

令和 6 年 6 月 13 日現在

機関番号：82108

研究種目：基盤研究(A)（一般）

研究期間：2020～2023

課題番号：20H00313

研究課題名（和文）異種接合ドーピング法に基づくダイヤモンドのキャリア制御法構築

研究課題名（英文）Develop a carrier control method for diamond using heterojunction doping technique

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・電子・光機能材料研究センター・特命研究員/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） 34,500,000円

研究成果の概要（和文）：ダイヤモンドにおける室温での高キャリア濃度を確保できない欠点を解決する手法として、ヘテロ接合窒化アルミニウムからのキャリアドーピング、およびナノラミネート酸化物薄膜の巨大誘電率効果を利用して、高濃度キャリアを確保・制御する原理の実証を目的とした。特に後者の構想に沿って、原子層堆積法を用いたTiOx[x nm]/AlOx[y nm] (x, y = 1~2 nm) からなる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世界で初めて実証した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

2030年における未来社会には、情報通信技術関連の電力消費量が、全世界の電力需要の20%を超えると予想され、その内訳としてデータセンターにおける電力消費量やデータの送受信のための電力消費量が大幅に増加する。2050年には2024年比において100倍以上の超高速大容量かつ100分の1以下の超低消費電力の無線および光通信、並びに情報処理技術や大規模ネットワークシステムの実現が必要となる。ダイヤモンドは半導体材料の中で最も熱的・化学的に安定な究極の半導体材料であり、高温・極限環境におけるパワー電子デバイスとして期待され、本研究成果はこれら電子デバイスとして実用化に向けた第一歩となると思われる。

研究成果の概要（英文）：In order to solve the drawback of difficulty of high carrier concentration in diamond at room temperature, the purpose of this study is to demonstrate the principle of carrier doping from heterojunction aluminum nitride (AlN) and the giant dielectric constant effect of nano-laminate oxide thin films to secure and control high carrier concentration as a method. As a result, especially in line with the latter concept, a prototype diamond MOSFET in which a nanolaminate film consisting of TiOx[x nm]/AlOx[y nm] (x, y = 1 to 2 nm) using the atomic layer deposition (ALD) technique was applied to the gate structure, and transistor characteristics of about 50mA/mm drain current were obtained. The gate permittivity as large as 70 was achieved, and the effectiveness of the nanolaminate structure was demonstrated for the first time in the world.

研究分野：電子材料工学

キーワード：ダイヤモンド III族窒化物 ヘテロ接合 ナノラミネート構造 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、および高電力デバイスとしての応用が期待される。ダイヤモンドの薄膜成長は、1982年に当研究所にて初めて成功されて以来、高品質単結晶薄膜成長法の確立、p型およびn型伝導制御法の確立、ダイヤモンド表面並びに金属及び絶縁体/ダイヤモンド界面の理解等を通して、光・電子デバイスに展開する要素テクノロジーは着実に進歩してきた。

しかしながら、ダイヤモンドはイオン結合性を持たない共有結合性のワイドギャップ半導体であるため、誘電率が他の半導体に比べ小さく、有効質量モデルからn型およびp型ドーパントのイオン化エネルギー(不純物準位)が大きくなることが予測される。実際、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370meVもの大きな値であるため、室温での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ものと位置づけられる。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。

2. 研究の目的

本研究においては、上記したダイヤモンドの欠点を解決するアイデアとして、異種接合窒化アルミニウム(AIN)からの正孔ドーピング、およびダイポール積層構造を形成するナノラミネート酸化物薄膜の巨大誘電率(高静電容量)効果を利用して、高濃度キャリアを確保・制御する原理の実証と熱安定性を確保することを目的とする。電界効果トランジスタ(FET)を試作することによって、原理実証ともにそのメカニズムを理解する。具体的には、以下に記す2種類の誘電体からなる異種接合構造を用いる。(1)MgドープAIN/ダイヤモンド異種接合のAINからのダイヤモンドへの正孔ドーピング、および(2)TiO₂[xnm]/HfO₂[ynm](x+y=1nm)からなるナノラミネート巨大誘電率薄膜を利用し、AIN異種接合界面の高濃度正孔伝導のしきい値制御を実現することを計画している。

第一の方法は、 p 型ドーパントのMgを添加したAIN(Mg:AINと表記)を絶縁性の酸素終端ダイヤモンドに成長させ、アクセプタMgのイオン化とともにダイヤモンド側に正孔をドーピングさせることをねらう。AIN/ダイヤモンド界面での価電子帯不連続エネルギー E_v は2eVであることが我々の光電子分光測定からわかっており(Iamura, Liao, Koide *et al.* JAP, 2017) またMgのアクセプタ準位は0.6eVであるため、図1に記す低エネルギー側のダイヤモンド価電子帯への正孔ドーピングが可能であり、図2に示すようなMg濃度と同程度の高濃度正孔を発生させることができる。同時にMg:AIN層は絶縁性となるため、図2に示す通り、ゲート絶縁膜として働くことが可能であり、ダイヤモンドに蓄積した正孔濃度を電界制御できる。正孔濃度はドーピングするMg濃度によって制御可能であり、 $1\text{E}18 \sim 1\text{E}20/\text{cm}^3$ をねらう。2009年に研究代表者らは、ダイヤモンド(111)面上に有機金属化合物気相成長(MOVPE)法によって、AINエピタキシャル薄膜の成長に成功している(Iamura&Koide *et al.* JCG2009, DRM2010) 更に2011年には、この異種接合を用いた水素終端表面に限りFETの試作に世界で初めて成功している(Iamura&Koide *et al.* PSSa, 2011) MOVPE成長前処理における水素およびアンモニアガス雰囲気によるダイヤモンド表面の水素化により、ダイヤモンドの水素終端構造ができることによって、 $1\text{E}14/\text{cm}^2$ 程度の高濃度正孔キャリアが発生することを明らかにしている。課題は水素終端表面の低い熱安定性を改善することにあつた。本提案の構造は水素終端層を介さないMg:AINとダイヤモンドの直接接合によって界面の熱安性を向上させることをねらう。

Mg:AIN層のMg濃度は最大 $1\text{E}20\text{cm}^{-3}$ までのドーピングが可能であり、ダイヤモンド内正孔濃度を $1\text{E}13\text{cm}^{-2}$ 以上に高めるとともにダイヤモンド界面の終端構造を制御することで界面の熱安定性を向上させる。最終的には、Mg:AIN層をゲート絶縁膜としてFETを作製し、500の熱安定



図1 . MgドープAIN/ダイヤモンド異種接合の期待されるバンド概念図

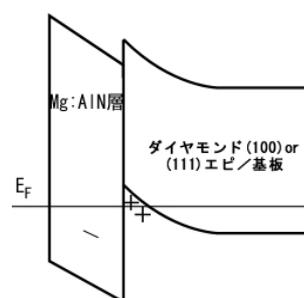


図2 . MgドープAIN/ダイヤモンド異種接合の予想される熱平衡状態バンド図

性や 1kV 以上の耐圧特性試験を施すことによって、界面安定性を実証する。

第二の方法は、 $TiO_2[x \text{ nm}] / HfO_2[y \text{ nm}]$ ($x+y=1nm$) からなるナノラミネート誘電体薄膜を利用し、上記 Mg:AlN / ダイヤモンド内の高濃度正孔を電界制御することを目指す。ナノラミネート誘電体薄膜は、2 種類の誘電体を一對としてダイポール積層構造を形成させることでマクスウェル・ワグナー誘電緩和効果から誘電率 1000 以上を達成できることが報告されている (Lee & Auciello, APL2013)。本方法の目的は、ナノラミネート誘電体薄膜の大静電容量を利用し、単位ゲート電圧当たりの制御電荷量 (正孔濃度) を増大させることによって、ダイヤモンド内の $1E14/cm^2$ 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。第一の方法で示した Mg:AlN ドープ (正孔供給) 層との組み合わせからゲート電界制御させる FET を試作する。2014 年に本概念から HfO_2/Al_2O_3 のナノラミネート構造を作製し、図 3 に示すダイヤモンドの金属 / 絶縁膜型 (MOS) FET を試作したが、誘電率の増大を見出すことはできなかった (Liu & Koide et al. DRM2014)。この経験から、図 4 に示すようなナノ構造即ち、絶縁性 / 半導体の一對の組み合わせ、およびダイポール性を出すために一對の周期 1nm が必要であることを見出している。その経験を踏まえて原子層堆積 (ALD) 法によって半絶縁性 $TiO_2[x \text{ nm}] /$ 絶縁性 $Al_2O_3[y \text{ nm}]$ ($x+y=1nm$) からなるナノラミネート誘電体薄膜を作製し、比誘電率 330 の達成に成功している (Auciello, Liu, & Koide, 2019)。ナノラミネート誘電体薄膜の欠点は、高周波領域での誘電率低下であるため、動作限界周波数も実験的に決定する。100 以上の誘電率が達成できれば十分 $1E14cm^{-2}$ の正孔電荷を 5V 以下の低ゲート電圧で電荷制御が可能であることが期待できる。

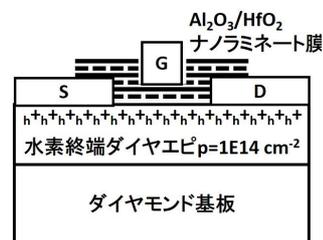


図 3 . 試作した HfO_2/Al_2O_3 ナノラミネート誘電体ゲートダイヤモンド構造の模式図 .

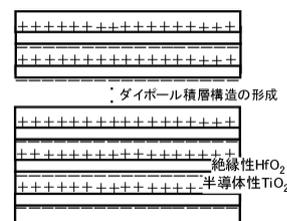


図 4 . 半導体性 $TiO_2 /$ 絶縁性 HfO_2 からなるダイポール積層構造の概念図 .

3 . 研究の方法

Mg:AlN / ダイヤモンド異種接合の作製と TiO_2 / HfO_2 からなるナノラミネート誘電体薄膜の作製を同時並行的に進める。以下に具体的な研究方法を記す。

【 族窒化物半導体 / AlN 異種接合 】

研究代表者らは、有機金属化合物気相成長法により作製した AlN / ダイヤモンド異種接合を利用した FET の動作に既に成功しており、FET 作製プロセスを確立している。まずは、サファイヤ、GaN およびダイヤモンド上に MOVPE 法により Mg ドープ AlN を成長させ、高品質 AlN 成長条件を確立する。

- (1) AlN 層の薄膜成長は、高成長温度 (1250) が可能な MOVPE 法を用いる。これまでの研究成果からダイヤモンド (111) 面に AlN はエピタキシャル成長することは判明しているため、有機金属 Al 化合物とアンモニアガスのモル濃度比、また Mg 有機金属化合物 Cp_2Mg のモル濃度比および基板温度を最適化させることによって、高品質な Mg:AlN ヘテロエピタキシャル膜を得る成長条件を見出す。
- (2) 他の方法として原子層堆積 (ALD) 法を用いた AlN 膜と電子ビーム蒸着法を用いた MgO 膜を連続堆積させてダイヤモンド上に Mg ドープ AlN 膜の成長を試みる。
- (3) Mg:AlN / ダイヤモンド異種接合 FET 作製電気的特性を測定する。

【 ナノラミネート膜 / ダイヤモンド異種接合 】

原子層堆積 (ALD) 法 (現有設備を高度化するため本研究で申請) を用いた $TiO_2[x \text{ nm}] / HfO_2[y \text{ nm}]$ ($x+y=1nm$) からなるナノラミネート膜を Si / 金属テンプレート基板上に作製し、 $TiO_2[x \text{ nm}] / HfO_2[y \text{ nm}]$ の種々膜厚 x, y と堆積温度、更には原料流量とタイムシーケンスの関係を調べ、堆積条件の最適化をはかる。金属 / ラミネート膜 / 金属 (MIM) 構造から静電容量とその測定周波数依存性を調べる。最終的には水素終端ダイヤモンド (100) 及び (111) 基板へ堆積させ、MOS キャパシタを作製することによって、静電容量とその周波数依存性を調べる。

- (1) ナノラミネート膜材料としては TiO_2 および HfO_2 を基材として TiO_2 と Al_2O_3 の組み合わせも調べる。ALD 成長は既存設備を用い、まず MIM 構造を作製することで、ALD 条件下での堆積温度を決定する。同時に堆積温度とタイムシーケンス、ナノラミネート膜総膜厚と静電容量、周波数分散特性、およびリーク電流の関係を調べる。
- (2) ナノラミネート膜の結晶学的構造は既存設備の X 線回折および透過電子顕微鏡を用いて積層構造の確認を行う。
- (3) 半導体パラメータ解析装置を用いて金属 / ナノラミネート / p^+ 型ダイヤモンド MOS ダイオードの静電容量 - 電圧特性を種々周波数条件で測定する。蓄積容量から比誘電率を決定し、誘電率の周波数分散特性を求めることによって最適な対膜厚条件や比誘電率の限界周波数を決定する。

4. 研究成果

【 族窒化物半導体 / AlN 異種接合 】

- (1) 既存設備の原子層堆積(ALD)型の有機金属気相成長(MOVPE)法により、TMA、TMG、およびNH₃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。図5に示す通り、AlN、GaN、および固溶体 Al_xGa_{1-x}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。

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、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) 構築した原子層膜厚のその場モニターを組み合わせた ALD 型 MOVPE 法により、原料ガスをそれぞれ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できた。その成長条件やポスト熱処理を組み合わせた手法により、従来法に比べて、原子層レベルで平坦且つ配向性・結晶性に優れるサファイヤ基板上 AlN 単結晶薄膜の成長に成功し成長方法を確立できた。[Imura and Koide *et al.* AIP Advances, 12, 015203 (2022)]

- (3) ダイヤモンド(100)面上にマイクロ波プラズマ法により水素終端化されたダイヤモンドエピ膜上を成長させ、1200 で Mg ドープ AlN 膜の成長を試みた。電子顕微鏡観察から 1E8cm⁻² 以上の結晶欠陥がダイヤモンド界面近傍に集中的に観察された。AlN は絶縁性であり、選択的なダイヤモンド側への正孔濃度生成は見られなかった。

- (4) ダイヤモンド(100)面上にマイクロ波プラズマ法により表面が水素終端化されたダイヤモンドエピ膜を成長させ、硫酸及び硝酸混酸溶液において300、3時間の溶液処理を施すことによって表面の酸素終端化処理を施した。その後、図7に示すような酸素終端ダイヤモンド表面上にALD法によりAlN膜、電子ビーム蒸着法によりMgO膜を作製し、最終的にAlN(5nm)/MgO(5nm)/AlN(22nm)積層膜を作製し、その後3E-6Paの真空中1200、10分間熱処理を施した。図7にデバイス構造にて電流電圧特性を測定した結果両者において5V印可において5μA程度であり、同様な特性であった。即ち、ダイヤモンド界面近傍のダイヤモンド内に正孔生成は観測されなかった。

- (5) 次に熱処理後の AlN(5nm)/MgO(5nm)/AlN(22nm) 積層膜自身の電気特性を図8に示す構造で項目(7)と同じ条件に作製した調べた結果、10k / 程度の抵抗率であった。

- (6) 以上の結果をまとめると、Mg ドープ AlN 膜は熱処理後には作製できていると判断できるが、当初予定していた AlN 膜からの正孔の変調ドーピングの実証には至らなかった。AlN 内の高濃度な結晶欠陥近傍の点欠陥に正孔がトラップされることが推定され、結晶欠陥濃度を減らした AlN 膜の成長法のさらなる開発が必要であることが結論された。

【 ナノラミネート膜 / ダイヤモンド異種接合 】

- (1) 原子層堆積(ALD)法を用いた TiO_x[x nm] / AlO_x[y nm] (x, y = 1~2 nm) からなるナノラミネート膜を Si(100) / 金属テンプレート基板上に作製し、比誘電率 70~300 を達成した。ラマン散乱分光、光電子分光、および電流電圧特性から酸化物ナノラミネート膜内の TiO_x の酸素欠損による酸素空孔拡散と AlO_x 界面における電荷ダイポール生成が誘電率増加メカニズムの鍵を握ることが示唆された。

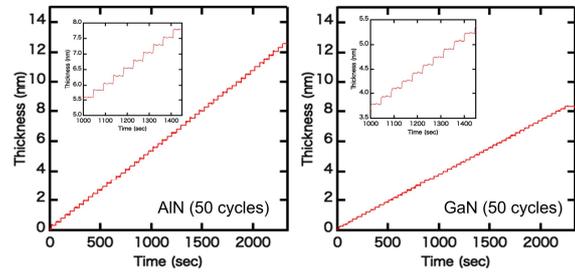


図5. 開発した原子層膜厚のその場モニターを組み合わせたALD型MOVPE法によって成長させたAlN及びGaN膜の1分子層毎の膜厚時間変化

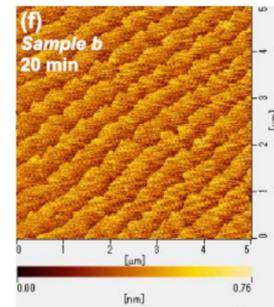


図6. サファイヤ基板上の原子層レベルで平坦なAlN膜表面のAFM像

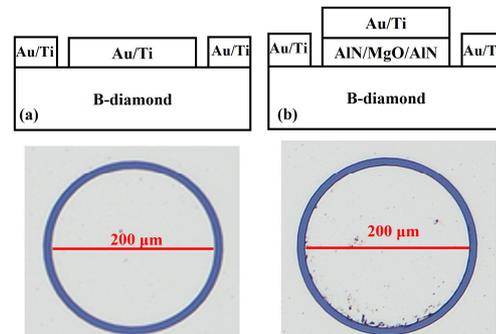


図7. ダイヤモンドエピ膜上に作製された(a)Au/Tiの円形電極、及び(b)AlN/MgO/AlNゲート構造デバイス

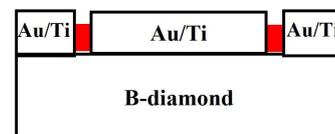


図8. ダイヤモンドエピ膜上に作製されたAlN/MgO/AlNゲート構造デバイス

- (2) 上記開発した $\text{TiO}_x[x \text{ nm}] / \text{AlO}_x[y \text{ nm}]$ ($x, y = 1 \sim 2 \text{ nm}$) 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 を試作し、ドレイン電流 50 mA/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 にナノラミネート構造の電子顕微鏡像を示す。図 10 には FET 構造図及び静特性を示す。

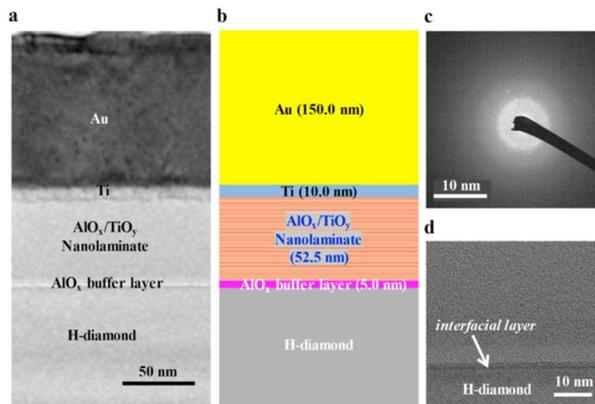
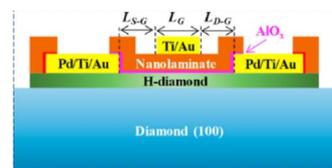


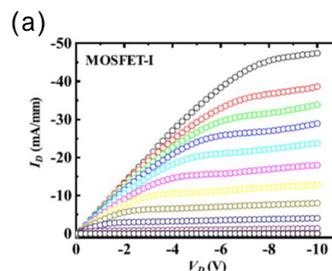
図 9 . a.作製した $\text{TiO}_x[x \text{ nm}] / \text{AlO}_x[y \text{ nm}]$ ($x, y = 1 \sim 2 \text{ nm}$) からなるナノラミネート膜の断面電子顕微鏡像、b.図 a に対応する構造概念図、c. ナノラミネート構造部の電子線回折像、d. 界面近傍の高分解能電子顕微鏡像

- (3) テキサス大ダラス校 Auciello 教授との共同研究を通して開発した ALD 法による $\text{TiO}_x[x \text{ nm}] / \text{AlO}_x[y \text{ nm}]$ ($x, y = 1 \sim 2 \text{ nm}$) ナノラミネート膜をダイヤモンド MOSFET ゲートに応用し、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成果を論文発表した [J. Liu, O. Auciello, E. de

- Obaldia, B. Da, Y. Koide, Carbon, 172 112-121, (2021)]
- (4) $\text{TiO}_x / \text{AlO}_x$ ナノラミネート膜の巨大誘電率のメカニズムを解明する目的で、50 個程度のサンプル作製を通して再現性確認とともに、二つのメカニズム仮説「擬似混晶としての金属界面の空乏層容量」および「酸素空孔拡散・蓄積に起因する界面ダイポール生成」を見出した。



- (5) TCAD シミュレータによりこれまで積み上げてきたダイヤモンド MOSFET の静特性をシミュレートし、これまで解析的に見積もってきたチャネル移動度値を再現したことを確認した。



- (6) $\text{TiO}_x / \text{AlO}_y$ ナノラミネート膜の巨大誘電率のメカニズムを解明する目的に沿って、50 個程度のサンプル作製を通して再現性確認とともに、二つのメカニズム仮説「擬似混晶としての金属界面の空乏層容量」および「酸素空孔拡散・蓄積に起因する界面ダイポール生成」を提唱する論文を発表した。[Liu, Imura, Liao, Koide et al. Nanomaterials, 13, 1256 (2023)]. 図 11 に提案した擬似混晶とみなした金属 (ショットキー) 接合の空乏層容量モデルを示し、図 12 には、 TiO_{2-d} 酸素空孔拡散・蓄積による Al_2O_3 界面でのダイポール形成モデルを示す。

図 10 . (a) 作製したナノラミネート膜ゲート構造の水素終端ダイヤモンド FET の断面構造図。(b) FET の静特性

- (7) 関連して進めてきた、ダイヤモンドに対してアクセプタードープであるボロン(B)を添加した酸素終端ダイヤモンドに対して ALD- Al_2O_3 をゲート酸化膜とする MOSFET を世界最高性能のドレイン電流値を達成し、論文発表した。[Liu, Koide et al. IEEE Tran. EDL, 70, 2199-2203 (2023)]

- (8) 同様に関連して進めてきた水素終端ダイヤモンドの MOSFET のコンタクト抵抗、チャネル抵抗、及び表面抵抗を解析することによって FET デザインによる抵抗低減の重要性を提案した論文発表を行った。[Liu, Koide et al. IEEE Trans. EDL, 69, 1181-1185 (2022)]

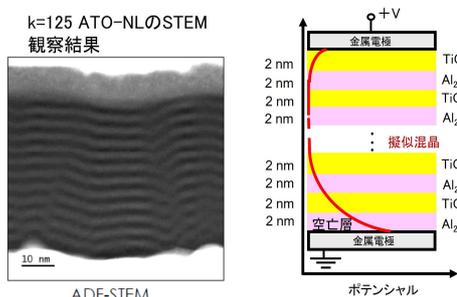


図 11 . 擬似混晶とみなした金属 (ショットキー) 接合の空乏層容量モデル

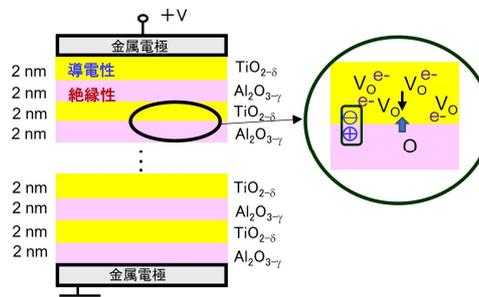


図 12 . TiO_{2-d} 酸素空孔拡散・蓄積による Al_2O_3 界面でのダイポール形成モデル

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計8件（うち査読付論文 8件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Masataka Imura, Hideki Inaba, Takaaki Mano, Nobuyuki Ishida, Fumihiko Uesugi, Yoko Kuroda, Yoshiko Nakayama, Masaki Takeguchi, Yasuo Koide	4. 巻 12
2. 論文標題 Improvement of structural quality of AlN layers grown on c-plane sapphire substrate by metalorganic vapor phase epitaxy using post-growth annealing with trimethylgallium	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 AIP Advances	6. 最初と最後の頁 15203
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1063/5.0076706	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, Hiroataka Ohsato, Bo Da, Yasuo Koide	4. 巻 69
2. 論文標題 Investigation of Ohmic Contact Resistance, Surface Resistance, and Channel Resistance for Hydrogen-Terminated Diamond MOSFETs.	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Electron Devices	6. 最初と最後の頁 1181-1185
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/ted.2022.3140699	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, Tokuyuki Teraji, Bo Da, Yasuo Koide	4. 巻 70
2. 論文標題 Electrical Properties of Boron-Doped Diamond MOSFETs With Ozone as Oxygen Precursor for Al ₂ O ₃ Deposition	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Electron Devices	6. 最初と最後の頁 2199-2203
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/ted.2023.3256349	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, Manabu Togawa, Masaya Miyahara, Hironori Okumura, Jiro Nishinaga, Meiyong Liao, Yasuo Koide	4. 巻 2
2. 論文標題 Highly tolerant diamond Schottky barrier photodiodes for deep-ultraviolet xenon excimer lamp and protons detection	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Functional Diamond	6. 最初と最後の頁 167-174
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1080/26941112.2022.2150526	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 68
2. 論文標題 Boron-Doped Diamond MOSFETs With High Output Current and Extrinsic Transconductance	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Electron Devices.	6. 最初と最後の頁 3963-3967
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/ted.2021.3087115	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 X. Yuan, J-W. Liu, J-L Liu, J. Wei, B. Da, C. Li, Y. Koide	4. 巻 11
2. 論文標題 Reliable Ohmic Contact Properties for Ni/Hydrogen-Terminated Diamond at Annealing Temperature up to 900 °C	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Coatings	6. 最初と最後の頁 470
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/coatings11040470	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, Hideki Inaba, Takaaki Mano, Nobuyuki Ishida, Fumihiko Uesugi, Yoko Kuroda, Yoshiko Nakayama, Masaki Takeguchi, Yasuo Koide	4. 巻 12
2. 論文標題 Improvement of structural quality of AlN layers grown on c-plane sapphire substrate by metalorganic vapor phase epitaxy using post-growth annealing with trimethylgallium	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 AIP Advances	6. 最初と最後の頁 15203
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/5.0076706	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 AlOx/TiOy Nanolaminates / Diamond for MOS Capacitors and MOSFETs	5. 発行年 2021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

〔学会発表〕 計24件（うち招待講演 6件 / うち国際学会 16件）

1. 発表者名 井村 将隆, 稲葉 英樹, 間野 高明, 石田 暢之, 上杉 文彦, 黒田 陽子, 中山 佳子, 竹口 雅樹, 小出 康夫
2. 発表標題 TMGa添加ポストアニール処理によるc面サファイア基板上AINの結晶品質改善
3. 学会等名 2022年第69回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 LIU Jiangwei, OOSATO Hiroataka, DA Bo, KOIDE Yasuo
2. 発表標題 Investigation of Ohmic Contact Resistance, Surface Resistance, and Channel Resistance for Hydrogen-terminated Diamond MOSFETs
3. 学会等名 15th International Conference on New Diamond and Nano Carbons 2022 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 LIU Jiangwei, OOSATO Hiroataka, DA Bo, KOIDE, Yasuo
2. 発表標題 Ohmic Contact Resistance, Surface Resistance, and Channel Resistance for Hydrogen-Terminated Diamond MOSFETs.
3. 学会等名 9th International Symposium on Control of Semiconductor Interfaces (ISCSI-) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 KOIDE Yasuo
2. 発表標題 Cutting-Edge Diamond FET and MEMS Devices
3. 学会等名 2nd Global Summit on Polymer Science and Composite Materials (PolyScience2022). 2022 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 LIU Jiangwei, OOSATO Hirotaka, DA Bo, KOIDE Yasuo
2. 発表標題 Resistance clarification in hydrogen-terminated diamond MOSFETs.
3. 学会等名 令和4年応用物理学会秋季学術講演会. 2022
4. 発表年 2022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 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 2021年

1. 発表者名 Orlando Auciello, 劉 江偉, 小出 康夫, Elida de Obaldia
2. 発表標題 Science and Technology of Integrated Multifunctional Super High-K Dielectric Oxide Nanolaminates / Diamond for New Generation High Power Electronics. Virtual Workshop on Materials Science and Advanced Electronics Created by Singularity
3. 学会等名 Virtual Workshop on Materials Science and Advanced Electronics Created by Singularity (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 劉 江偉, 寺地 徳之, 達 博, 小出 康夫
2. 発表標題 High output current boron-doped diamond MESFETs. Virtual Workshop on Materials Science and Advanced Electronics Created by Singularity.
3. 学会等名 Virtual Workshop on Materials Science and Advanced Electronics Created by Singularity (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 劉 江偉, Orlando Auciello, Elida de Obaldia, 達 博, 小出 康夫
2. 発表標題 Super high-dielectric constant Al ₂ O ₃ /TiO ₂ nanolaminates deposited by the atomic layer deposition technique (for diamond MOSFETs).
3. 学会等名 マテリアル先端リサーチインフラ オンラインセミナー 『原子層堆積技術 (ALD) による成膜技術』 . 2021
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 劉 江偉, 大里 啓孝, 達 博, 小出 康夫
2. 発表標題 Triple-gate fin-type hydrogenated diamond MOSFETs.
3. 学会等名 14th International Conference on New Diamond and Nano Carbons (NDNC) 2020. 2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 劉 江偉, Orlando Auciello, Elida de Obaldia, 達 博, 小出 康夫
2. 発表標題 An AlO _x /TiO _y nanolaminate on hydrogenated diamond for metal-oxide-semiconductor electronic devices.
3. 学会等名 14th International Conference on New Diamond and Nano Carbons (NDNC) 2020. 2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 劉 江偉, Elida de Obaldia, 達 博, 小出 康夫
2. 発表標題 Science and Technology of Integrated Super-High Dielectric Constant AlO _x /TiO _y Nanolaminates / Diamond for Transformational Nanoelectronics
3. 学会等名 IEEE 2021 ISAF-ISIF-PFM Joint Conference. 2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Orlando Auciello, 劉 江偉, Elida de Obaldia, 達 博, 小出 康夫
2. 発表標題 Science and Technology of Integrated Super-High Dielectric Constant AlO _x /TiO _y Nanolaminates / Diamond for MOS Capacitors and MOSFETs.
3. 学会等名 2021 MRS Spring Meeting & Exhibit (招待講演)
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 第68回応用物理学会春季学術講演会. 2021 (招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 劉 江偉, 大里 啓孝, 達 博, 寺地 徳之, 小林 篤, 藤岡 洋, 小出 康夫.
2. 発表標題 Operations of hydrogenated diamond MOSFETs after high-temperature annealing
3. 学会等名 The 8th Asian Conference on Crystal Growth and Crystal Technology. 2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 井村 将隆, 小出 康夫
2. 発表標題 Development of Atomic Layer Deposition Technique of Al _x Ga _{1-x} N for Hydrogen-terminated diamond MIS-FETs
3. 学会等名 The 8th Asian Conference on Crystal Growth and Crystal Technology. 2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 劉 江偉, 寺地 徳之, 達 博, 大里 啓孝, 小出 康夫
2. 発表標題 Development of Boron-Doping Diamond-Based Metal-Semiconductor Field-Effect Transistors
3. 学会等名 MANA INTERNATIONAL SYMPOSIUM 2021 jointly with ICYS. 2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 小出 康夫, 劉 江偉, 達 博, Orlando Auciello, Elida de Obaldia
2. 発表標題 Diamond MOSFETs with a super-high dielectric constant AlOx/TiOx nanolaminate insulator.
3. 学会等名 The 8th Asian Conference on Crystal Growth and Crystal Technology On-Line Conference. 2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Masataka Imura, Yasuo Koide
2. 発表標題 Development of Atomic Layer Deposition Technique of AlxGa1-xN for Hydrogen-terminated diamond MIS-FETs
3. 学会等名 The 8th Asian Conference on Crystal Growth and Crystal Technology (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Yasuo Koide, Jiangwei Liu, Bo Da, Orlando Auciello, Elida de Obaldia
2. 発表標題 Diamond MOSFETs with a super-high dielectric constant AlOx/TiOx nanolaminate insulator
3. 学会等名 The 8th Asian Conference on Crystal Growth and Crystal Technology (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Jiangwei Liu, Hirotaka Oosato, Bo Da, Tokuyuki Teraji, Atsushi Kobayashi, Hiroshi Fujioka, and Yasuo Koide
2. 発表標題 Operations of hydrogenated diamond MOSFETs after high-temperature annealing
3. 学会等名 The 8th Asian Conference on Crystal Growth and Crystal Technology (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Yasuo Koide
2. 発表標題 Advanced diamond FET and MEMS devices
3. 学会等名 MRS Spring & Fall Meeting, EL15: Ultra-Wide Bandgap Materials, Devices and Systems (招待講演)
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 シンポジウム「第3世代異種材料接合と膜成長自在制御: 界面ナノ・キベルネテス(舵手)」(招待講演)
4. 発表年 2020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年第68回応用物理学会春季学術講演会 シンポジウム「特異構造の結晶科学~学術とエレクトロニクス展開~」(招待講演)
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

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・電子・光機能材料研究センター・主幹研究員 (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・電子・光機能材料研究センター・主席研究員 (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・電子・光機能材料研究センター・主幹研究員 (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
---------	---------