

科学研究費助成事業（学術研究助成基金助成金）研究成果報告書

平成 25 年 6 月 12 日現在

機関番号：82108

研究種目：若手研究（B）

研究期間：2011～2012

課題番号：23760319

研究課題名（和文）窒化アルミニウム／ダイヤモンドヘテロ接合を用いた革新的電界効果トランジスタ

研究課題名（英文）Development of AlN/Diamond Heterojunction Field Effect Transistor

研究代表者

井村 将隆（IMURA MASATAKA）

独立行政法人物質・材料研究機構・光・電子材料ユニット・研究員

研究者番号：80465971

研究成果の概要（和文）：窒化アルミニウム(AlN)/ダイヤモンドヘテロ構造を用いた p チャネル電界効果トランジスタ(FET)の特性改善及びその動作原理の解明を行った。AlN は有機金属化合物気相成長法を用いダイヤモンド基板上に成長させた。ソース-ドレイン電極直下の AlN を電極堆積前に塩素ガスを用いて完全にエッチングし、その後、オーミック電極にパラジウムを用いることで FET 特性を大幅に改善させた。酸素終端構造を有すダイヤモンド基板上に、水素とアンモニアの混合ガス雰囲気下にて熱処理(1250°C)を施し、その後 AlN を成長させることで、密着性の良い AlN を再現性良く得ることができ、同時にこの熱処理が表面正孔キャリアを形成していることが明らかとなった。またデバイスはノーマリオンモードで FET 動作していることから、AlN が正孔キャリアの保護膜+絶縁膜として機能していると考えられる。

研究成果の概要（英文）：

The device properties of AlN/diamond heterojunction p-channel FET were improved and the operation mechanism of this FET was investigated. AlN was grown on diamond substrates using metalorganic vapor phase epitaxy. Owing to the etching of AlN just below the source-drain electrodes by Cl₂ gas and the adopting the Pd for ohmic contacts, the FET performance was drastically improved. The thermal treatment (1250 °C) in the mixed H₂ and NH₃ atmosphere for oxygen-terminated diamond surface produced the AlN with good adhesion to diamond substrates and the surface hole-carrier at the same time. Judged from the fact that the FET had a normally-on mode, AlN was considered to be worked as the protection and insulating layer.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
交付決定額	3,400,000	1,020,000	4,420,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：電子デバイス・電子機器

キーワード：ダイヤモンド、窒化アルミニウム、電界効果トランジスタ、ヘテロ接合

1. 研究開始当初の背景

次世代パワーエレクトロニクス分野では、過酷な環境下で安定動作可能な超高速・ハイパワースイッチングデバイスの開発・実現が急務であり、シリコン(Si)半導体に代替する屈強なワイドギャップ半導体の導入が不可欠である。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高出力・高周波電界効果トランジスタ(FET)の材

料として、有望なワイドギャップ半導体である。しかしながらダイヤモンド内のドーパントのイオン化エネルギーは大きく、室温において半導体光・電子デバイスとして駆動させるための十分な電子および正孔濃度を確保することは容易ではない。それ故、導電性制御技術の確立が急務であり、高出力・高周波 FET 特性を得るための鍵である。現在、上記課題を解決する手法として、表面水素終端層

をチャンネルに用いる水素終端ダイヤモンド FET やデルタドープダイヤモンド FET の研究が積極的に行われているが、解決すべき課題が多くあり、実用化への障壁が高くなっているのが現状である。

2. 研究の目的

このような状況を鑑みて申請者は、材料・物質特性の観点から究極の半導体である窒化アルミニウム(AIN)・ダイヤモンドを選定し、両材料のヘテロ構造(以下このヘテロ構造を AIN/Diamond と記述)を利用したダイヤモンド FET デバイスを作製することで上記課題の解決を試みた。

3. 研究の方法

AIN/Diamond を形成するために、AIN をダイヤモンド基板上に有機金属化合物気相成長(MOVPE)法を用いて、ヘテロエピタキシャル成長させた。AIN の安定した結晶構造は六回対称構造を有すウルツ鉱構造であるため、成長用ダイヤモンド基板には、同じ六回対称構造を有す(111)面を用いた。基板には、不純物が 1 ppm 以下の IIa 型を用いた。Al 原料としてトリメチルアルミニウム(TMAI)、N 原料としてアンモニア(NH₃)を用いた。成長温度、成長圧力、TMAI 流量、NH₃ 流量は、それぞれ 1250°C、133×10² Pa、30-100 sccm、100-1000 sccm を用いた。AIN の膜厚は成長時間と原料の流量にて制御した。

FET デバイスは、①素子分離、②ソースドレイン電極形成、③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、誘導結合プラズマエッチング法、電子ビーム蒸着法を用いた。ソースドレイン電極はパラジウム/チタン/金(Pd/Ti/Au)、ゲート電極はニッケル/金(Ni/Au)を用いた。図1に結晶成長からデバイスプロセスまでの模式図を示す。

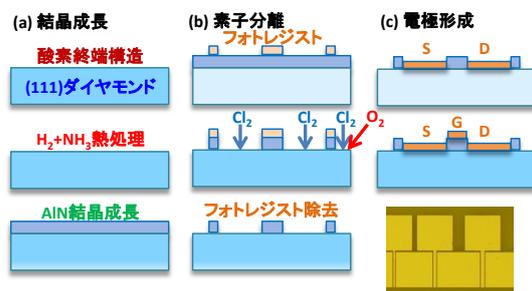


図1 結晶成長からデバイスプロセスまでの模式図

4. 研究成果

電流-電圧特性の結果を図 2 に示す。本結果は、AIN の膜厚が 380 nm と比較的厚い時の特性である。またドレイン電流はゲート幅にて規格化している。本デバイスは、p チャ

ネルのノーマリーオンモード特性を示しており、閾値は、 3.5 ± 0.2 V であった。ドレイン電流は、 -1.4 mA/mm と比較的大きな値が得られており、その際の相互コンダクタンスは 0.45 mS/mm であった。

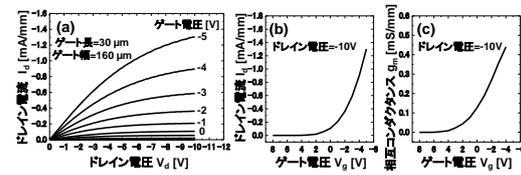


図2 電流-電圧特性：(a) I_d - V_d 、(b) I_d - V_g 、(c) g_m - V_g

続いて、静電容量-ゲート電圧特性の結果を図 3 に示す。静電容量はゲート・ソース間の容量(C_{gs})である。測定周波数は 1 MHz である。デバイスは p 型半導体の振る舞いをしており、キャリアの蓄積および空乏状態の確認が取れる。また $1/C_{gs}^2$ の傾きよりキャリア密度分布を計算したところ、 $\sim 10^{11}$ cm⁻² の正孔キャリアが 2 次的に蓄積していることが明らかになった。

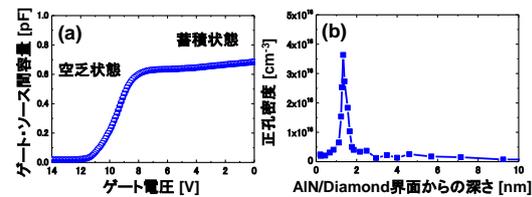


図3 静電容量-電圧特性：(a) C_{gs} - V_g 、(b) 正孔分布

最後に、AIN 成長直前の熱処理の雰囲気ガスに H₂+NH₃ を用いているため、この処理後の表面伝導特性を調査した。Pd/Ti/Au を用い、Van der Pauw 法によるホール効果測定を行った結果、正孔キャリアが誘発していることが明らかとなり、その際のシート抵抗、シートキャリア密度、移動度は、それぞれ 1.7 ± 0.2 kΩ/sq、 $1 \pm 1 \times 10^{14}$ cm⁻²、 18 ± 2 cm²/Vs であった。この結果、本デバイスは、H₂+NH₃ 熱処理により、表面正孔キャリアが生成しており、水素終端ダイヤモンド FET と酷似した動作原理であることが明らかとなった。また X 線光電子分光測定の結果、N 1s(400.0±0.5 eV) に起因したピークの確認が取れており、これは炭素-窒素(C-N)化学結合が表面に形成されていることを示唆していた。

ダイヤモンド基板への MOVPE 法による H₂+NH₃ 熱処理が AIN の密着性を改善し同時に表面正孔キャリアを形成しており、従来の水素終端ダイヤモンド FET と全く異なるプロセスを用いているにも関わらず動作原理が酷似していた。またデバイスはノーマリーオンモードで動作していることから、AIN が正孔キャリアの保護膜として機能していると考えられる。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 8 件)

- ① M. Imura, U. Gautam, K. Nakajima, Y. Koide, H. Amano, and K. Tsuda: "Analysis of Broken Symmetry in Convergent-Beam Electron Diffraction along <11-20> and <1-100> Zone-Axes of AlN for Polarity Determination", Jpn. J. Appl. Phys. 53 (2013) 08JE15 査読有
- ② J. W. Liu, M. Y. Liao, S. H. Cheng, M. Imura, and Y. Koide: "Interfacial chemical bonding state and band alignment of CaF₂/hydrogen-terminated diamond heterojunction", J. Appl. Phys. 113 (2013) 123706. 査読有
- ③ J. W. Liu, M. Y. Liao, M. Imura, H. Oosato, E. Watanabe, and Y. Koide: "Electrical characteristics of hydrogen-terminated diamond metal-oxide-semiconductor with atomic layer deposited HfO₂ as gate dielectric", Appl. Phys. Lett. 102 (2013) 112910. 査読有
- ④ M. Imura, R. Hayakawa, H. Ohsato, E. Watanabe, D. Tsuya, T. Nagata, M. Y. Liao, Y. Koide, J. Yamamoto, K. Ban, M. Iwaya, and H. Amano: "Development of AlN/diamond heterojunction field effect transistors", Diam. Relat. Mat. 24 (2012) 206-209. 査読有
- ⑤ 井村将隆、廖梅勇、小出康夫 "窒化アルミニウム/ダイヤモンドヘテロ接合を用いた電界効果トランジスタ" NEW DIAMOND, 第 105 号, Vol. 28 No. 2 (2012) pp. 36-38. 査読無
- ⑥ S. H. Cheng, L. W. Sang, M. Y. Liao, J. W. Liu, M. Imura, H. D. Li, and Y. Koide: "Integration of high-dielectric constant Ta₂O₅ oxides on diamond for power devices", Appl. Phys. Lett. 101 (2012) 232907. 査読有
- ⑦ J. W. Liu, M. Y. Liao, M. Imura, and Y. Koide: "Band offsets of Al₂O₃ and HfO₂ oxides deposited by atomic layer deposition technique on hydrogenated diamond", Appl. Phys. Lett. 101 (2012) 252108. 査読有
- ⑧ M. Imura, R. Hayakawa, E. Watanabe, M. Y. Liao, Y. Koide, and H. Amano: "Demonstration of diamond field effect transistors by AlN/diamond heterostructure", Phys. Status Solidi-Rapid Res. Lett. 5 (2011) 125-127. 査読有

[学会発表] (計 26 件)

国際会議

- ① J. Liu, S. Cheng, M. Y. Liao, M. Imura, and Y. Koide: "Band Configuration of HfO₂/hydrogen-terminated Diamond Heterojunction Correlated with Electrical Properties of Metal/HfO₂/hydrogen-terminated Diamond Diodes", New Diamond and Nano carbon conference (NDNC2013) (2013/05/19 - 2013/05/23) National University, Singapore
- ② J. Liu, S. Cheng, M. Y. Liao, M. Imura, and Y. Koide: "Interfacial Electronic Band Alignment of Ta₂O₅/hydrogen-terminated Diamond Heterojunction Determined by X-ray Photoelectron Spectroscopy", New Diamond and Nano carbon conference (NDNC2013) (2013/05/19 - 2013/05/23) National University, Singapore
- ③ M. Imura, K. Nakajima, Y. Koide, H. Amano, and K. Tsuda: "Polarity determination of AlN by convergent beam electron diffraction method based on transmission electron microscopy", International Workshop on Nitride Semiconductors 2012 (IWN 2012) (2012/10/14-10/19) Sapporo Convention Center, Sapporo, Japan.
- ④ M. Imura, R. Hayakawa, H. Ohsato, E. Watanabe, D. Tsuya, M. Y. Liao, Y. Koide, and H. Amano: "Al₂O₃/Diamond Field Effect Transistors using Surface p-Channel Prepared by Thermal Treatment with Hydrogen and Ammonia Atmosphere", IUMRS-International Conference on Electronic Materials (IUMRS-ICEM 2012) (2012/09/23-9/28) Pacifico Yokohama, Yokohama, Japan.
- ⑤ S. H. Cheng, M. Y. Liao, M. Imura, and Y. Koide: "High dielectric constant oxide on diamond for high power devices", IUMRS-International Conference on Electronic Materials (IUMRS-ICEM 2012) (2012/09/23 - 2012/09/28) Pacifico Yokohama, Yokohama, Japan.
- ⑥ Y. Koide, G. C. Chen, M. Y. Liao, and M. Imura: "Electrical property of high-k insulator/p-diamond diodes for electric field controlling", IUMRS-International Conference on Electronic Materials (IUMRS-ICEM 2012) (2012/09/23 - 2012/09/28) Pacifico Yokohama, Yokohama, Japan.
- ⑦ 招待講演 M. Imura, M. Y. Liao, and Y. Koide: "Diamond-FET using AlN/diamond heterojunction", IUMRS-International Conference on Electronic Materials (IUMRS-ICEM 2012) (2012/09/23-9/28) Pacifico Yokohama, Yokohama, Japan.

- ⑧ M. Imura, R. Hayakawa, H. Ohsato, E. Watanabe, D. Tsuya, M. Y. Liao, Y. Koide, and H. Amano:“Electrical Transport Mechanism of Field Effect Transistors by AlN/Diamond Heterostructure”, International Conference on Diamond and Carbon Materials (Diamond2012) (2012/09/03-09/07) the Granada Congress and Exhibitions Centre, Granada, Spain.
- ⑨ Y. Koide, G. C. Chen, M. Y. Liao, and M. Imura:“High-k insulator/p-diamond structure for gate voltage controlling / High-k insulator/p-diamond structure for gate voltage controlling”, International Conference on Diamond and Carbon Materials (Diamond2012) (2012/09/03-09/07) the Granada Congress and Exhibitions Centre, Granada, Spain.
- ⑩ Y. Koide, M. Y. Liao, M. Imura, and G. C. Chen:“Metal/insulator/p-diamond Structure with Large-permittivity Insulator for Gate Field Controlling”, New Diamond and Nano Carbons 2012 (NDNC2012) (2012/05/20 - 2012/05/24) Conrad San Juan Condado Plaza, San Juan, Puerto Rico
- ⑪ 招待講演 M.Imura, R. Hayakawa, H. Ohsato, E. Watanabe, D. Tsuya, M. Y. Liao, Y. Koide, and H. Amano:“Field Effect Transistors by AlN/Diamond Heterostructure - past & future -”, Hasselt Diamond Workshop 2012 SBDD XVII (2012/03/14-16) The cultuurcentrum Hasselt ,Hasselt,Belgium.
- ⑫ M. Imura, R. Hayakawa, H. Ohsato, E. Watanabe, D. Tsuya, M. Y. Liao, Y. Koide, and H. Amano:“Development of Diamond Field Effect Transistors by AlN / Diamond Heterostructure”, 22nd European Conference on Diamond, Diamond-like Materials, Carbon Nanotubes and Nitrides (Diamond2011) (2011/09/07) Garmisch - Partenkirchen,Bavaria,German.
- ⑬ M. Imura, R. Hayakawa, H. Ohsato, E. Watanabe, D. Tsuya, M. Y. Liao, Y. Koide, and H. Amano:“Diamond Field Effect Transistors by AlN/Diamond Heterostructure”, International Conference on New Diamond and Nano Carbons 2011 (NDNC2011) (2011/05/19) Kunibiki Messe, Matsue, Japan.
- ⑭ M. Imura, R. Hayakawa, H. Oosato, E. Watanabe, D. Tsuya, M. Y. Liao, Y. Koide, and H. Amano:“Demonstration of AlN/Diamond Heterostructure Field Effect Transistors”, MANA International Symposium 2011 (MANA Sympo. 2011) (2011/03/03) Epochal Tsukuba, Tsukuba, Japan.

国内会議

- ① 劉. 江偉、廖梅勇、井村将隆、小出康夫:“原子層堆積法による水素終端ダイヤモンド上の Al₂O₃ と HfO₂ の電子構造”, 第 60 回応用物理学会春季学術講演会 (2013/03/27-03/30) 神奈川工科大学.
- ② 井村将隆、小出康夫:“次世代パワーデバイス用ダイヤモンド電界効果トランジスタ”, Nano tech 2013 (2013/01/30-02/01) つくば国際会議場.
- ③ 井村将隆、小出康夫:“次世代パワーデバイス用ダイヤモンド電界効果トランジスタ”, つくばテクノロジー・ショーケース 2013 (2013/01/22) つくば国際会議場.
- ④ 井村将隆、早川竜馬、大里啓孝、渡辺英一郎、津谷大樹、MeiyongLiao、小出康夫、天野浩、松本翼、山崎聡:“原子層堆積法により成膜したアルミナゲート表面チャネルダイヤモンド FET の特性評価”, 第 26 回ダイヤモンドシンポジウム (2012/11/19-11/21) 青山学院大学青山キャンパス.
- ⑤ 井村将隆、小出康夫:“次世代パワーデバイス用ダイヤモンド電界効果トランジスタ”, 第 12 回 NIMS フォーラム (2012/10/25) 東京国際フォーラム.
- ⑥ 小出康夫、G.C.Chen、廖梅勇、井村将隆、:“高濃度キャリアの電界制御を目指した強誘電体薄膜/ダイヤモンド接合”, 第 72 回応用物理学会学術講演会 (2012/09/11-09/14) 愛媛大学&松山大学.
- ⑦ 井村将隆、中島清美、小出康夫、天野浩、津田健治:“TEM-CBED 法を用いた AlN の極性決定評価”, 第 31 回電子材料シンポジウム (2012/07/11-07/13) ラフォーレ修善寺.
- ⑧ 井村将隆、早川竜馬、大里啓孝、渡辺英一郎、津谷大樹、MeiyongLiao、小出康夫、天野浩、松本翼、山崎聡:“p チャネル AlN/Diamond ヘテロ接合電界効果トランジスタ”, 第 31 回電子材料シンポジウム (2012/07/11-07/13) ラフォーレ修善寺.
- ⑨ 井村将隆、早川竜馬、大里啓孝、渡辺英一郎、津谷大樹、廖梅勇、小出康夫、天野浩:“AlN/Diamond ヘテロ接合型ダイヤモンド電界効果トランジスタの開発”, 第 25 回ダイヤモンドシンポジウム (2011/12/07) 産業技術総合研究所 共用講堂.
- ⑩ 井村将隆、早川竜馬、大里啓孝、渡辺英一郎、津谷大樹、廖梅勇、小出康夫、天野浩:“AlN/Diamond ヘテロ接合型電界効果トランジスタの開発”, 日本金属学会 2011 年秋 (2011/11/06) 沖縄コンベンションセンター.
- ⑪ 井村将隆、早川竜馬、大里啓孝、渡辺英一郎、津谷大樹、廖梅勇、小出康夫、天

野浩:“AIN/Diamond ヘテロ接合型ダイヤモンド電界効果トランジスタ”, 第 72 回応用応用物理学会学術講演会 (2011/08/30-2011/09/01) 山形大学.

- ⑫ 井村将隆、早川竜馬、大里啓孝、渡辺英一郎、津谷大樹、廖梅勇、小出康夫、天野浩:“AIN/ダイヤモンドヘテロ構造トランジスタ”, 第 58 回応用物理学関係連合講演会 (2011/03/26) 神奈川工科大学.

6. 研究組織

(1)研究代表者

井村 将隆 (IMURA MASATAKA)

独立行政法人物質・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・研究員

研究者番号：80465971

(2)研究分担者

なし

(3)連携研究者

小出 康夫 (KOIDE YASUO)

独立行政法人物質・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・グループリーダー

研究者番号：70195650

天野 浩 (AMANO HIROSHI)

名古屋大学・工学研究科・教授

研究者番号：60202694