

令和元年6月18日現在

機関番号：82108

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K06330

研究課題名(和文)窒化物/酸化物積層構造による強誘電体特性の発現とダイヤモンドFETへの応用

研究課題名(英文) Investigation of Ferroelectric Property Based on Nitride/Oxide Stack Structure and Its Application for Diamond FET

研究代表者

井村 将隆 (Imura, Masataka)

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

研究者番号：80465971

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：ダイヤモンドは多くの優れた特性を有するため、過酷な環境下で動作可能なパワーデバイスの材料として有望なワイドギャップ半導体である。本研究では、まず表面正孔導電層を有す水素終端ダイヤモンド上へ窒化物単膜構造及び窒化物/酸化物積層構造を形成する技術の確立を図った。次に、これら構造体の絶縁特性及び強誘電体特性を調査した。最後に、これらの構造をダイヤモンドFETのゲート絶縁膜に応用することで、オン電流値 ~ 180 A/mm、耐圧値 ~ 250 VのFETの試作に成功した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

パワースイッチングデバイス用に開発されていたダイヤモンドFETでは、大電流動作・高耐圧(低リーク電流)特性を得るために重要な高いキャパシタンス値と高いエネルギーギャップ値を同時に満たすデバイス構造を適応するのが困難であった。本研究で検討を行ったAIN及びAIN/Al₂O₃積層構造は、高いキャパシタンス値と高いエネルギーギャップ値を同時に得ることができ、これらの構造を用いたFETは、大電流動作・高耐圧特性を有す可能性が高いことが明らかとなった。また本研究対象であるダイヤモンドFETは、自動車・無線通信・宇宙開発等の幅広い分野で応用が可能であり、本研究はその礎を築くものに位置付けられる。

研究成果の概要(英文)：Diamond is promising wide-gap semiconductor for the power devices operated under the harsh environment owing to its excellent material property. In this study, the fabrication technique of nitride-based single layer and nitride/oxide stack layer structures on hydrogen-terminated diamond with surface hole conductive layer was explored as the first step. Next, the insulating and ferroelectric properties of these structures were investigated. Finally, these structures were adopted on diamond FET. As the results, the diamond FETs with on current (~ 180 mA/mm) and breakdown voltage (~ 250 V) were successfully obtained.

研究分野：半導体デバイス

キーワード：窒化物半導体法 MPCVD法 ダイヤモンドスパッタ堆積法 電界効果トランジスタ 強誘電体 パワースイッチングデバイス MOCVD

様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

ダイヤモンドは多くの優れた特性を有するワイドギャップ半導体であるため、過酷な環境下で動作可能なパワースイッチングデバイスの開発材料として有望である。水素終端構造を有すダイヤモンドは、表面水素と原子及び分子との化学結合を制御することで正孔導電層を誘起させ、更にその正孔濃度を変化させることが出来るため、電界効果トランジスタ(FET)として近年積極的に研究されている。特にゲート絶縁膜/正孔チャネル(表面正孔導電層)/ダイヤモンド構造を用いたダイヤモンドFETの開発には、多くの研究者が取り組んでいる。

しかしながら、ダイヤモンドのエネルギーギャップ値が約 5.5 eV であるため、ゲート絶縁膜には 5.5 eV より更に高いエネルギーギャップ値が要求される。また高密度の正孔導電層を制御するためには実効的なキャパシタンス値を大きくする工夫が必要である。そのため、ダイヤモンドFETにおいて大電流動作・高耐圧(低リーク電流)特性を得るためには、高いキャパシタンス値と高いエネルギーギャップ値を同時に満たす材料及びデバイス構造の検討が不可欠である。しかしながら、材料のエネルギーギャップと比誘電率にはトレードオフの関係があるため、材料の検討のみでは不十分であり、材料とデバイス構造を同時に検討することが要求されていた。

そこで本研究では、我々がこれまでに行ってきた材料研究とデバイス構造検討を組み合わせ、新規材料特性・デバイス構造形成技術の探索を行い、ダイヤモンドFETのデバイス特性改善に取り組んだ。

2. 研究の目的

本研究では、まず(i)AlN/Al₂O₃積層構造による新規特性探索とダイヤモンドFETへの応用を行った。続いて(ii)ダイヤモンド基板上への単結晶AlN単層構造形成技術の検討とその諸特性の評価を行った。最後に(iii)新規物質BAIN結晶成長技術探索を行った。

3. 研究の方法

(1)表面正孔キャリアの形成方法

表面正孔伝導層は、水素プラズマ処理及び水素+アンモニア高温熱処理にて形成した。水素プラズマ処理は、マイクロ波プラズマ気相成長(MPCVD)装置を用いた。水素+アンモニア高温熱処理は、有機金属化合物気相成長(MOVPE)装置を用いた。

(2)ゲート絶縁膜の成長(形成)方法と構造最適化

AlN/Al₂O₃積層構造の各層は、原子層体積成長(ALD)法とスパッタ堆積(SPD)法を用いて成長(形成)した。単結晶AlN単層構造は、MOVPE法を用いて成長(形成)した。BAIN結晶成長は、MOVPE法を用いて検討した。結晶学的・電氣的・電子的諸特性の結果をもとに、構造最適化を行った。

(3)FETデバイスプロセス

デバイスプロセスは、素子分離→ソース-ドレイン電極形成→ゲート絶縁膜形成→ゲート電極形成の工程を経て作製した。各工程で適宜、レーザーリソグラフィ法、リフトオフ法、UVオゾン処理法、誘導結合プラズマエッチング法、電子ビーム蒸着法、高真空DCプラズマ堆積法を用いた。ソース-ドレイン電極はPd/Ti/Au、ゲート電極はTi/Auを用いた。FET特性は、半導体パラメータアナライザーを用いて評価した。

4. 研究成果

(i)AlN/Al₂O₃積層構造による新規特性探索とダイヤモンドFETへの応用

ALD法を用いてAl₂O₃を堆積後、SPD法を用いてAlNを堆積させた。X線回折(XRD)法及び透過型電子顕微鏡(TEM)法を用いて結晶構造を評価した結果、Al₂O₃はアモルファス構造、AlNはc軸配向した多結晶構造を有していることが明らかとなった。続いてAlN/Al₂O₃積層構造を用いてダイヤモンドFETを作製し評価した結果を図1、2に示す。図1はデバイスの光学顕微鏡写真、図2は、FET静特性である。デバイスは良好なピンチオフ特性を示しており、最大ドレイン電流は、-58 mA/mmであった。

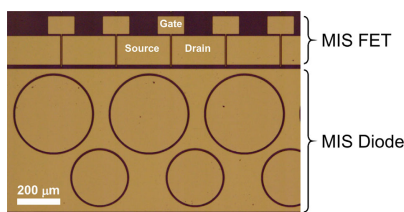


図1 光学顕微鏡像

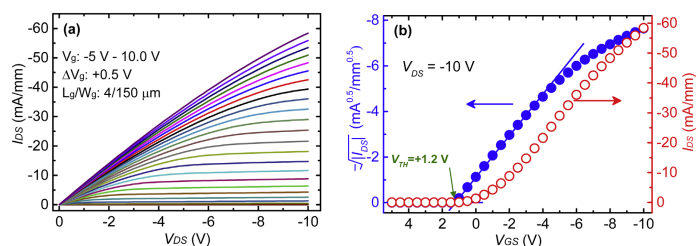


図2 FET静特性 (a) I_d - V_d 特性、(b) I_d - V_g 特性

続いて、SPD 法により作製した AlN の断面走査型電子顕微鏡(SEM)像と分極特性を図 3、4 に示す。膜厚 300 nm の AlN において、強誘電体特性起因のプロファイルが確認できる。またこの強誘電体特性は、AlN の質によって変化するため、AlN 中の局所的な結晶欠陥(固定電荷)が強誘電体特性発現に寄与していると考えられる。

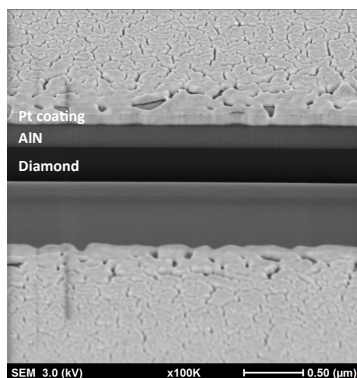


図 3 断面 SEM 像

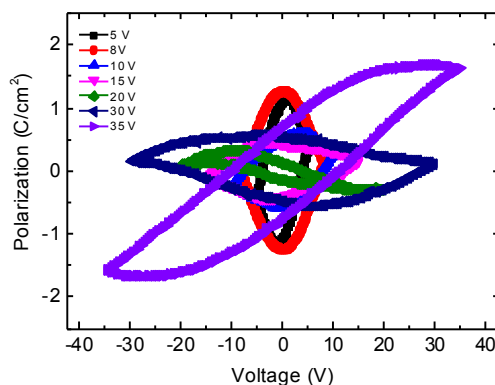


図 4 分極特性 P-E カーブ

上記結果を踏まえゲート絶縁膜の種類と構造の最適化を行った。その結果、オン電流値としては比較的良好な値(-180 A/mm)と耐圧(~250 V)を同時に得ることに成功した。

(ii)ダイヤモンド基板上への単結晶 AlN 単層構造形成技術の検討とその諸特性の評価

AlN の分極を積極的に利用してダイヤモンド FET の特性改善を行う目的で、ダイヤモンド基板上への単結晶 AlN 単層構造形成技術の検討を行った。図 5、6 に XRD 法および X 線光電子分光(XPS)法を用いて評価した AlN の結晶学的構造・電子状態構造結果を示す。図 5 より c 軸配向した単結晶 AlN がダイヤモンド基板上に得られていることが確認できる。また XPS コアスペクトル及び価電子帯(VB)スペクトルを評価し、エネルギーバンドオフセットを見積もった。その結果を図 6 に示す。AlN とダイヤモンドのエネルギーバンドオフセットは Type II 型(スタaggered型)を呈しており、VB オフセットは約 2.0 eV であった。

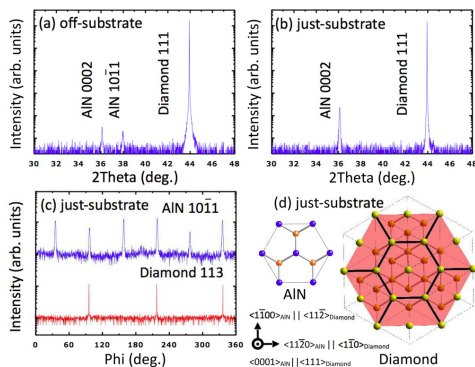


図 5 XRD プロファイル

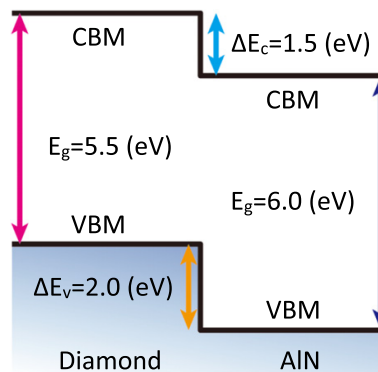


図 6 エネルギーバンドオフセット

(iii)新規物質 BAIN 結晶成長技術探索

新規物質探索として BAIN の結晶成長に着目し、結晶成長の検討を行った。AlN を母体材料として B のドーピングを行った。図 7、8 に結果の一部を示す。図 7 は、二次イオン質量分析法(SIMS)により得られたプロファイル、図 8 は、断面走査型透過電子顕微鏡(STEM)の結果である。SIMS の分解能以下の精度において B は AlN 中に均一に取り込まれており、2-4%の B ドーピング濃度において、過度な結晶性の乱れは観測されなかった。また TEM 電子回折パターンより、単結晶 BAIN が得られていることが確認できる。しかしながら、STEM 像よりナノレベルの結晶性の乱れが観察されており、この乱れは B が AlN と結晶学的に結合せず取り込まれているために起こってしまったのだと考えられる。

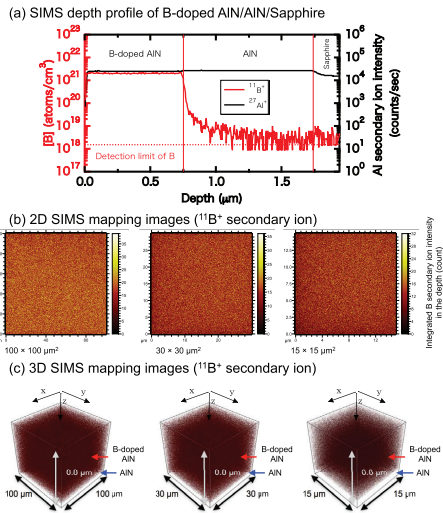


図 7 BAlN/AlN の SIMS プロファイル

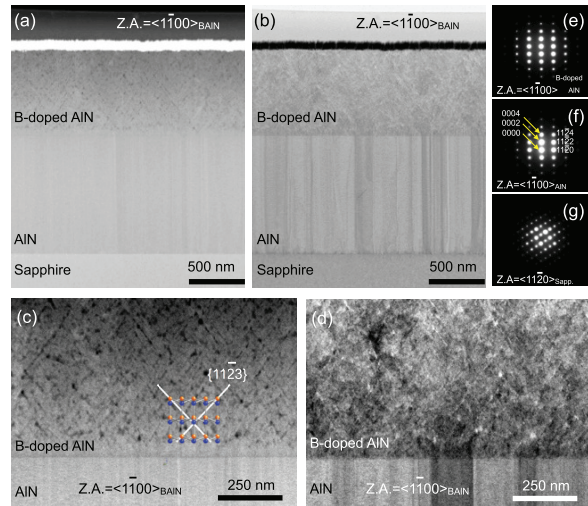


図 8 BAlN/AlN 断面 STEM 像

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 (計 13 件のうち 5 件を記載)

1. M. Imura, Y. Ota, R.G. Banal, M. Liao, Y. Nakayama, M. Takeguchi, and Y. Koide, *Physica Status Solidi A* 215, 1800282 (2018). “*Effect of Boron Incorporation on Structural and Optical Properties of AlN Layers Grown by Metal-Organic Vapor Phase Epitaxy*”

DOI:10.1002/pssa.201800282.

査読有り

2. 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, and Y. Nanishi, *Journal of Applied Physics* 123, 095701 (2018). “*Surface and bulk electronic structures of unintentionally and Mg-doped In 0.7Ga 0.3N epilayer by hard X-ray photoelectron spectroscopy*”

DOI:10.1063/1.5016574.

査読有り

3. M. Imura, S. Tsuda, 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, and Y. Nanishi, *Journal of Applied Physics* 121, 095703 (2017). “*Surface and bulk electronic structures of heavily Mg-doped InN epilayer by hard X-ray photoelectron spectroscopy*”

DOI:10.1063/1.4977201.

査読有り

4. M. Imura, R.G. Banal, M. Liao, J. Liu, T. Aizawa, A. Tanaka, H. Iwai, T. Mano, and Y. Koide, *Journal of Applied Physics* 121, 025702 (2017). “*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*”

DOI:10.1063/1.4972979.

査読有り

5. R.G. Banal, M. Imura, H. Ohata, M. Liao, J. Liu, and Y. Koide, *Physica Status Solidi A* 214, 1700463 (2017). “*Effect of Sputter Deposition Atmosphere of AlN on the Electrical Properties of Hydrogen-Terminated Diamond Field Effect Transistor with AlN/Al₂O₃ Stack Gate*”

DOI:10.1002/pssa.201700463.

査読有り

〔学会発表〕（計 22 件のうち 5 件を記載）

1. M. Imura, M. Y. Liao, and Y. Koide, Development of AlN/Diamond heterostructure formation and unique interface property, European Materials Research Society (E-MRS) 2018 Fall Meeting, 09/17-09/20, 2018, Warsaw University of Technology, Warsaw, Poland. Invited
2. M. Imura, M. Y. Liao, and Y. Koide, Vacuum-Ultra-Violet Diamond-based Photodetector for high-power excimer lamp, International Workshop on UV Materials and Devices 2017 (IWUMD2017), 11/14-11/18, 2017, the Centennial Hall Kyushu University School of Medicine, Fukuoka, Japan.
3. M. Imura, R. G. Banal, J. Liu, M. Y. Liao, and Y. Koide, Improvement on electrical properties of H-terminated diamond FETs using sputter deposition AlN/ atomic layer deposition Al₂O₃ stack gate structure, 28th International Conference on Diamond and Carbon Materials, 09/03-09/07, 2017, Gothia Towers, Gothenburg, Sweden.
4. M. Imura, R. G. Banal, M. Y. Liao, J. W. Liu, T. Aizawa, A. Tanaka, H. Iwai, T. Mano, and Y. Koide, Effect of off-cut angle of hydrogen-terminated diamond(111) substrate on the quality of AlN towards high-density AlN/diamond(111), 11th New Diamond and Nano Carbons Conference (NDNC 2017), 05/28-06/01, 2017, Cairns, Australia.
5. M. Imura, R. G. Banal, J. W. Liu, M. Y. Liao, and Y. Koide, Electrical Properties of H-terminated Diamond FETs with AlN insulating material sputter-deposited under Ar+N₂ Atmosphere, Hasselt Diamond Workshop 2017 - SBDD XXII, 03/08-03/10, 2017, The cultuurcentrum Hasselt, Hasselt, Belgium.

〔その他〕

ホームページ等

http://samurai.nims.go.jp/IMURA_Masataka-j.html

6. 研究組織

(1)研究協力者

研究協力者氏名：小出 康夫

ローマ字氏名：KOIDE, Yasuo

※科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。