

令和 3 年 6 月 17 日現在

機関番号：82108

研究種目：新学術領域研究(研究領域提案型)

研究期間：2016～2020

課題番号：16H06419

研究課題名(和文) 族窒化物ナノラミネート特異構造を用いたダイヤモンド電子デバイスの開発

研究課題名(英文) Development of diamond electron device using III-nitride nanolaminate singularity structure

研究代表者

小出 康夫(KOIDE, Yasuo)

国立研究開発法人物質・材料研究機構・機能性材料研究拠点・グループリーダー

研究者番号：70195650

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 61,800,000円

研究成果の概要(和文)：原子層堆積型MOVPE法を整備し、有機金属化合物およびアンモニアをパルス供給することによる 族窒化物半導体の原子層堆積法を確立した。 $[\text{AlN}(0.2\text{nm})/\text{GaN}(0.04\text{nm})]$ (250対)のナノラミネート膜を成長させ、同程度膜厚のAlN単層膜に比べて3.6倍の誘電率増加を観測し、 族窒化物半導体のナノラミネート膜における誘電率の増大効果を世界で初めて実証した。ダイヤモンドFETへの応用は達成できなかったが、海外共同研究成果として $\text{TiO}_x[x\text{nm}]/\text{AlO}_x[y\text{nm}]$ ($x, y = 1 \sim 2\text{ nm}$) ナノラミネート膜をゲート構造に応用したダイヤモンドMOSFETを初めて試作し動作に成功した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

次世代省エネルギーパワー半導体の候補材料として、熱放散性や熱安定性の高いダイヤモンド電界効果トランジスタを開発することを目的とした。AlN/GaNナノラミネート膜を作製し、同程度膜厚のAlN単層膜に比べて3.6倍の誘電率増加を観測し、III族窒化物半導体のナノラミネート膜における誘電率の増大効果を世界で初めて実証するとともに、高誘電率 $\text{TiO}_x/\text{AlO}_x$ ナノラミネート膜をゲート構造に応用したダイヤモンドMOSFETを初めて試作し動作に成功した。誘電率増大化の学術的メカニズムは今後のパワー半導体デバイスに展開する基礎となることが示唆された。

研究成果の概要(英文)：We have developed an atomic layer deposition (ALD) MOVPE technique and established the ALD method of III-nitride semiconductors by pulsed supply of organometallic compounds and ammonia. Nanolaminate films of $[\text{AlN}(0.2\text{nm})/\text{GaN}(0.04\text{nm})]$ (250 pairs) were grown, and a 3.6-fold increase in dielectric constant was observed compared to the AlN single film with a same thickness. The result showed for the first time in the world the dielectric constant enhancement of group III nitride semiconductor nanolaminate films. Although the application to diamond FETs could not be achieved, we successfully fabricated and operated the first diamond MOSFET using $\text{TiO}_x[x\text{ nm}]/\text{AlO}_x[y\text{ nm}]$ ($x, y = 1\text{ to }2\text{ nm}$) nanolaminate films as the gate structure as a result of overseas collaborative research.

研究分野：半導体工学

キーワード：ダイヤモンド 族窒化物 ヘテロ接合 ナノラミネート構造 電界効果トランジスタ

1. 研究開始当初の背景

ダイヤモンドは半導体材料の中で最も機械的強度が強く、最も熱伝導性が高く、最も熱的・化学的に安定な究極の半導体材料であり、高温・極限環境及び高電力デバイスとしての応用が期待される。しかしながら、ダイヤモンド内の n 型および p 型ドーパントであるリン(P)およびボロン(B)のイオン化エネルギーは、それぞれ 600 および 370 meV もの大きな値であるため、室温においては、電気伝導を担うキャリア(電子または正孔)がほとんど存在しない。これはダイヤモンド半導体を電子材料として使うときの大きな欠点の一つである。従って、室温においてダイヤモンド内に電気伝導キャリアを発生させ、その濃度を制御するための原理の発掘・構築は、半導体工学上の大きな挑戦であり、ダイヤモンドの欠点を打破するインパクトを与える。これまでこの目的に沿って、小さなイオン化エネルギーを持つドーパントの探索が行われてきたが、未だ発見されておらず、現時点では室温での十分なキャリア発生は不可能と考えられている。従って、全く新たな新原理の発掘が望まれる。

本申請のアイデアは、スーパーキャパシタ誘電薄膜を用いて高濃度キャリアを低電界において電界制御する原理にある。即ち、金属的電気伝導性を持つ p⁺型ダイヤモンド薄膜内の正孔濃度であっても、比誘電率 100 以上の強誘電体または高誘電体薄膜(総称してスーパーキャパシタ誘電薄膜と呼ぶ)を介して電界制御することがその基本原理である(図 1)。ダイヤモンド内のボロンは、その濃度を 10^{20} cm^{-3} 以上に添加することによって正孔濃度 10^{20} cm^{-3} 以上、即ち単位面積あたり 10^{13} 個以上の正孔を発生させることが可能である。同様に水素終端表面においては再現性良く 10^{13} cm^{-2} の正孔濃度を発生させることができる。また、当グループによる研究成果から、水素アンモニア熱処理によって正孔濃度を 10^{14} cm^{-2} に高めることも判明している。しかしながら、誘電率の小さな常誘電体の絶縁膜では、これほどの高濃度キャリア電荷量を電界制御することは不可能である。本提案原理の目的は、スーパーキャパシタが持つ巨大分極電荷を利用することによって、ダイヤモンド内の 10^{13} - 10^{14} cm^{-2} の正孔濃度の電界制御性を実験的に実証することにある。Al₂O₃/TiO₂ ナノラミネート薄膜では $8 \mu\text{F}/\text{cm}^2$ の静電容量の達成が報告されており、i-AlN/c-GaN ナノラミネート薄膜でも十分同等の静電容量の達成が期待できる。図 2 に、誘電体による制御電荷密度およびダイヤモンド内正孔濃度とゲート電界の関係を示す。CaF₂、SiO₂、Al₂O₃ 等のゲート誘電膜では $k < 10$ であるため $1 \times 10^{13} \text{ cm}^{-2}$ の正孔濃度を低電界で制御することは困難であるが、 $k=100$ 程度で $8 \mu\text{F}/\text{cm}^2$ の静電容量を持つスーパーキャパシタ誘電薄膜であればゲート電界 2 MV/cm において、 $16 \mu\text{C}/\text{cm}^2$ の電荷制御、即ち $1 \times 10^{14} \text{ cm}^{-2}$ の正孔濃度が制御可能となることが期待できる。

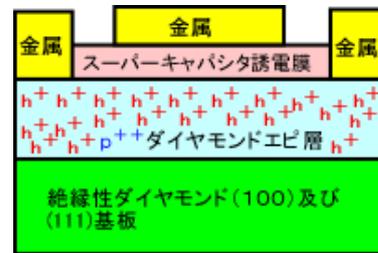


図 1. スーパーキャパシタ誘電膜を用いたゲート電界制御概念。

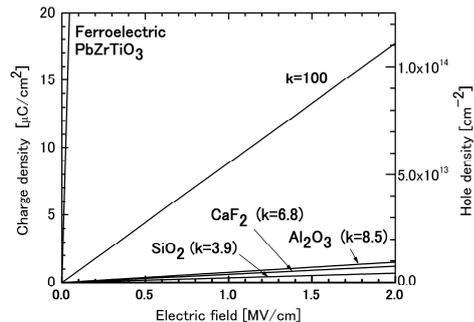


図 2. 電荷密度および正孔濃度とゲート電界の関係。

2. 研究の目的

ダイヤモンドを電子デバイスとして応用するためには、水素終端表面に蓄積される高濃度正孔や金属的濃度までデルタドープされた薄膜層を伝導チャネルに利用することが今のところ唯一の解であると考えられる。本研究の目的は、絶縁体(i-AlN)と導電体(c-GaN)をそれぞれ 1 nm 以下の原子層状 2 次元構造からなるナノラミネート特異構造を作製し、少なくとも $k=100$ 以上の高誘電率薄膜をダイヤモンド単結晶上に作製するとともに、その i-AlN/c-GaN ナノラミネート薄

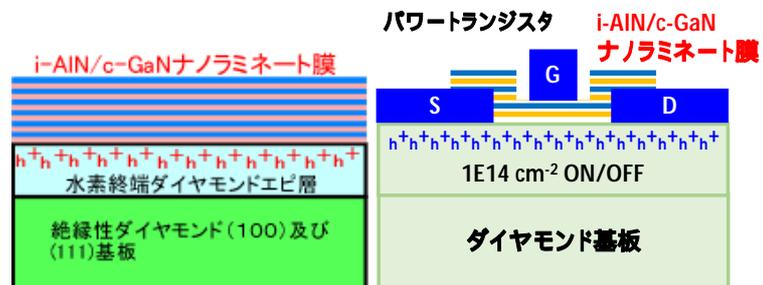


図 3(左図) ダイヤモンド上 i-AlN/c-GaN ナノラミネート膜、(右図) i-AlN/c-GaN ナノラミネート・ゲート絶縁膜に用いた FET。

膜をゲート絶縁膜に用いることによって、水素終端ダイヤモンド表面の高濃度正孔チャネルを用いた新概念電界効果トランジスタ(FET)を開発することにある。誘電体と半導体の層状構造からなる誘電薄膜(ナノラミネート薄膜と呼ばれる)は、マクスウェルワグナー誘電緩和効果によって比誘電率 $k=1000$ 以上の巨大誘電率を持つことが、 Al_2O_3/TiO_2 ナノラミネート薄膜において近年実証されている[Li *et al.* Appl. Phys. Lett. **96**, 162907 (2010)]。この現象を利用するために、図1に示す i-AlN/c-GaN ナノラミネート特異構造を1分子層(0.2 nm程度)の精度にてガスソース原子層堆積法を用いて作製し、ダイヤモンド上で $k=100$ 以上を持つスーパーキャパシタ誘電薄膜を開発することを第1の目標とする。そして、図3右図に示すように、この i-AlN/c-GaN ナノラミネート特異構造からなるスーパーキャパシタをゲート絶縁膜として用いたダイヤモンドFETを開発することを第2の目標とする。

3. 研究の方法

研究代表者の小出らは、強誘電体薄膜チタン酸ジルコニウム鉛(PZT)/ダイヤモンド接合および高誘電体薄膜チタン酸ストロンチウム($SrTiO_3$)/ダイヤモンド接合の作製および界面評価、更には図4および図5に示すように、高誘電率酸化ハフニウム(HfO_2)および酸化ランタンアルミニウム($LaAlO_3/Al_2O_3$ スタック構造)をゲート絶縁膜に用いたダイヤモンドFETの開発に成功してきており、原子層堆積(ALD)法を用いた誘電体薄膜の堆積技術が重要であることがわかってきている。また、図6に示すように、AlN/ダイヤモンドを用いたヘテロ接合FETの開発にも世界で初めて成功している。これらの経験と成果を踏まえて、平成28年度初年度は、i-AlN/c-GaNナノラミネート特異構造を作製するための「ガスソース原子層堆積法」を設計・考案し、導入するとともに立ち上げをはかる。同時に、原子層堆積装置(現有設備)を用いて Al_2O_3/TiO_2 および Al_2O_3/ZrO_2 ナノラミネート薄膜を作製することによって、スーパーキャパシタ性能の確認およびダイヤモンドFETの試作を試みる。平成29年度以降は、平成28年度に立ち上げたガスソース原子層堆積装置を用いて i-AlN/c-GaN ナノラミネート特異構造の作製と最適化、静電容量特性や電気伝導特性からキャリア濃度制御性の実証を試みるともに、FETの試作からキャリア制御性を実証する。

研究体制は、研究代表者の小出を中心とする物質・材料研究機構 光・電子材料ユニットワイドギャップ機能材料グループの井村を研究分担者、ナノテクノロジー融合ステーション(津谷、渡辺)、および採用予定のNIMSポスドク研究者を連携研究者とした研究チームを構成する。図7に研究チームの相互関係図を示す。以下に具体的な研究計画を記す。

【平成28年度】

- (1) 有機金属化合物およびアンモニアを用いたガスソース原子層堆積法を設計考案するとともに導入から立ち上げをはかる(申請設備)。特に現有設備のALD装置や有機金属化合物気相成長(MOVPE)装置を基盤とした高速ジェットバルブおよびアンモニアガスの分解セル装置備することが基本となる。(小出, 井村)
- (2) ALD装置(現有設備)を用いて、シリコン基板およびダイヤモンド基板上に Al_2O_3/TiO_2 および Al_2O_3/ZrO_2 ナノラミネート薄膜を作製し、種々膜厚と静電容量 電圧特性の関係を調べることによって、スーパーキャパシタ性能を評価する。酸化物を用いたナノラミネート構造を最初に試作することによって、目標である i-AlN/c-GaN ナノラミネート特異構造のための準備調査とする。(井村)
- (3) Al_2O_3/TiO_2 および Al_2O_3/ZrO_2 ナノラミネート薄膜をゲート絶縁膜としたダイヤモンドFETを試作し、キャリア濃度制御性を評価する。(井村, 劉, 廖)

【平成29年度以降】

- (1) 平成28年度に立ち上げたガスソース原子層堆積装置を用いて i-AlN/c-GaN ナノラミネート特異構造の作製を試み、最適条件を見出す。(井村)



図4. ダイヤモンド/HfO₂接合トランジスタ概略図およびフォト

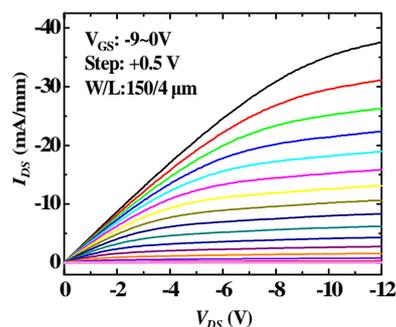


図5. ダイヤモンド/HfO₂接合トランジスタの静特性

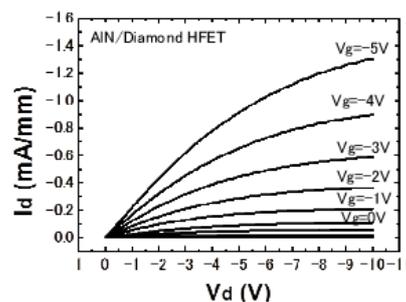


図6. AlN/ダイヤモンド電界効果トランジスタの電気特性.

- (2) 金属/i-AlN/ c-GaNナノラミネート特異構造/ダイヤモンドのMISダイオードから静電容量と膜厚の関係や界面特性との関連性を調査する。(小出, 井村)

i-AlN/c-GaN ナノラミネート特異構造をゲート絶縁膜としたダイヤモンド FET を作製することによってその FET 動作の実証をはかるとともに FET の最適化をはかる。(井村, 劉, 廖)

4. 研究成果

主要な成果をまとめると以下の通りである。

- (1) 2019 年度までに立ち上げた原子層堆積 (ALD) 型 MOVPE 法により、TMA、TMG、および NH_3 それぞれを簡潔的にパルス供給することによる AlN および GaN の原子層堆積法を確立した。 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ ($0 < x < 1$) 混晶膜の固相組成は、パルス時間のみの制御で全組成の成長が可能であり成長の制御性に優れる。AlN、GaN、および $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ ($0 < x < 1$) の 1 分子層成長の実現は、エリプソメトリ法により可視光反射強度のステップ状変化をその場モニターすること、および成長後に測定された膜厚およびステップ数から確認された(図 8)。更に、Si(100) 基板上に [AlN(0.2nm)/GaN(0.04nm)] (250 対) のナノラミネート膜を成長させ、同程度膜厚の AlN 単層膜に比べて 3.6 倍の誘電率増加を観測し、III 族窒化物半導体のナノラミネート膜における誘電率の増大効果を世界で初めて確認した。ナノラミネート膜の STEM 観察から不均一な層状成長が見られ、誘電率増大効果に寄与している可能性も見出した。
- (2) 2019 年度までに当新学術領域科研費内海外共同研究促進プログラムによるテキサス大ダラス校 Auciello 教授との共同研究通して、開発した ALD 法による $\text{TiO}_x[\text{xnm}] / \text{AlO}_x[\text{y nm}]$ ($x, y = 1 \sim 2 \text{ nm}$) ナノラミネート膜をゲート構造に応用したダイヤモンド MOSFET を試作し、ドレイン電流 50mA/mm 程度のトランジスタ特性を得ることに成功し、ゲート比誘電率 70 を達成するとともにナノラミネート構造の有効性を初めて実証した(図 9)。
- (3) 新学術領域内の国内共同研究として、ALD-SiO₂ 膜をダイヤモンド FET に応用に熱安定動作を実証した。

近年、結晶成長技術の進歩により $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ ナノラミネート薄膜構造(膜厚 1nm 以下に制御した極薄膜 2 次元多層膜特異構造)の実現が可能となり、同ナノラミネート薄膜構造において巨大誘電率

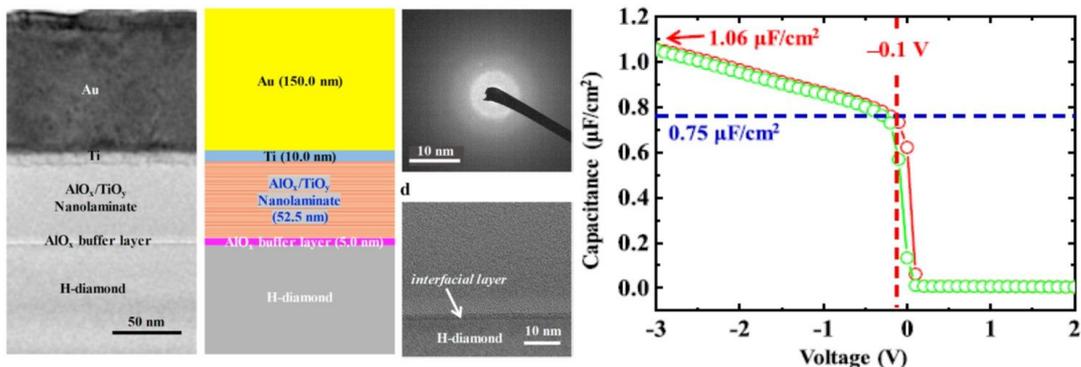


図 9 . $\text{TiO}_x[\text{xnm}] / \text{AlO}_x[\text{y nm}]$ ($x, y = 1 \sim 2 \text{ nm}$) ナノラミネート膜をゲート構造に応用したダイヤモンド MOSFET の断面 STEM 像(左図)とゲートの静電容量 電圧特性 .

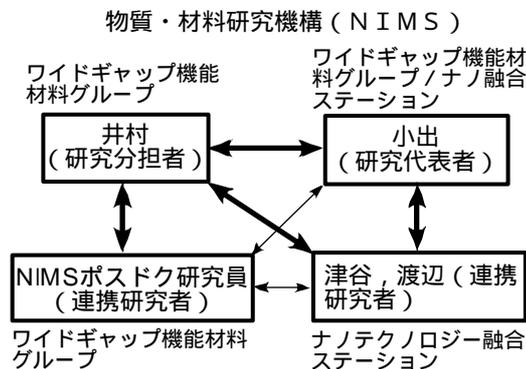


図 7 . 研究チームの連携図

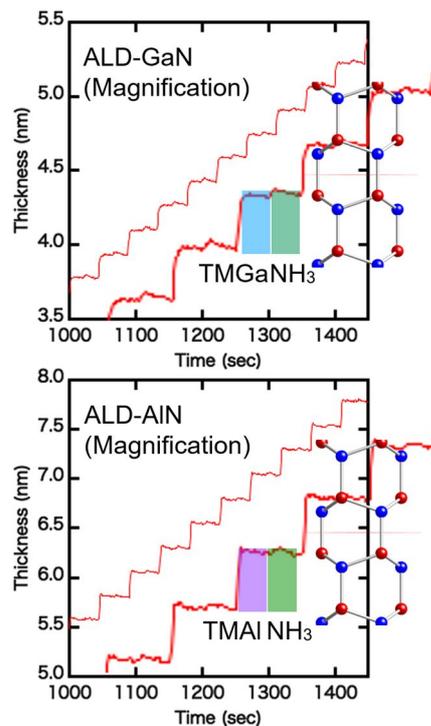


図 8 . 立ち上げた原子層堆積型 MOVPE 法による AlN および GaN の成長様式

k=1000以上の値が報告され、これがマクスウェル-ワグナー誘電体緩和効果に起因したものであることが提唱されている。本研究では、上記酸化物ナノミネート薄膜を窒化物半導体に適応しその応用可能性を探る。具体的には、絶縁体 AlN(i-AlN)と導電体 GaN(c-GaN)を用いた i-AlN/c-GaN ナノミネート特異構造を形成し、その微細構造及び電気的特性を評価する。最終的には i-AlN/c-GaN ナノミネート特異構造を、ダイヤモンド電界効果トランジスタ(FET)のゲート絶縁膜に応用することで、 10^{14} cm^{-2} の高濃度正孔キャリアをトランジスタ動作させ、ダイヤモンド FET の大電流動作を実現することを目的とした。その結果、達成点は以下の通りにまとめられる。

[AlN(0.2nm)/GaN(0.04nm)] (250 対) のナノミネート膜を成長させ、同程度膜厚の AlN 単層膜に比べて 3.6 倍の誘電率増加を観測し、III 族窒化物半導体のナノミネート膜における誘電率の増大効果を世界で初めて実証できた。ダイヤモンド FET への応用は達成できなかったが、海外共同研究成果として TiO_x[xnm] / AlO_x[y nm] (x, y = 1~2 nm) ナノミネート膜をゲート構造に応用したダイヤモンド MOSFET を初めて試作し、動作に成功した。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計36件（うち査読付論文 35件／うち国際共著 7件／うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 B. Ren, M. Liao, M. Sumiya, J. Li, L. Wang, X. Liu, Y. Koide, L. Sang	4. 巻 829
2. 論文標題 Layered boron nitride enabling high-performance AlGaN/GaN high electron mobility transistor	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Alloys and Compounds	6. 最初と最後の頁 1545422-1-5
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.jallcom.2020.154542	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 J. W. Liu, H. Oosato, B. Da, Y. Koide	4. 巻 117
2. 論文標題 Fixed charges investigation in Al ₂ O ₃ /hydrogenated-diamond metal-oxide-semiconductor capacitors	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Applied Physics Letters	6. 最初と最後の頁 163502
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1063/5.0023086	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Jiangwei Liu, Orlando Auciello, Elida de Obaldia, Bo Da, Yasuo Koide	4. 巻 172
2. 論文標題 Science and Technology of Integrated Super-High Dielectric Constant AlO _x /TiO _y Nanolaminates / Diamond for MOS Capacitors and MOSFETs	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Carbon	6. 最初と最後の頁 112-121
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.carbon.2020.10.031	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する
1. 著者名 Zilong Zhang, Liwen Sang, Jian Huang, Waiyan Chen, Linjun Wang, Yukiko Takahashi, Seiji Mitani, Yasuo Koide, Satoshi Koizumi, Meiyong Liao	4. 巻 170
2. 論文標題 Enhanced magnetic sensing performance of diamond MEMS magnetic sensor with boron-doped FeGa film	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Carbon	6. 最初と最後の頁 294-301
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.carbon.2020.08.049	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 H. Wu, Z. Zhang, L. Sang, T. Li, J. You, M. Imura, Y. Koide, M.Y. Liao	4. 巻 170
2. 論文標題 Precise characterization of atomic-scale corrosion of single crystal diamond in H ₂ plasma based on MEMS/NEMS	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Corrosion Science	6. 最初と最後の頁 108651
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.corsci.2020.108651	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Xiaolu Yuan, Jiangwei Liu, Siwu Shao, Jinlong Liu, Junjun Wei, Bo Da, Chengming Li, Yasuo Koide	4. 巻 10
2. 論文標題 Thermal stability investigation for Ohmic contact properties of Pt, Au, and Pd electrodes on the same hydrogen-terminated diamond	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 AIP Advances	6. 最初と最後の頁 55114
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/5.0008167	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Zilong Zhang, Haihua Wu, Liwen Sang, Yukiko Takahashi, Jian Huang, Linjun Wang, Masaya Toda, Indianto Mohammad Akita, Yasuo Koide, Satoshi Koizumi, Meiyong Liao	4. 巻 12
2. 論文標題 Enhancing Delta E Effect at High Temperatures of Galfenol/Ti/Single-Crystal Diamond Resonators for Magnetic Sensing	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 ACS Applied Materials & Interfaces	6. 最初と最後の頁 23155-23164
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acsami.0c06593	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Z. Zhang, Y. Wu, L. Sang, H. Wu, J. Huang, L. Wang, Y. Takahashi, R. Li, S. Koizumi, M. Toda, I. M. Akita, Y. Koide	4. 巻 8
2. 論文標題 Coupling of magneto-strictive FeGa film with single-crystal diamond MEMS resonator for high-reliability magnetic sensing at high temperatures.	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Materials Research Letters	6. 最初と最後の頁 180-186
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1080/21663831.2020.1734680	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 J. Liu, T. Teraji, B. Da, H. Ohsato, Y. Koide	4. 巻 67
2. 論文標題 Effect of Annealing Temperature on Performances of Boron-Doped Diamond Metal-Semiconductor Field-Effect Transistors	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Electron Devices	6. 最初と最後の頁 1680-1685
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/ted.2020.2972979	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 H. Wu, Z. Zhang, L. Sang, T. Li, J. You, Y. Lu, Y. Koide, M.Y. Liao	4. 巻 103
2. 論文標題 Electrical readout/characterization of single crystal diamond (SCD) cantilever resonators.	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Diamond and Related Materials	6. 最初と最後の頁 107711
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.diamond.2020.107711	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Z. Zhang, H. Wu, L. Sang, J. Huang, Y. Takahashi, L. Wang, M. Imura, S. Koizumi, Y. Koide, M. Liao	4. 巻 152
2. 論文標題 Single-crystal diamond microelectromechanical resonator integrating with magneto-strictive galphenol film for magnetic sensor	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Carbon	6. 最初と最後の頁 788-795
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.carbon.2019.06.072	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 J-W Liu, H Oosato, B Da, T Teraji, A Kobayashi, H Fujioka, Y Koide	4. 巻 52
2. 論文標題 Operations of hydrogenated diamond metal-oxide-semiconductor field-effect transistors after annealing at 500 C	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 J. Physics D: Applied Physics	6. 最初と最後の頁 315104
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1361-6463/ab1e31	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 J. Liu, H. Ohsato, Bo Da, Y. Koide	4. 巻 7
2. 論文標題 High Current Output Hydrogenated Diamond Triple-Gate MOSFETs	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 IEEE J. Electron Devices Society	6. 最初と最後の頁 561-565
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/jeds.2019.2915250	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 J. Liu, T. Teraji, B. Da, Y. Koide	4. 巻 40
2. 論文標題 High Output Current Boron-Doped Diamond Metal-Semiconductor Field-Effect Transistors	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 IEEE Electron Device Lett.	6. 最初と最後の頁 1748-1751
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/LED.2019.2942967	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Y. Koide	4. 巻 18-21 Mar.
2. 論文標題 High-k oxides on hydrogenated-diamond for metal-oxide-semiconductor field-effect transistors	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 IEEE International Conference on Microelectronic Test Structures	6. 最初と最後の頁 40-46
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/ICMTS.2019.8730974	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 M. Yang, L. Sang, M. Y. Liao, M. Imura, H. Li, Y. Koide	4. 巻 216
2. 論文標題 Threshold Voltage Instability of Diamond Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistors Based on 2D Hole Gas	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physica Status Solidi (A) Applications and Materials Science	6. 最初と最後の頁 1900538
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/pssa.201900538	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Liao Meiyong, Koide Yasuo, Sang Liwen	4. 巻 121
2. 論文標題 Single Crystal Diamond Micromechanical and Nanomechanical Resonators	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Topics in Applied Physics book series	6. 最初と最後の頁 91 ~ 121
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/978-3-030-12469-4_4	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 M. Liao, L. Sang, T. Shimaoka, M. Imura, S. Koizumi, Y. Koide	4. 巻 5
2. 論文標題 Energy Efficient Metal-Insulator-Metal Semiconductor Field Effect Transistors Based on 2D Carrier Gases	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Advanced Electronic Materials	6. 最初と最後の頁 1800832-1-8
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/aelm.201800832	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 M. Liao, L. Sang, T. Teraji, S. Koizumi, Y. Koide	4. 巻 4
2. 論文標題 Ultrahigh Performance On-Chip Single Crystal Diamond NEMS/MEMS with Electrically Tailored Self-Sensing Enhancing Actuation	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Advanced Materials Technologies	6. 最初と最後の頁 1800325-1-8
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/admt.201800325	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 J.W. Liu, H. Oosato, M. Y. Liao, M. Imura, E. Watanabe, and Y. Koide	4. 巻 112
2. 論文標題 Annealing effects on hydrogenated diamond NOR logic circuits	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Appl. Phys. Lett.	6. 最初と最後の頁 153501
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/1.5022590	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 H. Wu, L. Sang, Y. Li, T. Teraji, T. Li, M. Imura, J. You, Y. Koide, M. Toda, M. Liao	4. 巻 2
2. 論文標題 Reducing intrinsic energy dissipation in diamond-on-diamond mechanical resonators toward one million quality factor	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Physical Review Materials	6. 最初と最後の頁 090601-1-6
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevMaterials.2.090601	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 M. Imura, Y. Ota, R.G. Banal, M. Liao, Y. Nakayama, M. Takeguchi, Y. Koide	4. 巻 215
2. 論文標題 Effect of Boron Incorporation on Structural and Optical Properties of AlN Layers Grown by Metal-Organic Vapor Phase Epitaxy	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Physica Status Solidi (a)	6. 最初と最後の頁 1800282-1-8
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/pssa.201800282	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 K. Wu, M.Y. Liao, L. Sang, J. Liu, M. Imura, H. Ye, Y. Koide	4. 巻 123
2. 論文標題 A density functional study of the effect of hydrogen on electronic properties and band discontinuity at anatase TiO ₂ /diamond interface	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 J. Appl. Phys.	6. 最初と最後の頁 161599-1-7
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/1.5002176	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 M. Imura, S. Tsuda, H. Takeda, T. Nagata, R. G. Banal, H. Yoshikawa, A. Yang, Y. Yamashita, K. Kobayashi, Y. Koide, T. Yamaguchi, M. Kaneko, N. Uematsu, K. Wang, T. Araki, Y. Nanishi	4. 巻 123
2. 論文標題 Surface and bulk electronic structures of unintentionally and Mg-doped In _{0.7} Ga _{0.3} N epilayer by hard X-ray photoelectron spectroscopy	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 J. Appl. Phys.	6. 最初と最後の頁 095701-1-7
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/1.5016574	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 J. Liu and Y. Koide	4. 巻 18
2. 論文標題 An overview of high-k oxides on hydrogenated-diamond for metal-oxide-semiconductor capacitors and field-effect transistors	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 SENSORS	6. 最初と最後の頁 813-1-813-17
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/s18060813	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 井村将隆, パナルライアン, 廖梅勇, 松本隆夫, 熊本明仁, 柴田直哉, 幾原雄一, 小出康夫	4. 巻 45
2. 論文標題 窒化アルミニウム/ダイヤモンドヘテロ構造形成技術の開発と界面特異構造評価	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 日本結晶成長学会誌	6. 最初と最後の頁 1-9
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.19009/jjacg.3-45-1-05	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Liu Jiangwei, Ohsato Hiroataka, Liao Meiyong, Imura Masataka, Watanabe Eiichiro, Koide Yasuo	4. 巻 38
2. 論文標題 Logic Circuits With Hydrogenated Diamond Field-Effect Transistors	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 IEEE Electron Device Letters	6. 最初と最後の頁 922 ~ 925
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/led.2017.2702744	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Liu J. W., Oosato H., Liao M. Y., Koide Y.	4. 巻 110
2. 論文標題 Enhancement-mode hydrogenated diamond metal-oxide-semiconductor field-effect transistors with Y2O3 oxide insulator grown by electron beam evaporator	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Applied Physics Letters	6. 最初と最後の頁 203502 ~ 203502
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/1.4983091	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Liu J. W., Liao M. Y., Imura M., Banal R. G., Koide Y.	4. 巻 121
2. 論文標題 Deposition of TiO ₂ /Al ₂ O ₃ bilayer on hydrogenated diamond for electronic devices: Capacitors, field-effect transistors, and logic inverters	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 224502 ~ 224502
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/1.4985066	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Imura Masataka, Tsuda Shunsuke, Nagata Takahiro, Banal Ryan G., Yoshikawa Hideki, Yang AnLi, Yamashita Yoshiyuki, Kobayashi Keisuke, Koide Yasuo, Yamaguchi Tomohiro, Kaneko Masamitsu, Uematsu Nao, Wang Ke, Araki Tsutomu, Nanishi Yasushi	4. 巻 121
2. 論文標題 Surface and bulk electronic structures of heavily Mg-doped InN epilayer by hard X-ray photoelectron spectroscopy	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 095703 ~ 095703
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/1.4977201	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Banal Ryan G., Imura Masataka, Ohata Hirohito, Liao Meiyong, Liu Jiangwei, Koide Yasuo	4. 巻 214
2. 論文標題 Effect of Sputter Deposition Atmosphere of AlN on the Electrical Properties of Hydrogen-Terminated Diamond Field Effect Transistor with AlN/Al ₂ O ₃ Stack Gate	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 physica status solidi (a)	6. 最初と最後の頁 1700463 ~ 1700463
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/pssa.201700463	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Jiangwei Liu, Hirotaka Ohsato, Xi Wang, Meiyong Liao, and Yasuo Koide	4. 巻 6
2. 論文標題 Design and fabrication of highperformance diamond triple-gate field-effect transistors	5. 発行年 2016年
3. 雑誌名 Sci. Reprints	6. 最初と最後の頁 34757
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/srep34757	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Ryan G. Banal, Masataka Imura, Jiangwei Liu, and Yasuo Koide,	4. 巻 120
2. 論文標題 Structural properties and transfer characteristics of sputter deposition AlN and atomic layer deposition Al ₂ O ₃ bilayer gate materials for H-terminated diamond field effect transistors	5. 発行年 2016年
3. 雑誌名 J. Appl. Phys.	6. 最初と最後の頁 115307
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/1.4962854	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 J. W. Liu, M. Y. Liao, M. Imura, and Y.Koide	4. 巻 120
2. 論文標題 High-k ZrO ₂ /Al ₂ O ₃ bilayer on hydrogenated diamond: Band configuration, breakdown field, and electrical properties of field-effect transistors	5. 発行年 2016年
3. 雑誌名 J. Appl. Phys.	6. 最初と最後の頁 124504
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/1.4962851	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Ryan G. Banal, Masataka Imura,1, Daiju Tsuya, Hideo Iwai, and Yasuo Koide	4. 巻 217
2. 論文標題 Nanometer-thin ALD-Al ₂ O ₃ for the improvement of structural quality of AlN grown on sapphire substrate by MOVPE	5. 発行年 2016年
3. 雑誌名 Phys. Status Solidi A	6. 最初と最後の頁 1600727
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/pssa.201600727	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Masataka Imura, Ryan G. Banal, Meiyong Liao, Jiangwei Liu, Takashi Aizawa, Akihiro Tanaka, Hideo Iwai, Takaaki Mano, and Yasuo Koide	4. 巻 121
2. 論文標題 Effect of off-cut angle of hydrogen-terminated diamond(111) substrate on the quality of AlN towards high-density AlN/diamond(111) interface hole channel	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 J. Appl. Phys.	6. 最初と最後の頁 25702
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/1.4972979	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計22件（うち招待講演 17件 / うち国際学会 15件）

1. 発表者名 Orlando Auciello, LIU, Jiangwei, KOIDE, Yasuo, Elida de Obaldia, DA, Bo.
2. 発表標題 Science/Technology of Interface-Engineered Super High-K Dielectric TiO _x /AlO _y Nanolaminate/Crystal Diamond for New Generation High Power Electronics. Second Workshop on Diamond Electronics
3. 学会等名 Second Workshop on Diamond Electronics 2020 (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 LIU, Jiangwei, OOSATO, Hirotaka, DA, Bo, KOIDE, Yasuo.
2. 発表標題 Diamond Nano-/Micro-Fin Channels for Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistors.
3. 学会等名 The 13th MANA International Symposium 2020 jointly with ICYS. 2020 (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 小出康夫, 井村将隆, 劉 江偉, 廖 梅勇
2. 発表標題 ワイドギャップ半導体異種接合とデバイス応用
3. 学会等名 第81回応用物理学会秋季学術講演会 (招待講演)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Y. Koide
2. 発表標題 Advanced diamond FET and MEMS devices
3. 学会等名 2020 Virtual MRS Spring/Fall Meeting & Exhibit (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Y. Koide, M. Imura, J. Liu, and M. Liao
2. 発表標題 Challenge to development of III-nitride Nanolaminates/Diamond Heterojunction devices
3. 学会等名 Virtual Workshop on Materials Science and Advanced Electronics Created by Singularity (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Y. Koide, J. Liu, B. Da, O. Auciello, E. Obaldia
2. 発表標題 Diamond MOSFETs with a super-high dielectric constant AlOx/TiOx nanolaminate insulator
3. 学会等名 CGCT-8, Category 10. Singularity Project, (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 小出 康夫、劉 江偉、井村 将隆、廖 梅勇
2. 発表標題 族窒化物ナノラミネート特異構造を用いたダイヤモンド電子デバイスの開発
3. 学会等名 2021第68回応用物理学会春季学術講演会 (招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 O. Auciello, Elida de Obaldi, Jiangwei Liu, Y. Koide
2. 発表標題 Science and Technology of Interface-Engineered High-K Dielectric Nanolaminate-Based Oxides / Diamond Films for New Generation High Power Electronics
3. 学会等名 The 13th International Conference on New Diamond and Nano Carbon (NDNC 2019) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1 . 発表者名 Y. Koide
2 . 発表標題 Advanced diamond FET and MEMS devices
3 . 学会等名 2017 International Symposium on Single Crystal Diamond and Electronics (SCDE2019) (招待講演) (国際学会)
4 . 発表年 2019年

1 . 発表者名 Y. Koide
2 . 発表標題 Future prospect of diamond materials for semiconductor industry in 5G era
3 . 学会等名 4th International Carbon Materials Conference & Exposition (CarbonTech 2019) (招待講演) (国際学会)
4 . 発表年 2019年

1 . 発表者名 Y. Koide, J.W. Liu, M. Imura, and M.Y. Liao
2 . 発表標題 High-quality diamond epitaxial layer growth and electron devices application
3 . 学会等名 SSDM2018 (招待講演)
4 . 発表年 2018年

1 . 発表者名 J. Liu, M. Liao, M. Imura, Y. Koide
2 . 発表標題 Enhancement-mode hydrogenated diamond MOSFETs, "29th International Conference on Diamond and Carbon Materials
3 . 学会等名 ICDCM 2018 (招待講演)
4 . 発表年 2018年

1 . 発表者名 J.W. Liu, Y. Koide
2 . 発表標題 Depletion-/enhancement-mode hydrogenated-diamond MOSFETs and MOSFET logic circuits
3 . 学会等名 4th E-MRS & MRS-J ;Symposium (招待講演)
4 . 発表年 2018年

1 . 発表者名 Y. Koide, R. G. Banal, M. Imura, J.W. Liu, and M.Y. Liao
2 . 発表標題 Electrical properties of H-terminated diamond FETs with AlN gate
3 . 学会等名 4th E-MRS & MRS-J, Symposium (招待講演)
4 . 発表年 2018年

1 . 発表者名 Y. Koide
2 . 発表標題 Wide Bandgap III-Nitride and Diamond Devices and Characterization
3 . 学会等名 32nd IEEE International Conference on Microelectronic Test Structures, (ICMTS Conference) (招待講演)
4 . 発表年 2018年

1 . 発表者名 Y. Koide
2 . 発表標題 D/E-mode control of diamond FETs and logic circuit demonstration
3 . 学会等名 2017 International Symposium on Single Crystal Diamond and Electronics (2017 SCDE), June 11-12, 2017, Xi'an Jiantong University, (Xi'an, China) (招待講演) (国際学会)
4 . 発表年 2017年

1 . 発表者名 Y. Koide
2 . 発表標題 Development of normally-on/off diamond MOSFETs and logic circuits
3 . 学会等名 Schulich Symposium, Diamond: From fundamental properties to quantum technologies, Schulich faculty of Chemistry, Technion - Israel Institute of Technology. (招待講演) (国際学会)
4 . 発表年 2017年

1 . 発表者名 Y. Koide, J.W. Liu, M. Imura, and M.Y. Liao
2 . 発表標題 Normally-on/off control of diamond FETs and logic circuit demonstration
3 . 学会等名 E-MRS, Symposium 0, Diamond for electron devices II, (Warsaw, Poland) (招待講演) (国際学会)
4 . 発表年 2017年

1 . 発表者名 KOIDE, Yasuo, LIU, Jiangwei, LIAO, Meiyong, IMURA, Masataka.
2 . 発表標題 High-current triple-gate H-diamond MOSFET
3 . 学会等名 New Diamond and Nano Carbon Conference, (NDNC2017) (国際学会)
4 . 発表年 2017年

1 . 発表者名 M. Imura, R.G. Banal, M.Y. Liao, J. Liu, Y.Koide , T. Matsumoto, N. Shibata, Y. Ikuhara
2 . 発表標題 Microstructure and hole accumulation mechanism of AlN/Diamond(111) heterojunctions prepared by MOVPE
3 . 学会等名 10th International International Conference on Diamond and Carbon Materials 2016 (ICDCM 2016) (招待講演) (国際学会)
4 . 発表年 2016年

1. 発表者名 Y. Koide
2. 発表標題 Wide Bandgap III-Nitride and Diamond Materials and Devices
3. 学会等名 9th Pacific Rim International Conference on Advanced Materials and Processing (PRICM9) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 R.G. Banal, M. Imura, J. Liu, M. Liao, and Y.Koide
2. 発表標題 Sputter deposition AlN and atomic layer deposition Al ₂ O ₃ as bilayer gate materials for Hterminated diamond field effect transistors
3. 学会等名 International Conference on Diamond and Carbon Materials 2016 (ICDCM 2016) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2016年

〔図書〕 計3件

1. 著者名 Banal Ryan G., Imura Masataka, Koide Yasuo	4. 発行年 2017年
2. 出版社 IntechOpen	5. 総ページ数 15
3. 書名 Study of Grain Boundary Character, Chapter 3	

1. 著者名 Liu Jiangwei, Koide Yasuo	4. 発行年 2017年
2. 出版社 Springer	5. 総ページ数 15
3. 書名 Biosensors and Biodetection, Fabrication of Hydrogenated Diamond Metal-Insulator-Semiconductor Field-Effect Transistors	

1. 著者名 Ryan G. Banal, Masataka Imura and Yasuo Koide	4. 発行年 2016年
2. 出版社 INTECH open science/open minds	5. 総ページ数 43-57
3. 書名 Study of Grain Boundary Character, Chapter 3	

〔産業財産権〕

〔その他〕

SUMURAI 「小出康夫」 https://samurai.nims.go.jp/profiles/KOIDE_Yasuo/publications?locale=ja#Paper 小出康夫 http://yankoide.blue.coocan.jp/ 小出康夫 NIMS http://samurai.nims.go.jp/KOIDE_Yasuo-j.html
--

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	劉 江偉 (LIU Jiangwei) (30732119)	国立研究開発法人物質・材料研究機構・機能性材料研究拠点・独立研究者 (82108)	
研究分担者	廖 梅勇 (LIAO Meiyong) (70528950)	国立研究開発法人物質・材料研究機構・機能性材料研究拠点・主幹研究員 (82108)	
研究分担者	井村 将隆 (IMURA Masataka) (80465971)	国立研究開発法人物質・材料研究機構・機能性材料研究拠点・主任研究員 (82108)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関			
米国	Department of MSE	University of Texas, Dallas		
米国	Orlando Auciello教授	テキサス大学ダラス校		