

平成 30 年 6 月 19 日現在

機関番号：15401

研究種目：国際共同研究加速基金（国際共同研究強化）

研究期間：2016～2017

課題番号：15KK0240

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（国際共同研究強化）

研究課題名（英文）Research on Radiation-Hardened CMOS Integrated Circuits using Wide Bandgap SiC Semiconductor(Fostering Joint International Research)

研究代表者

黒木 伸一郎 (Kuroki, Shin-Ichiro)

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） 10,900,000円

渡航期間： 8ヶ月

研究成果の概要（和文）：現在福島第一原発の廃炉活動が進められているが、その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破損する。そのためシリコンとは違う半導体による耐放射線集積回路の構築が求められている。本研究では4H-SiC半導体による放射線耐性に優れたCMOS集積回路のための研究を行い、デバイス・小規模回路の研究、デバイス高性能化の研究、極限環境応用のための研究を国際共同研究として推進した。

研究成果の概要（英文）：For the decommissioning of the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant in Japan, installation of robots has been promoted. However the electronics are mainly consist of conventional silicon integrated circuits, which is vulnerable to radiation. And then the electronics limits the operation time for the decommissioning. For the radiation hardened electronics, we need to apply other semiconductor with radiation hardness. 4H-SiC semiconductor is one of the candidates for such a material. In this research project, we promoted research and developments on 4H-SiC MOSFET devices and integrated circuits, research for high performance, and for harsh environment applications, under the international collaboration.

研究分野：電子デバイス

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 CMOS集積回路 MOSFETs 耐放射線 高温動作 廃炉技術

1. 研究開始当初の背景

現在福島第一原発の廃炉活動が進められているが、その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破損する。そのためシリコンとは違う半導体による耐放射線集積回路の構築が求められている。

2. 研究の目的

本研究では 4H-SiC 半導体による放射線耐性に優れた CMOS 集積回路のための研究を行い、廃炉工程に関わるロボット群の頭脳を構築することを目標としている。

3. 研究の方法

4H-SiC 半導体による MOSFETs デバイスおよび小規模集積回路の試作・研究を進め、ガンマ線照射、照射効果の研究を進め、また 500°C までの超高温での動作の研究を行った。この研究を更に発展させるために、また性能を律速している物理的ファクタを改善するために、特に重要な以下の項目の研究をさらに進めた：(1) 高周波駆動のためのセルフアラインプロセスによる 4H-SiC MOSFETs の研究、(2) 4H-SiC pMOS デバイスの研究、(3) 4H-SiC MOSFETs の電流駆動力向上：キャリア移動度向上、(4) 極限環境に耐えうる 4H-SiC 集積回路用のオーミック電極研究、また極限環境下での動作評価として(1) ガンマ線照射によるトータルドーズ効果実験、(2) 高温時 (~500°C) における回路動作実験を進めた。これら研究を強力に推進することで極限環境エレクトロニクスを構築した。

デバイス作製においては、研究項目に応じた試作プロセスでデバイス作製をおこなったが、本研究でのプレーナタイプ 4H-SiC nMOSFET 典型的なデバイス作製方法は次のようになる。はじめに 4H-SiC (0001) 4° 基板の上に、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。この不純物濃度は、nMOSFET の閾値電圧 V_{TH} を 3.0 V にするように決定した。酸化膜によるダミーゲートを形成し、S/D 領域に As イオンを 500°C 加熱下で注入し、不純物濃度は $5.0 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ とした。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 および 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。

4. 研究成果

(1) 4H-SiC Pseudo-CMOS 回路の超高温動作

小規模回路として 4H-SiC 半導体を用いた Pseudo CMOS 回路を設計・試作し、評価を行った。デバイス試作プロセスは、上記研究の方法に記載した方法で行った。図 1 に作製した Pseudo-CMOS 回路の回路図、レイアウト図、作製した回路の写真を示す。Pseudo-CMOS 回路は 4 個の n タイプトランジスタからなり、動作としてはインバータ動作をする。図 2 に 450°C までの動作特性を示す。350°C までは十分なスウィング電圧を示した。400°C 以上では電圧の低下がみられたが、450°C までの動作を示した。このスウィング電圧の低下はゲートリーク電流増加によるもので、ゲート電極の変更で改善されると考えられる。

この 4H-SiC nMOSFETs のデバイスパラメータの抽出を行い、そのパラメータをベースに Pseudo-CMOS 回路の動作特性の評価解析を行った。これを発展させ、オペレーショナル・アンプ回路などのシミュレーションを実施した。nMOSFET のデバイスサイズなどのデバイスパラメータを抽出し、これにより超高温時などの極限環境でのデバイスの動作指針を得た。

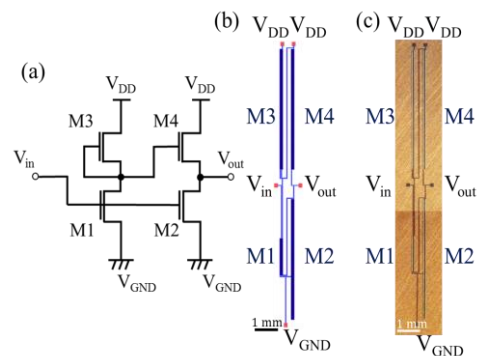


図 1. Pseudo-CMOS 回路 (a) 回路図, (b) レイアウト図, (c) 試作デバイス写真.

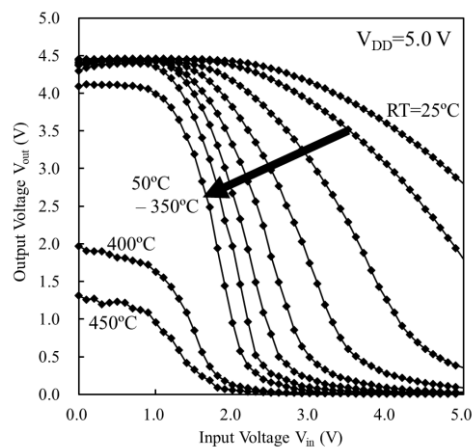


図 2. Pseudo-CMOS 回路の 450°C までの超高温動作特性.

(2) 高周波駆動のためのセルフアラインプロセスによる 4H-SiC MOSFETs の研究

通常のシリコン MOSFETs では、高周波動作のためにゲート構造を用いたセルフ・アライメントプロセスによりデバイスへの低寄生容量を実現している。ゲート構造を作製したのちに、イオン注入をし、不純物活性化加熱を行っているが、不純物活性化は高くても 900°C 以下であり、この加熱でゲート構造は破壊されない。しかし 4H-SiC ではこの不純物活性化加熱を最大 1800°C 程度で行っており、この温度ではゲート構造が熔融もしくは揮発するため、ゲート構造を用いたセルフ・アライメントプロセスは適用できない。そのためこれまでダミーゲートプロセスというプロセスでデバイス作製を行っているが、ゲートソース、ゲートドレイン間の寄生容量が大きく、高周波動作の律速要因となっている。この問題を解消するために、新しいセルフ・アライメントプロセスを提案し、実現した。図 3 にこのプロセスによる MOSFET デバイスの透過型電子顕微鏡写真を示す。

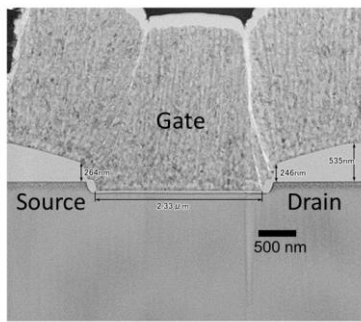


図 3. トレンチ構造 4H-SiC nMOSFETs.

(3) 4H-SiC pMOS デバイスの研究

CMOS 集積回路の実現には、nMOSFETs に加えて、pMOSFETs が必要である。しかしそのためにはチャネル濃度の制御、ソース・ドレイン領域の形成、p 型領域への低抵抗オーミックコンタクトの実現を行わないといけない。これらの研究を進め、4H-SiC pMOSFETs を作

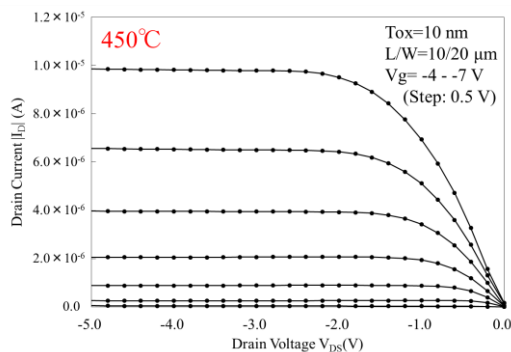


図 4. 4H-SiC pMOSFETs の 450°C 動作.

製し、超高温動作、1.13 MGy までのガンマ線耐性を示した。図 4 には動作特性を示す。

(4) 4H-SiC MOSFETs のキャリア移動度向上のための研究、および極限環境に耐えうる 4H-SiC 集積回路用のオーミック電極研究

デバイスの電流駆動能力向上のために、キャリア移動度向上のための研究を進めた。MOS 界面にバリウム Ba 原子を導入し、これにより移動度を大幅に向上することに成功した。また Nb/Ni 合金をオーミックコンタクトとして使用することで、コンタクト抵抗の低減を行い、また 400°C の高温環境下での 100 時間での信頼性を示した。

5. 主な発表論文等 (研究代表者は下線)

[雑誌論文] (計 10 件)

1. Milantha De Silva, Teruhisa Kawasaki, Takamichi Miyazaki, Tomoyuki Koganezawa, Satoshi Yasuno, and Shin-Ichiro Kuroki, "Formation of epitaxial Ti-Si-C Ohmic contact on 4H-SiC C face using pulsed-laser annealing," Appl. Phys. Lett. 110, 252108-1 - 252108-5 (2017). 査読有
2. S-I. Kuroki, T. Kurose, H. Nagatsuma, S. Ishikawa, T. Maeda, H. Sezaki, T. Kikkawa, T. Makino, T. Ohshima, M. Östling, and C.-M. Zetterling, "4H-SiC Pseudo-CMOS Logic Inverters for Harsh Environment Electronics," Mat. Sci. Forum, 897, pp669-672 (2017). 査読有
3. Milantha De Silva, Teruhisa Kawasaki, Takamaro Kikkawa, and Shin-Ichiro Kuroki, "Low Resistance Ti-Si-C Ohmic Contacts for 4H-SiC Power Devices Using Laser Annealing," Mat. Sci. Forum, 897, pp399-402 (2017). 査読有
4. Kosuke Muraoka, Hiroshi Sezaki, Seiji Ishikawa, Tomonori Maeda, Tadashi Sato, Takamaro Kikkawa, and Shin-Ichiro Kuroki, "Enhanced-Oxidation and Interface Modification on 4H-SiC(0001) Substrate Using Alkaline Earth Metal," Mat. Sci. Forum, 897, pp348-351 (2017). 査読有
5. S. S. Suvanam, S-I. Kuroki, L. Lanni, R. Hedayati, T. Ohshima, T. Makino, A. Hallen, C.-M. Zetterling, "High Gamma Ray Tolerance for 4H-SiC Bipolar Circuits," IEEE Tran. Nucl. Sci., 64, 852-858 (2017). 査読有

6. Milantha De Silva, Seiji Ishikawa, Takamichi Miyazaki, Takamaro Kikkawa, and Shin-Ichiro Kuroki, "Formation of amorphous alloys on 4H-SiC with NbNi film using pulsed-laser annealing," Appl. Phys. Lett. 109, 012101-1 - 012101-5 (2016). 査読有
7. Milantha De Silva, Tomonori Maeda, Seiji Ishikawa, Hiroshi Sezaki, Takamichi Miyazaki, Takamaro Kikkawa, and Shin-Ichiro Kuroki, "Characterization of Grapho-Silicidation on n+ 4H-SiC C-Face for Back Side Ohmic Contacts of Power Devices," ECS J. Solid State Sci. Technol., 5 (9) P457-P460 (2016). 査読有
8. 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," Mat. Sci. Forum, 858, pp864-867 (2016). 査読有
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," Mat. Sci. Forum, 858, pp573-576 (2016). 査読有
10. 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

[学会発表] (計 32 件)

1. 井上 純, 黒木 伸一郎, 石川 誠治, 前田 知徳, 瀬崎 洋, 牧野 高紘, 大島 武, Mikael Östling, Carl-Mikael Zetterling, 「高周波 CMOS インバータに向けた 4H-SiC トレンチ pMOSFETs の研究」, 2018 年第 65 回応用物理学会春季学術講演会, 20p-D103-12 (2018).
2. 安野 聡, 小金澤 智之, 村岡 幸輔, 小早川 貴一, 石川 誠治, 黒木 伸一郎, 「Metal/SiO₂/SiC バンドアライメントのゲート電極金属依存性」, 2018 年第 65 回応用物理学会春季学術講演会, 18p-P14-9 (2018).
3. ヴォーン ヴァン クォン, 石川 誠治, 瀬崎 洋, 前田 知徳, 小金澤 智之, 安野 聡, 宮崎 孝道, 黒木 伸一郎, 「極限環境応用に向けた 4H-SiC 上 Ni/Nb オーミックコンタクトの高温信頼性」, 2018 年第 65 回応用物理学会春季学術講演会, 20a-D103-1 (2018).
4. 永野 耕平, 目黒 達也, 武山 昭憲, 牧野 高紘, 大島 武, 田中 保宣, 黒木 伸一郎, 「NbNi シリサイド S/D 3C-SiC nMOSFETs と高ガンマ線照射特性」, 2018 年第 65 回応用物理学会春季学術講演会, 20p-D103-14 (2018).
5. K. Kobayakawa, K. Muraoka, H. Sezaki, S. Ishikawa, T. Maeda, and S.-I. Kuroki, "Effects of CF₄ surface etching on 4H-SiC MOS Capacitors," International Workshop on Nanodevice Technologies 2018, Higashi-Hiroshima, Japan, pp42-43 (2018).
6. J. Inoue, S-I. Kuroki, S. Ishikawa, T. Maeda, H. Sezaki, T. Makino, T. Ohshima, M. Östling, and C.-M. Zetterling, "Pseudo-self-alignment 4H-SiC Trench pMOSFETs for High-Frequency CMOS inverter," International Workshop on Nanodevice Technologies 2018, Higashi-Hiroshima, Japan, pp44-45 (2018).
7. J. Kajihara, S-I. Kuroki, S. Ishikawa, T. Maeda, H. Sezaki, T. Makino, T. Ohshima, M. Östling, and C.-M. Zetterling, "Ultra high temperature operation of 4H-SiC pMOSFETs," International Workshop on Nanodevice Technologies 2018, Higashi-Hiroshima, Japan, pp50-51 (2018).
8. T. Kurose, S.-I. Kuroki, S. Ishikawa, T. Maeda, H. Sezaki, T. Makino, T. Ohshima, M. Östling, and C.-M. Zetterling, "Novel self-aligned process for 4H-SiC nMOSFETs," International Workshop on Nanodevice Technologies 2018, Higashi-Hiroshima, Japan, pp52-53 (2018).
9. Vuong Van Cuong, Seiji Ishikawa, Hiroshi Sezaki, Tomonori Maeda, and Shin-Ichiro Kuroki, "High-Temperature Reliability of Ni/Nb Ohmic Contacts on 4H-SiC For Harsh Environment Applications," International Workshop on Nanodevice Technologies 2018, Higashi-Hiroshima, Japan, pp54-55 (2018).
10. K. Muraoka, S. Ishikawa, H. Sezaki, T. Maeda, and S.-I. Kuroki, "Correlation between field effect mobility and

- accumulation conductance at 4H-SiC MOS interface with BaO₂,” International Workshop on Nanodevice Technologies 2018, Higashi-Hiroshima, Japan, pp56-57 (2018).
11. (Invited) Shin-Ichiro Kuroki, “4H-SiC MOSFETs and Logic Inverters for Harsh Environment Electronics,” 19th Takayanagi Kenjiro Memorial Symposium, Hamamatsu, Shizuoka, pp.15-17 (2017).
 12. Shin-Ichiro Kuroki, “4H-SiC Self-Aligned Gate MOSFETs and Logic Inverters for Harsh Environment Electronics,” The 2nd International Symposium on Biomedical Engineering, pp40-41 (2017).
 13. 梶原純, 黒木伸一郎, 瀬崎洋, 石川誠治, 前田知徳, 牧野高紘, 大島武, Mikael Östling, and Carl -Mikael Zetterling, 「4H-SiC pMOSFETs の高温特性及びガンマ線曝露効果」, 応用物理学会 先進パワー半導体分科会 第 4 回講演会, IIB23, pp. 259-260 (2017).
 14. J. Kajihara, S.-I. Kuroki, S. Ishikawa, T. Maeda, H. Sezaki, T. Makino, T. Ohshima, M. Östling, and C.-M. Zetterling, “4H-SiC pMOSFETs with Al-doped S/D and NbNi silicide ohmic contacts,” The International Conference on Silicon Carbide and Related Materials 2017 (ICSCRM2017), Washington, D.C., USA, WE.DP.4 (2017).
 15. T. Kurose, S.-I. Kuroki, S. Ishikawa, T. Maeda, H. Sezaki, T. Makino, T. Ohshima, M. Östling, and C.-M. Zetterling, “Low-parasitic-capacitance self-aligned 4H-SiC nMOSFETs for harsh environment electronics,” The International Conference on Silicon Carbide and Related Materials 2017 (ICSCRM2017), Washington, D.C., USA, TH.CP.3 (2017).
 16. K. Muraoka, S. Ishikawa, H. Sezaki, T. Maeda, and S.-I. Kuroki, “Correlation between field effect mobility and accumulation conductance at 4H-SiC MOS interface with barium,” The International Conference on Silicon Carbide and Related Materials 2017 (ICSCRM2017), Washington, D.C., USA, TH.CP.2 (2017).
 17. K. Kobayakawa, K. Muraoka, H. Sezaki, S. Ishikawa, T. Maeda, and S.-I. Kuroki, “Effects of CF₄ surface etching on 4H-SiC MOS Capacitors,” The International Conference on Silicon Carbide and Related Materials 2017 (ICSCRM2017), Washington, D.C., USA, WE.CP.9 (2017).
 18. Milantha De Silva, Teruhisa Kawasaki, and Shin-Ichiro Kuroki, “Electrical properties of Ti-Si-C Ohmic contact on ion-implanted n-type 4H-SiC C face,” The International Conference on Silicon Carbide and Related Materials 2017 (ICSCRM2017), Washington, D.C., USA, TU.CP.7 (2017).
 19. 黒瀬 達也, 黒木 伸一郎, 石川 誠治, 前田 知徳, 瀬崎 洋, 牧野 高紘, 大島 武, Mikael Östling, Carl-Mikael Zetterling, 「極限環境エレクトロニクスのための 4H-SiC nMOSFETs セルフアラインプロセス」, 2017 年第 78 回応用物理学会秋季学術講演会, 6a-A201-5 (2017).
 20. 梶原 純, 黒木 伸一郎, 石川 誠治, 前田 知徳, 瀬崎 洋, 吉川 公麿, 牧野 高紘, 大島 武, Mikael Östling, and Carl -Mikael Zetterling, 「NbNi シリサイドを導入した 4H-SiC pMOSFETs の研究」, 2017 年第 64 回応用物理学会春季学術講演会, 15p-F204-17 (2017).
 21. 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 n+ 4H-SiC C 面での Ti-Si-C オーミックコンタクトの形成」, 2017 年第 64 回応用物理学会春季学術講演会, 16a-P5-5 (2017).
 22. 村岡 幸輔, 瀬崎 洋, 石川 誠治, 前田 智徳, 吉川 公麿, 黒木 伸一郎, 「Ba 導入による 4H-SiC MOS 界面の改善」, 2017 年第 64 回応用物理学会春季学術講演会, 16a-P5-6 (2017).
 23. 小早川 貴一, 村岡 幸輔, 瀬崎 洋, 石川 誠治, 前田 知徳, 吉川 公麿, 黒木 伸一郎, 「4H-SiC MOS キャパシタにおける SiC 表面の CF₄ エッチングの効果」, 2017 年第 64 回応用物理学会春季学術講演会, 16a-P5-7 (2017).
 24. Shin-Ichiro Kuroki, Tatsuya Kurose, Milanta De Silva, Kousuke Muraoka, Hikaru Akase, Jun Kajihara, Kouhei Nagano, Tatsuya Meguro, Kiichi Kobayakawa, Shogo Endo, Seiji Ishikawa, Tomonori Maeda, Hiroshi Sezaki, Takamaro Kikkawa, Takahiro Makino, Takeshi Ohshima, Mikael Östling, and Carl-Mikael Zetterling, “4H-SiC

- MOSFETs and Logic Inverters for Harsh Environment Electronics,” International Workshop on Nanodevice Technologies 2017, Higashi-Hiroshima, Japan, pp64-65 (2017).
25. Milantha De Silva, Teruhisa Kawasaki, Takamaro Kikkawa, and Shin-Ichiro Kuroki, “Low resistance ohmic contacts on 4H-SiC with Ti-Si-C using Laser annealing,” International Workshop on Nanodevice Technologies 2017, Higashi-Hiroshima, Japan, pp64-65 (2017).
26. K. Muraoka, H. Sezaki, S. Ishikawa, T. Maeda, T. Sato, T. Kikkawa and S-I. Kuroki, “Enhanced-oxidation and improvement of SiC MOS interface using BaO₂,” International Workshop on Nanodevice Technologies 2017, Higashi-Hiroshima, Japan, pp64-65 (2017).
27. Milantha De Silva, Teruhisa Kawasaki, Takamaro Kikkawa, and Shin-Ichiro Kuroki, “Low resistance Ti-Si-C ohmic contacts for 4H-SiC power devices using Laser annealing,” 11th European Conference on Silicon Carbide and Related Materials (ECSCRM2016), Halkidiki, Greece, WeP-39, pp561-562 (2016).
28. K. Muraoka, H. Sezaki, S. Ishikawa, T. Maeda, T. Sato, T. Kikkawa and S-I. Kuroki, “Enhanced-oxidation and interface modification on 4H-SiC(0001) substrate using alkaline earth metal,” 11th European Conference on Silicon Carbide and Related Materials (ECSCRM2016), Halkidiki, Greece, WeP-37, pp557-558 (2016).
29. S.-I. Kuroki, H. Nagatsuma, T. Kurose, S. Ishikawa, T. Maeda, H. Sezaki, T. Kikkawa, T. Makino, T. Ohshima, M. Östling, and C.-M. Zetterling, “4H-SiC Pseudo-CMOS Logic Inverters for Harsh Environment Electronics,” 11th European Conference on Silicon Carbide and Related Materials (ECSCRM2016), Halkidiki, Greece, WeP-27, pp537-538 (2016).
30. 安野 聡, 小金澤 智之, 村岡 幸輔, 黒木 伸一郎, 「In situ XRR 及び HAXPES による 4H-SiC の熱酸化過程の観察」, 2016 年第 77 回応用物理学会秋季学術講演会, 14p-P9-12 (2016).
31. 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 Ni/Ti 多層膜オーミックコンタクトの形成」, 2016 年第 77 回応用物理学会秋季学術講演会, 14p-P9-7 (2016).
32. **(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), Iwaki, Fukushima, pp36-37 (2016).
- [産業財産権]
- 出願状況 (計 1 件)
- 名称 : 炭化珪素半導体装置
 発明者 : 黒木 伸一郎, 長妻 宏郁, 瀬崎洋, 石川誠治, 前田知徳
 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 2016-094454
 出願年月日 : 2016 年 5 月 10 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/profile/ja.76ec61dcb6e3d155520e17560c007669.html>
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 : 7 0 4 0 0 2 8 1
- (2)研究協力者
 [主たる渡航先の主たる海外共同研究者]
 Prof. Carl-Mikael Zetterling, School of Information and Communication Technology, KTH Royal Institute of Technology, Sweden (スウェーデン王立工科大学)
 [その他の研究協力者]
 Prof. Mikael Östling, School of Information and Communication Technology, KTH Royal Institute of Technology, Sweden (スウェーデン王立工科大学)
31. ミランタ デシルワ, 川崎 輝尚, 吉川 公