

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 23 日現在

機関番号：82108

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25420349

研究課題名(和文) 省電力ノーマリオフ型pチャネルダイヤモンドFETの大電流動作化

研究課題名(英文) Energy Saving Normally-off p-Channel Diamond FET with High-Current Operation

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・環境エネルギー材料部門・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) 4,000,000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、ダイヤモンド表面の正孔キャリアの形成方法及び電界効果トランジスタ(FET)デバイスプロセス条件とノーマリオン・オフ動作との関係を調査し、ノーマリオフ動作のメカニズムについて議論した。またゲート絶縁膜の種類と構造の最適化を行い、ノーマリオフ型ダイヤモンドFETの大電流動作化の検討を行った。その結果、オン電流値としては比較的良好な値(-100~-200 A/mm)を比較的再現性良く得ることに成功した。

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, we investigated the impact of formation method of hole carrier at the diamond surface and the device process condition of field-effect transistor on the normally-on and -off operation to discuss the normally-off operation mechanism. Based on the results, we optimized the gate material and structure. Finally, we reproducibly obtained the high on current (-100 to -200 A/mm) for normally-off FET devices.

研究分野：半導体

キーワード：ダイヤモンド ワードデバイス 電界効果トランジスタ スパッタ法 MOSFET ゲート絶縁膜 原子層体積成長法 電子デバイス パ

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。またダイヤモンドは水素終端構造を形成させると正孔キャリアを最表面に誘起することができるため、この表面キャリアを用いたダイヤモンド電界効果トランジスタ(FET)の研究が近年積極的に行われている。ここでは、表面に自発的に誘起された正孔キャリアをFETのチャネルに用いており、FETデバイスはゲート絶縁膜/表面チャネル/ダイヤモンド構造になっている。

しかしながら、この自発的に誘起された表面キャリアは、無電圧時に導通状態であるノーマリオン特性を呈するため、オフ状態を維持する際、常に電源供給が必要という欠点を有していた。またノーマリオン特性を得るために表面のキャリアを一旦空乏化させると、キャリア密度は著しく低下し、FETの大電流動作は非常に困難であった。そのため、研究着手当時、ノーマリオン型ダイヤモンドFETの試作・検討は殆ど行われていない状況であった。

このような状況下にて申請者は、ダイヤモンド表面の正孔伝導層の形成方法及びFETデバイスプロセス条件がノーマリオン動作と密接に関係している事を先駆的に見出したため、本研究にてノーマリオン型ダイヤモンドFETの試作・検討とFETの大電流動作化について検討を行った。

2. 研究の目的

本研究では、まずダイヤモンド表面の正孔キャリアの形成方法及びFETデバイスプロセス条件とノーマリオン・オフ動作との関係を調査し、その結果を踏まえ(1)ノーマリオン動作のメカニズムについて議論した。続いて(2)ゲート絶縁膜の種類と構造の最適化を行い、ノーマリオン型ダイヤモンドFETの大電流動作化の検討を行った。

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)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、DMDを用いた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。

(3)ノーマリオン動作のメカニズム

FET静特性、静電容量-電圧(C-V)特性、ホール効果測定、収差補正走査型透過電子顕微鏡法を用いた表面微細構造観察の結果をもとにメカニズムを議論した。

(4)ゲート絶縁膜の種類と構造最適化

ゲート絶縁膜は、窒化アルミニウム(AlN)、酸化アルミニウム(Al₂O₃)、酸化ハフニウム(HfO₂)、ランタンアルミネート(LaAlO₃)、酸化タンタル(Ta₂O₅)、酸化ジルコニウム(ZrO₂)を選定し、MOVPE装置、高真空ACスパッタ装置、原子層体積成長(ALD)装置を適宜用いて堆積した。

4. 研究成果

(1)ノーマリオン動作のメカニズム

表面正孔キャリアの形成方法及びゲート絶縁膜堆積後のプロセス温度がノーマリオン・オフ動作に影響を与えた。そのため、形成方法、プロセス温度、ノーマリオン・オフ動作、プロセス前後のシート正孔キャリア密度の関係を以下にまとめる。

- ① 水素プラズマ処理→プロセス温度:120℃→ノーマリオン動作
プロセス前後: $\sim 1 \times 10^{13}$ → $\sim 1 \times 10^{13}$ cm⁻²
- ② 水素プラズマ処理→プロセス温度 180℃
→ノーマリオン動作
プロセス前後: $\sim 1 \times 10^{13}$ → $\sim 5 \times 10^{12}$ cm⁻²
- ③ 水素+アンモニア高温熱処理→プロセス温度 120℃→ノーマリオン動作
プロセス前後: $\sim 1 \times 10^{14}$ → $\sim 1 \times 10^{12}$ cm⁻²
- ④ 水素+アンモニア高温熱処理→プロセス温度 180℃→ノーマリオン動作
プロセス前後: $\sim 1 \times 10^{14}$ → $\sim 5 \times 10^{11}$ cm⁻²

上記のように各条件においてノーマリオン動作は得られるものの、シート正孔キャリア密度の減少が伴うため、一番キャリア密度の多い②の条件を中心に実験を行った。プロセス温度 180℃前後の典型的なFET静特性、CV特性、微細構造観察結果を図1、図2、図3に示す。

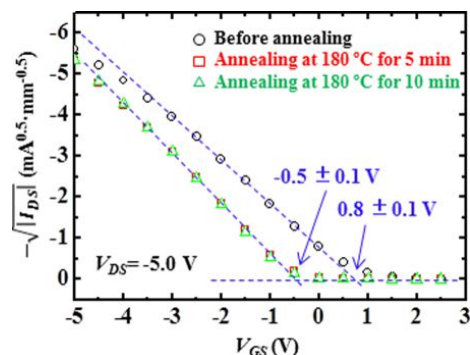


図1 $\sqrt{I_{DS}}-V_{GS}$ 特性

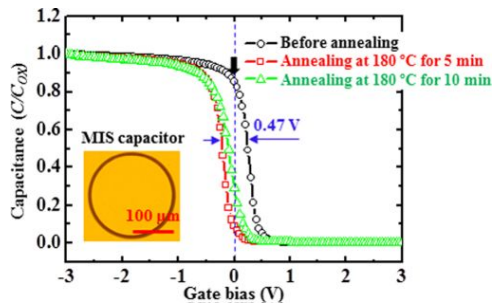


図2 C-V 特性

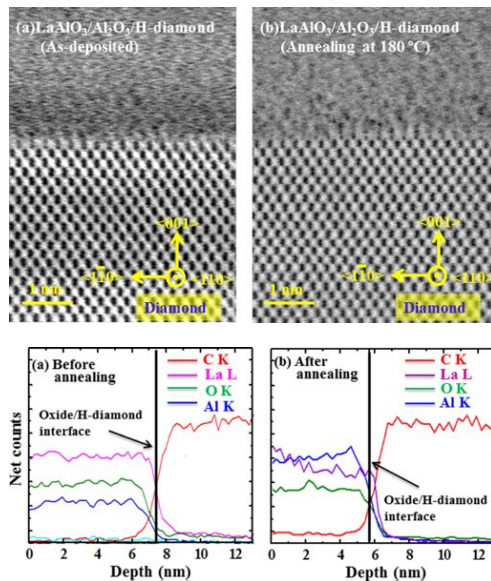


図3 ゲート絶縁膜/表面チャネル/ダイヤモンドの ABF-STEM 像と EDS プロファイル

これらの結果より、負電荷を有す界面の吸着/脱離もしくは絶縁体膜中の負電荷の生成/消滅が、表面正孔伝導層の生成/消滅に寄与し、閾値特性(ノーマリオン/オフ)が制御可能であることを結論付けた。

(2) ゲート絶縁膜の種類と構造最適化

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。特に高真空 AC スパッタ装置と ALD 装置を用いて ZrO_2/Al_2O_3 スタック構造を形成し、ゲートに用いることで電流値の向上が見られ、オン電流値としては比較的良好な値(-100 to -200 A/mm)を比較的回復性良く得ることに成功した。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 11 件のうち 5 件を記載)

1) J. W. Liu, M. Y. Liao, M. Imura, T. Matsumoto, N. Shibata, Y. Ikuhara, and Y. Koide: “Control of normally on/off characteristics in hydrogenated diamond metal-insulator-semiconductor field-effect transistors”, *Journal of Applied Physics* **118** (2015) 115704. 査読有

DOI:10.1063/1.4930294

2) J. W. Liu, M. Y. Liao, M. Imura, H. Oosato, E. Watanabe, and Y. Koide: “Electrical properties of atomic layer deposited HfO_2/Al_2O_3 multilayer on diamond”, *Diamond and Related Materials* **54** (2015) 55-58. 査読有

DOI:10.1016/j.diamond.2014.10.004

3) J. W. Liu, M. Y. Liao, M. Imura, A. Tanaka, H. Iwai, and Y. Koide: “Low on-resistance diamond field effect transistor with high-k ZrO_2 as dielectric”, *Scientific Reports* **4** (2014) 1-5. 査読有

DOI:10.1038/Srep06395

4) J. W. Liu, M. Y. Liao, M. Imura, E. Watanabe, H. Oosato, and Y. Koide: “Diamond logic inverter with enhancement-mode metal-insulator-semiconductor field effect transistor”, *Applied Physics Letters* **105** (2014) 082110. 査読有

DOI:10.1063/1.4894291

5) J. W. Liu, M. Y. Liao, M. Imura, and Y. Koide: “Normally-off HfO_2 -gated diamond field effect transistors”, *Applied Physics Letters* **103** (2013) 092905. 査読有

DOI:10.1063/1.4820143

[学会発表] (計 39 件のうち 5 件を記載)

1) M. Imura, Y. Ota, R. G. Banal, and Y. Koide: “Effect of Boron incorporation on the structural quality of AlBN layers grown by MOVPE”, The 6th International Symposium on Growth of III-Nitrides (ISGN-6) 11/08-11/13 (2015) Act City, Hamamatsu, Japan.

2) M. Imura, J. W. Liu, M. Y. Liao, and Y. Koide: “Energy-Band Offset of AlN/Diamond(111) Heterojunction Determined by X-ray Photoelectron Spectroscopy” International Conference on Solid State Devices and Materials 2014 (SSDM2014) 09/08-09/11 (2014) Epochal Tsukuba, Tsukuba, Japan.

3) M. Imura, J. W. Liu, M. Y. Liao, and Y. Koide: “Recent progress of field effect transistors by AlN/Diamond Heterostructure”, The 15th IUMRS-International Conference in Asia (IUMRS-ICA 2014) 08/24-08/30 (2014) Fukuoka University, Fukuoka, Japan. Invited

4) M. Imura, J. W. Liu, M. Y. Liao, and Y. Koide: “Atomic layer deposited Al_2O_3 /diamond field effect transistors using surface p-channel prepared by thermal treatment with H_2+NH_3 gases” 14th International Conference on Atomic Layer Deposition (ALD2014) 06/15-06/18 (2014) Hotel Granvia Kyoto, Kyoto, Japan.

5) M. Imura, H. Ohsato, E. Watanabe, D. Tsuya, J. W. Liu, M. Y. Liao, and Y. Koide: “Diamond field effect transistors using Al₂O₃ insulator / surface p-channel diamond prepared by thermal treatment with hydrogen and ammonia atmosphere”, International Conference on Diamond and Carbon Materials 2013 09/02-09/05 (2013) Riva del Garda-Fierecongressi S.p.A., Riva del Garda, Italy.

[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
環境エネルギー材料部門
主任研究員
研究者番号：80465971

(2)連携研究者

小出康夫(KOIDE, Yasuo)
国立研究開発法人 物質・材料研究機構
環境エネルギー材料部門
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