭素侵入型金属の一つである Nb を導入し、S/D 電極を形成した。S/D オーミック電極として、Ni/Nb 積層構造(膜厚:100 nm)および NiNb 混合構造(膜厚: 100nm)を SiC 基板

上に作製し、シリサイド化電極を形成し、オーミック抵抗の評価を行った。Ni/Nb 積層構造、および NiNb 混合構造ではそれぞれ $1 \times 10^{-3} \Omega \text{cm}^2$ 、 $4 \times 10^{-3} \Omega \text{cm}^2$ となり、Ni/Nb 積層構造の方が低抵抗化したため、本 MOSFETs 作製では、この構造を適用した。

4H-SiC MOSFETs のしきい値電圧はチャネル不純物濃度により制御した。この計算には Sentaurus TCAD シミュレータを用い、しきい値電圧を 3 V にするために、不純物濃度を $6.0 \times 10^{17} \text{cm}^{-3}$ とした。

(2) 4H-SiC MOSFETs デバイスの研究

4H-SiC (0001) 4° 基板上に、3 μm の p 型エピタキシャル層を形成した。不純物は Al であり、濃度は $6.0 \times 10^{17} \text{cm}^{-3}$ とした。nMOSFET はセルフアラインでないプロセスで作製した。この基板上に、APCVD により SiO₂ ハードマスクを形成し、さらに S/D 領域形成に合わせてエッチングを行い、S/D 注入のためのマスクとした。S/D 領域に As イオンを 500°C 加熱下で注入した。注入深さは 70 nm のボックスプロファイルとし、不純物濃度は $5.0 \times 10^{19} \text{cm}^{-3}$ である。注入後、カーボン膜をスパッタ法により成膜し、1800°C で不純物活性化アニールを行った。その後熱酸化膜形成を 1150°C で行った。酸化膜厚は 10 nm と 20 nm である。S/D 領域上にコンタクトホールを形成し、Nb/Ni の多層膜を形成し、950°C でシリサイド化を行った。S/D 電極形成後、Al ゲート電極を形成し、APCVD で層間絶縁膜を形成した後、Al 電極パッドを形成した。図1に作製したデバイスの断面図と顕微鏡写真を示す。

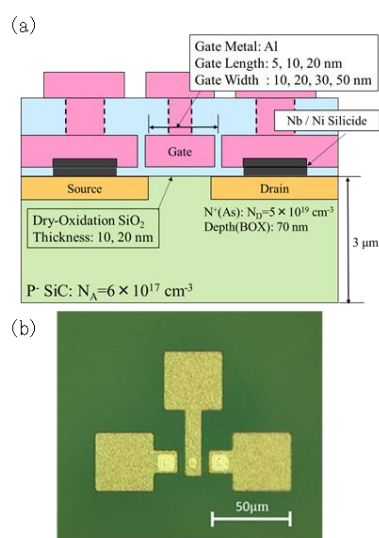


図1. 作製した4H-SiC MOSFETs: (a)断面図と (b)顕微鏡写真。

(3) 高放射線曝露後および高温での 4H-SiC MOSFETs 動作実験

ガンマ線照射によるトータルドーズ試験は、Co60 をガンマ線源として、室温にて行っ

た。この実験は日本原子力研究開発機構（現・国立研究開発法人量子科学技術研究開発機構）Co60 ガンマ線照射施設で行った。照射による I_D - V_G 特性の変化を図 2 に示す。オン電流、しきい値には顕著な変化は確認されないが、113 Mrad 照射後に若干のオフ電流の増加が確認された。電子電界移動度の変化は、酸化膜 10 nm の場合は、比較的变化が少なく、その変化は 8%にとどまるが、酸化膜 20 nm の場合、照射による移動度の増加が確認され、113Mrad 照射後 26%の増加が確認された。しきい値電圧はガンマ線照射により、電圧の低下が確認されたが、酸化膜 10 nm, 20 nm のデバイスの両方で、113Mrad 照射後の 6%の低下であった。

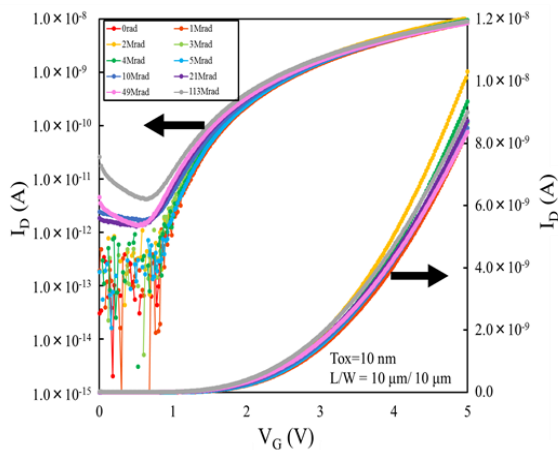


図2.Co60ガンマ線照射による I_D - V_G 特性の変化。

図 3 に 450°C での I_D - V_D 特性を示す。線形および飽和領域で適切な特性を示していることが分かる。図 4 に I_D - V_G 特性を示す。この図ではデバイスの動作時温度を室温から 450°C まで変化させている。酸化膜厚 10 nm, 20 nm のデバイスの両方で、450°C までは動作が確認された。温度を上昇させるにつれて、電流量が増加し、さらにしきい値電圧が低下した。

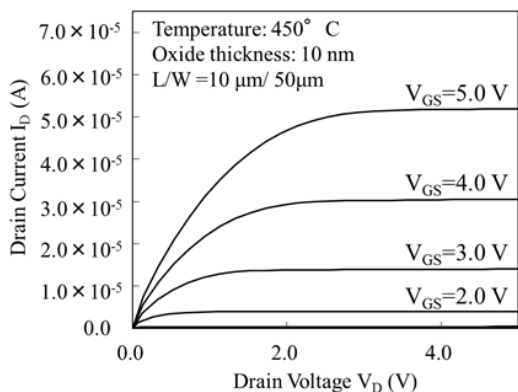


図3. 4H-SiC MOSFETsの450°Cでの I_D - V_D 特性

(4)4H-SiC Pseudo-CMOS インバータ回路

4H-SiC nMOSFETs のデバイス特性評価を受けて、n MOS インバータおよび Pseudo-CMOS インバータ回路を作製した。

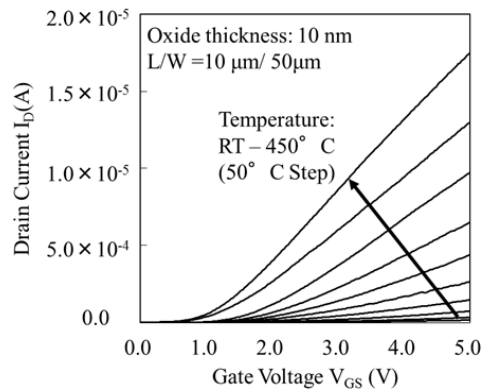


図4. I_D - V_G 特性: 温度を室温から 450°C まで変化させている。

nMOS インバータでは負荷抵抗として nMOS を用いる。また Pseudo-CMOS インバータ回路では 4 個の nMOSFETs を用いて作製した。nMOS インバータでは電圧スウィングが、電源電圧からしきい値電圧を引いたものに近くなるため、結果的に電圧スウィングが低くなる。これに対して Pseudo-CMOS 回路を用いることで、ほぼ電源電圧値に等しい、高い電圧スウィングを実現した。これにより 4H-SiC MOSFETs による論理集積回路実現の可能性を示した。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 4 件)

1. S-I. Kuroki, H. Nagatsuma, M. De Silva, S. Ishikawa, T. Maeda, H. Sezaki, T. Kikkawa, M. Östling, and C.-M. Zetterling, "Characterization of 4H-SiC nMOSFETs in Harsh Environments, High-Temperature and High Gamma-Ray Radiation," Mat. Sci. Forum, 858, pp864-867 (2016). 査読有.
2. Milantha De Silva, Seiji Ishikawa, Takamaro Kikkawa, and Shin-Ichiro Kuroki, "Low resistance ohmic contact formation on 4H-SiC c-face with NbNi silicidation using nano-second laser annealing," Mat. Sci. Forum, 858, pp549-552 (2016). 査読有.
3. H. Nagatsuma, S-I. Kuroki, M. De Silva, S. Ishikawa, T. Maeda, H. Sezaki, T. Kikkawa, M. Östling, and C.-M. Zetterling, "4H-SiC nMOSFETs with As-doped S/D and NbNi Silicide ohmic contacts," Mat. Sci. Forum, 858, pp573-576 (2016). 査読有.
4. Milantha de Silva, Tadashi Sato, Shin-Ichiro Kuroki and Takamaro Kikkawa, "Low resistance Ohmic Contact Formation of Ni Silicide on Partially Si Ion Implanted n+ 4H-SiC," Mat. Sci. Forum, 778-780, pp689-692 (2014). 査読有.

[学会発表] (計 26 件)

1. **(Invited)** Shin-Ichiro Kuroki, Hirofumi Nagatsuma, Tatsuya Kurose, Milantha De Silva, Seiji Ishikawa, Tomonori Maeda, Hiroshi Sezaki, Takamaro Kikkawa, Takahiro Makino, Takashi Ohshima, Mikael Östling, and Carl-Mikael Zetterling, “4H-SiC MOSFETs and Logic Inverters for Radiation-Hardened Electronics,” International Workshop on Radiation Resistant Sensors and Related Technologies for Nuclear Power Plant Decommissioning (R2SRT2016, 廃炉に向けた耐放射線センサー及び関連研究に関する国際ワークショップ), pp36-37 (2016). 2016年4月19日-20日, 福島・いわき市.
2. **(Invited)** Shin-Ichiro Kuroki, Hirofumi Nagatsuma, Milantha De Silva, Seiji Ishikawa, Tomonori Maeda, Hiroshi Sezaki, Takamaro Kikkawa, Takahiro Makino, Takashi Ohshima, Mikael Östling, and Carl-Mikael Zetterling, “4H-SiC MOSFETs for power and harsh environment electronics.” Annual World Congress of Smart Materials 2016-Develop New Path of Smartness, conference abstract book, p381 (2016). 2016年3月4日-6日, Singapore.
3. 村岡 幸輔、瀬崎 洋、石川 誠治、前田 智徳、吉川 公麿、黒木 伸一郎、”アルカリ土類金属による Si 及び 4H-SiC の増殖酸化,” 第 63 回応用物理学会春季学術講演会、21p-P10-15 (2016). 2016年3月19日-22日, 東京都.
4. ミランタ デシルワ、川崎 輝尚、吉川 公麿、黒木 伸一郎、”レーザアニールによる 4H-SiC C 面上の Ti-Si-C オーミックコンタクトの形成,” 第 63 回応用物理学会春季学術講演会、21a-H101-9(2016). 2016年3月19日-22日, 東京都.
5. 長妻 宏郁、黒木 伸一郎、黒瀬 達也、石川 誠治、前田 知徳、瀬崎 洋、吉川 公麿、牧野 高紘、大島 武、Mikael Östling、Carl-Mikael Zetterling、4H-SiC nMOSFET による Pseudo-CMOS 論理インバータの研究、” 第 63 回応用物理学会春季学術講演会、21p-P10-17(2016). 2016年3月19日-22日, 東京都.
6. 黒瀬 達也、黒木 伸一郎、長妻 宏郁、石川 誠治、前田 知徳、瀬崎 洋、吉川 公麿、牧野 高紘、大島 武、Mikael Östling、Carl-Mikael Zetterling、”4H-SiC nMOSFETs による論理インバータ回路の研究”, 第 63 回応用物理学会春季学術講演会、21p-P10-16 (2016). 2016年3月19日-22日, 東京都.
7. H. Nagatsuma, S-I. Kuroki, M. De Silva, S. Ishikawa, T. Maeda, H. Sezaki, T. Kikkawa, M. Östling, and C.-M. Zetterling, “Characterization of 4H-SiC nMOSFETs with As-doped S/D and NbNi Silicide Contacts After High Gamma-Ray Radiation,” Proceedings of The 11th International Workshop on Radiation Effects on Semiconductor Devices for Space Applications (RASEDA2015), P5-9, pp117-118 (2015). 2015年11月11日-13日, 群馬県桐生市.
8. Milantha De Silva, Seiji Ishikawa, Takamaro Kikkawa, and Shin-Ichiro Kuroki, “Low resistance ohmic contact formation on 4H-SiC c-face with NbNi silicidation using nano-second laser annealing,” The International Conference on Silicon Carbide and Related Materials 2015 (ICSCRM2015), Mo-P-21 (2015). 2015年10月4日-9日, Giardini Naxos, Italy.
9. H. Nagatsuma, S-I. Kuroki, M. De Silva, S. Ishikawa, T. Maeda, H. Sezaki, T. Kikkawa, M. Östling, and C.-M. Zetterling, “4H-SiC nMOSFETs with As-doped S/D and NbNi silicide ohmic contacts,” The International Conference on Silicon Carbide and Related Materials 2015 (ICSCRM2015), Giardini Naxos, Italy, Mo-P-26 (2015). 2015年10月4日-9日, Giardini Naxos, Italy.
10. S-I. Kuroki, H. Nagatsuma, M. De Silva, S. Ishikawa, T. Maeda, H. Sezaki, T. Kikkawa, T. Makino, T. Ohshima, M. Östling, and C.-M. Zetterling, “Characterization of 4H-SiC nMOSFETs in Harsh Environments; High Temperature and High Gamma-Ray Radiation,” The International Conference on Silicon Carbide and Related Materials 2015 (ICSCRM2015), Giardini Naxos, Italy, We-P-60 (2015). 2015年10月4日-9日, Giardini Naxos, Italy.
11. Milantha De Silva, 石川 誠治、吉川 公麿、黒木 伸一郎、”炭素侵入型金属とレーザアニールを用いた 4H-SiC パワーデバイスのための低抵抗オーミック抵抗の形成”、先進パワー半導体分科会 第2回講演会 予稿集、P-50, pp146-147(2015). 2015年11月9日-10日, 大阪市.
12. 長妻 宏郁、黒木 伸一郎、Milantha De Silva、石川 誠治、前田 知徳、瀬崎 洋、吉川 公麿、牧野 高紘、大島 武、Mikael Östling、Carl-Mikael Zetterling、”NbNi シリサイドコンタクト 4H-SiC nMOSFETs の高ガンマ線照射後及び高温時の動作特性”, 先進パワー半導体分科会 第 2 回講演会 予稿集、P-83, pp212-213 (2015). 2015年11月9日-10日, 大阪市.
13. 黒木伸一郎、長妻宏郁、Milantha De Silva,

石川誠治、前田知徳、瀬崎洋、吉川公麿、牧野高紘、大島武、Mikael Östling、Carl-Mikael Zetterling、”4H-SiC MOSFETs による極限環境エレクトロニクスへの展開”、薄膜材料デバイス研究会 第 12 回研究集会、アブストラクト集、30p-O01, pp37-39 (2015). 2015 年 10 月 30 日-31 日、京都市。

14. ミランタ デシルワ、石川 誠治、前田 知徳、瀬崎 洋、吉川 公麿、黒木 伸一郎、”レーザアニールとカーボン侵入型金属による低抵抗 SiC オーミック接触の形成”、第 76 回応用物理学会秋季学術講演会、15p-1A-5(2015). 2015 年 9 月 13 日-16 日、名古屋市。

15. 赤瀬 光、石川 誠治、前田 知徳、瀬崎 洋、Milantha de Silva、長妻 宏都、吉川 公麿、黒木 伸一郎、”4H-SiC MISFETs のための Al₂O₃/Al₆Si₂O₁₃ ゲート絶縁膜の研究”、第 76 回応用物理学会秋季学術講演会、14p-PB6-7(2015). 2015 年 9 月 13 日-16 日、名古屋市。

16. 赤瀬 光、Milantha de Silva、長妻 宏都、吉川 公麿、黒木 伸一郎、”極限環境 4H-SiC MISFETs のための Al₂O₃/Al₆Si₂O₁₃ ゲート絶縁膜の研究”、2015 年度応用物理・物理系学会中国四国支部合同学術講演会、講演予稿集、Ba-5、p20 (2015). 2015 年 8 月 1 日、徳島県徳島市。

17. 佐藤旦、黒木伸一郎、石川誠治、前田知徳、瀬崎 洋、吉川公麿、「4H-SiC 熱酸化膜への水分子吸着の影響」、第 62 回応用物理学会春季学術講演会、11p-P2-10 (2015). 2015 年 3 月 11 日-14 日、神奈川県平塚市。

18. ミランタ・デシルワ、黒木伸一郎、石川誠治、前田知徳、瀬崎 洋、吉川公麿、「部分的アモルファス化による SiC/金属オーミック抵抗の低減とそのメカニズム」、第 62 回応用物理学会春季学術講演会、11p-P2-13(2015). 2015 年 3 月 11 日-14 日、神奈川県平塚市。

19. 長妻宏都、黒木伸一郎、MILANTHA DE SILVA、赤瀬光、古林寛、石川誠治、前田知徳、瀬崎洋、吉川公麿、「NbC/NiSi による 4H-SiC オーミックコンタクト電極の研究」、日本材料学会平成 26 年度第 4 回半導体エレクトロニクス部門委員会 第 1 回講演会、P18 (2015). 2015 年 1 月 24 日、広島県東広島市。

20. Shin-Ichiro Kuroki, Seiji Ishikawa, Tomonori Maeda, Hiroshi Sezaki, and Takamaro Kikkawa, “Leakage Current Reduction of 4H-SiC Schottky Barrier Diode by Using Sacrificial Oxidation,” 2014 MRS Spring Meeting, DD6.05, April 23 (2014). 2014 年 4 月 21 日-25 日、San Francisco.

21. 長妻宏都、黒木伸一郎、MILANTHA DE SILVA、赤瀬光、古林寛、石川誠治、前田知徳、瀬崎洋、吉川公麿、「Nb/Ni シリサイドによる 4H-SiC オーミックコンタクト電極の研究」、応用物理学会 先端パワー半導体分科会 第一回講演会予稿集、pp116-117 (2014). 2014 年 11 月 19 日-20 日、名古屋市。

22. 佐藤 旦、黒木伸一郎、石川誠治、前田知徳、瀬崎 洋、吉川公麿、「4H-SiC ドライ熱酸化膜への疎水化処理の効果」、応用物理学会 先端パワー半導体分科会 第一回講演会予稿集、pp136-137 (2014). 2014 年 11 月 19 日-20 日、名古屋市。

23. Milantha De Silva, 黒木伸一郎、石川誠治、前田知徳、瀬崎 洋、吉川公麿、「部分的アモルファス化によりオーミック抵抗の低減と SBD 特性評価」、応用物理学会 先端パワー半導体分科会 第一回講演会予稿集、pp188-189 (2014). 2014 年 11 月 19 日-20 日、名古屋市。

24. 佐藤旦、黒木伸一郎、石川誠治、前田知徳、瀬崎 洋、吉川公麿、「4H-SiC 熱酸化膜の膜中親水基発生による CV 特性の変化」、第 75 回応用物理学会秋季学術講演会講演予稿集、19a-PB5-14 (2014). 2014 年 9 月 17 日-20 日、札幌市。

25. Milantha de Silva, Tadashi Sato, Shin-Ichiro Kuroki and Takamaro Kikkawa, “Low Ohmic Contact Formation of Ni Silicide on Partially Si Ion Implanted n+ 4H-SiC,” Technical digest of The International Conference on Silicon Carbide and Related Materials 2013(ICSCRM2013), Mo-P40,62 (2013). 2013 年 9 月 29 日-10 月 4 日、宮崎県宮崎市。

26. Milantha de Silva, 黒木 伸一郎、佐藤 旦、吉川 公麿、「部分的アモルファス化による n+ 4H-SiC 上の Ni シリサイド・オーミック抵抗の TLM パターン依存性」、第 74 回応用物理学会秋季学術講演会講演予稿集、15-223 (2013). 2013 年 9 月 16 日-20 日、京都市。

〔産業財産権〕

○出願状況 (計 1 件)

名称：炭化珪素半導体装置及びその製造方法
発明者：黒木 伸一郎、ミラン ダ シルワ、

石川 誠治

権利者：国立大学法人広島大学、
フェニテックセミコンダクター株式会社
種類：特許

番号：特願 2016-008954

出願年月日：2016 年 1 月 20 日

国内外の別：国内

[その他]

ホームページ等

広島大学ナノデバイス・バイオ融合科学研究

所：<http://www.rnbs.hiroshima-u.ac.jp/>

広島大学 研究者総覧：

[http://seeds.office.hiroshima-u.ac.jp/p](http://seeds.office.hiroshima-u.ac.jp/profile/ja.76ec61dcb6e3d155520e17560c007)

[rofile/ja.76ec61dcb6e3d155520e17560c007](http://seeds.office.hiroshima-u.ac.jp/profile/ja.76ec61dcb6e3d155520e17560c007)

[669.html](http://seeds.office.hiroshima-u.ac.jp/profile/ja.76ec61dcb6e3d155520e17560c007)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

黒木 伸一郎 (SHIN-ICHIRO KUROKI)

広島大学・ナノデバイス・バイオ融合科学研

究所・准教授

研究者番号：70400281