

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 4 年 6 月 1 日現在

機関番号：34419

研究種目：若手研究

研究期間：2018～2021

課題番号：18K13804

研究課題名（和文）水素含有酸化アルミニウム薄膜による水素終端ダイヤモンドMOSFETの高耐圧化

研究課題名（英文）Hydrogen Terminated Diamond MOSFETs by Hydrogen Containing Aluminum Oxide Thin Film

研究代表者

藤井 菜美 (Fujii, Mami)

近畿大学・理工学部・准教授

研究者番号：30731913

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：本研究ではダイヤモンドと絶縁膜界面状態の改質に着目し、絶縁膜成膜条件によるトランジスタ素子の界面欠陥状態への影響を調査した。絶縁膜となる酸化アルミニウム薄膜は原子層堆積法を用いて成膜し、原料ガスにはトリメチルアルミニウム（TMA）、ジメチルアルミニウムハイドライド（DMAH）を用いた。DMAHはTMAに比べてメチル基の代わりに水素が結合して構成される。これら2種類の絶縁膜による界面状態変化を調べるため、金属/絶縁膜/水素終端ダイヤモンド/金属構造のキャパシタを作製し、静電容量-電圧特性からHigh-low法を用いて界面欠陥準位密度を算出した結果、DMAHの場合に欠陥密度が減少する事がわかった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

ダイヤモンドパワー半導体素子は、高温環境に耐え、高耐圧、高周波数動作が可能であると期待され次世代の電力変換素子と位置づけられているが、その材料の性能を十分に発揮できていない。本研究では特に素子の特性を左右するダイヤモンドと絶縁膜界面状態の改質に着目し、トランジスタ素子性能の向上を目的とした。結果、素子に用いられる絶縁膜の成膜原料を変更することで、素子界面に形成される電気的な欠陥を50%以下に低減することに成功した。これにより素子の電力損失低減が期待できる。この手法は装置の変更など大掛かりな改善を必要としないため、比較的普及しやすい手法であると言える。

研究成果の概要（英文）：In this study, we focused on the modification of the interface state between diamond and insulating film, and investigated the effect of insulating film deposition conditions on the interface defect state of transistor devices.

Aluminum oxide thin films were deposited as insulating films by atomic layer deposition, using trimethylaluminum (TMA) and dimethylaluminum hydride (DMAH) as raw material gases as the source gas. Compared to TMA, DMAH is composed of hydrogen bonded instead of methyl groups. To investigate the change in interfacial state between these two insulating films, capacitors with metal/insulating film/hydrogen-terminated diamond/metal structures were fabricated, and the capacitance-voltage characteristics were used to calculate the density of interfacial defect levels using the high-low method. The results show that the defect density decreases in the case of DMAH.

研究分野：半導体素子

キーワード：ダイヤモンド 界面 欠陥 トランジスタ

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

ダイヤモンド表面をp型半導体動作させる手段の一つとして、表面を水素で終端する手法が挙げられる。現在、この水素終端面を保護するために、原子層堆積法(ALD)で成膜した酸化アルミニウム薄膜(Al_2O_3)による保護が有効であると報告されている^①。特に、水を酸化剤として用いて成膜した場合に、ダイヤモンドの水素終端面が安定化する^②。しかしながら、ダイヤモンド半導体の持つ性能を発揮するには至っていない。水素終端ダイヤモンド/ Al_2O_3 界面の水素を制御し、C-H結合を欠損させない手法により、Diamond-MOSFETはさらに高性能化できると考える。また、絶縁膜の高品質化により、耐電圧を向上させることが重要となる。ここで提案する研究は、ダイヤモンドの水素終端表面の安定化および高耐圧化を目的とした研究である。

2. 研究の目的

(1) DMAHでは電気的リーク源となる残留炭素が少なくなると予想される。成膜した Al_2O_3 の絶縁破壊電圧の改善が期待できるため、MOSFETの耐圧評価を実施し、高耐圧化することを示す。

(2) ALD成膜条件制御により、 Al_2O_3 中の水素含有量を制御し、この水素量に対する水素終端ダイヤモンド表面のC-H結合の安定性を明らかにする。ALDによる Al_2O_3 の成膜は、原料に $(CH_3)_3Al$ (TMA: Trimethylaluminum)を用い、酸化剤として酸素やオゾン、水を用いる。本研究では、原料にTMAと同じアルキルアルミニウム類の $Al(CH_3)_2H$ (DMAH: Dimethylaluminum hydride)を用いる。この原料にはAl-H結合($285 kJ/mol$)が含まれており、これはAl-C結合($255 kJ/mol$)より結合エネルギーが大きいため、成膜した Al_2O_3 中に水素が残存しやすいことを利用する。

3. 研究の方法

(1) 二次イオン質量分析により Al_2O_3 薄膜中の炭素量および水素量を見積もる。これにより、低不純物かつ水素量の多い低界面欠陥を形成できる Al_2O_3 成膜条件を検討したのち、耐圧評価を実施した。

(2) TMAおよびDMAHそれぞれを用いて成膜した Al_2O_3 薄膜と水素終端ダイヤモンド界面を持つ円形キャパシタを作成し、容量-電圧測定により界面準位密度(Dit)の算出評価を行った。

4. 研究成果

(1) 二種類の原料ガスを用いて Al_2O_3 を成膜するにあたり、各原料に対して成膜条件のうち、前駆体(原料ガス)供給、パージ時間、酸化剤供給時間、最終パージ時間の条件をを検証し、膜中の水素量・炭素量を、SIMSを用いて定量評価した結果を図1に示す。結果として、DMAHを用いた場合にはTMAを用いた場合と比較して不純物炭素を減少させると同時に水素を増加させる条件を見出した。また、この時TMA- Al_2O_3 の成膜レートが $1.16 \text{ \AA}/\text{cycle}$ だったのに対し、DMAH- Al_2O_3 では $1.42 \text{ \AA}/\text{cycle}$ であり、成膜速度が23%増加することがわかった。膜密度の平均値はTMA- Al_2O_3 が 3.23

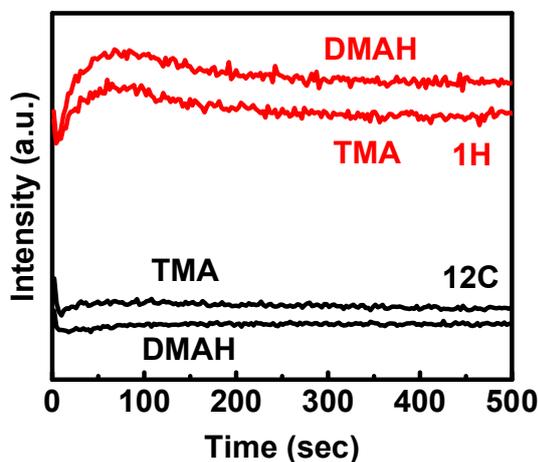


図1 SIMS 定量測定

(g/cm^3)、DMAH- Al_2O_3 が 3.20 (g/cm^3)でほぼ変わらない値となった。したがって、DMAHはTMAと同等の膜密度の Al_2O_3 膜を堆積するうえで、より早い成膜速度で実現可能であることがわかった。

(2) 成膜条件を検討した Al_2O_3 薄膜を用いてキャパシタを作製し、C-V測定を行った。この結果を用いてフラットバンド電圧(V_{FB})と実効固定電荷密度を算出した結果を図2に示す。 V_{FB} を実験的に導出する方法として、 $1/C^2-V$ プロットを行う方法がある。 $1/C^2-V$ プロットを行うと、 $V = V_{FB}$ において屈曲点が現れることから V_{FB} を求めた。図2(a)はフラットバンド電圧の平均値を示す。DMAHを用いた場合によりゼロに近い V_{FB} が得られた。

(3) 次に、2種類の Al_2O_3 を用いて作製したキャパシタの実効固定電荷密度 N_F を求めた。 N_F はフラットバンド電圧 V_{FB} 、ゲート電極と半導体の仕事関数差 ϕ_{ms} 、ALD- Al_2O_3 の酸化膜容量 C_{ox} を用いて、式(1)で表される。

$$N_F = \left(\phi_{ms} V_{FB} \right) \frac{C_{ox}}{q} \quad (1)$$

図2(b)に導出した実効固定電荷密度 N_F を示す。フラットバンド電圧がTMA- Al_2O_3 では $V_{FB} = 2.9$ V、DMAH- Al_2O_3 では $V_{FB} = 2.1$ Vであり、正方向へシフトしていることがわかった。このような V_{FB} の正シフトは、 Al_2O_3 膜中に負の固定電荷が存在することを示し、炭素不純物が負の固定電荷として働いていると考えられる。DMAH- Al_2O_3 ではフラットバンド電圧 V_{FB} のシフトが抑制および実効固定電荷密度 N_F が減少していることが確認された。SIMS測定結果より炭素不純物の低減が確認されたことから、界面欠陥の低減および膜中の不純物低減により実効固定電荷が減少していると考えられる。

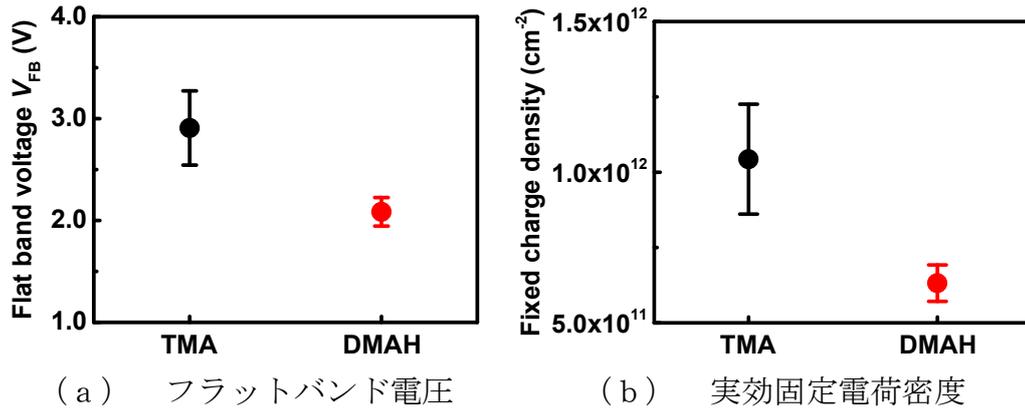


図2 C-V測定結果

(4) Al_2O_3 /diamond MOSキャパシタに対し、I-V測定を行った。測定には半導体パラメータアナライザB1500Aを用い、電圧を -10 V ~ 10 V掃引した。図3にI-V測定から導出したJ-E特性を示す。DMAH- Al_2O_3 において、リーク電流が抑制されていることが確認された。 Al_2O_3 膜中の炭素不純物が低減することによる、リークパスの減少によるものと考えられる。また、アニールを行うことによってTMA- Al_2O_3 、DMAH- Al_2O_3 ともにリーク電流が減少することがわかった。

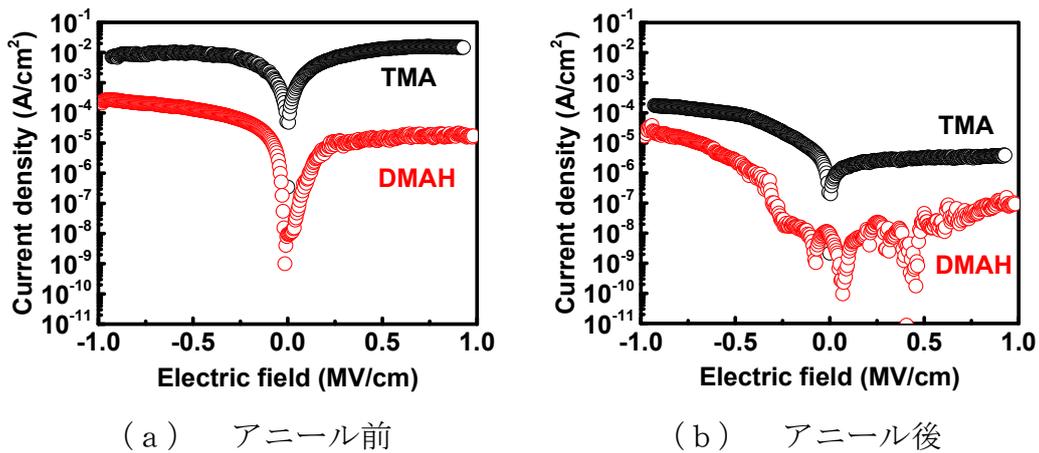


図3 Al_2O_3 /diamond MOSキャパシタのJ-E特性

<引用文献>

- ① Kasu *et al.*, APEX, 5, 025701 2012
- ② Kawarada *et al.*, JAP, 112, 124504 2012

5. 主な発表論文等

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

1. 著者名 Corsino Dianne C, Bermundo Juan Paolo S, Fujii Mami N, Takahashi Kiyoshi, Ishikawa Yasuaki, Uraoka Yukiharu	4. 巻 53
2. 論文標題 Bias stress and humidity exposure of amorphous InGaZnO thin-film transistors with atomic layer deposited Al ₂ O ₃ passivation using dimethylaluminum hydride at 200 °C	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Physics D: Applied Physics	6. 最初と最後の頁 165103 ~ 165103
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1088/1361-6463/ab6e97	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9件（うち招待講演 2件／うち国際学会 2件）

1. 発表者名 Daichi Yoshii, Mami N. Fujii, Yukiharu Uraoka
2. 発表標題 Crystal Orientation Dependence of Local Electrical Characteristics on CVD-Grown Poly-Crystalline Diamond: Combined SPM and EBSD study
3. 学会等名 2020 VIRTUAL MATERIALS RESEARCH SOCIETY SPRING/FALL MEETING & EXHIBIT（国際学会）
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 西部愛里紗, 蜂谷涼太, 藤井茉美, 沓掛健太郎, 宇治原徹, 浦岡行治
2. 発表標題 ダイヤモンド半導体電界効果トランジスタの特性予測モデルの構築
3. 学会等名 第68回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Yukiharu Uraoka, Takanori Takahashi, Kahori Kise, Juan Paolo Bermundo, Mami Fujii, Mutsunori Uenuma, Yasuaki Ishikawa
2. 発表標題 Hot Carrier Degradation in High Mobility Metal Oxide Thin Film Transistors
3. 学会等名 The 20th International Meeting on Information Display, Virtual（招待講演）（国際学会）
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 吉井大陸, 藤井茉美, 唐木裕馬, 石河泰明, 浦岡行治
2. 発表標題 多結晶ダイヤモンド表面の粒内および粒界の局所電気状態評価
3. 学会等名 第80回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 藤井 茉美
2. 発表標題 ダイヤモンドの水素終端 2 DHG表面の欠陥評価
3. 学会等名 半導体材料プロセス・デバイス研究会 (招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 吉井大陸, 藤井茉美, 唐木裕馬, 作場宥斗, 石河泰明, 浦岡行治
2. 発表標題 C-AFMとEBSDIによる水素終端多結晶ダイヤモンド表面の局所電的分析
3. 学会等名 第67回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 作場 宥斗, 藤井茉美, 唐木裕馬, 上沼睦典, 高橋清, 石河泰明, 浦岡行治
2. 発表標題 ダイヤモンドデバイス応用に向けたALD-AI2O3の膜質改善
3. 学会等名 第67回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 宮越 雄太, 藤井 茉美, 石河 泰明, 高橋 清, 浦岡 行治
2. 発表標題 ダイヤモンド半導体素子に対する水素含有絶縁膜の効果
3. 学会等名 第66回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 藤井 茉美, 唐木 裕馬, 宮越 雄太, Juan Paolo Bermundo, 石河 泰明, 浦岡 行治
2. 発表標題 多結晶ダイヤモンド表面の局所電気状態評価
3. 学会等名 第79回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2018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
---------------------------	-----------------------	----

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
---------	---------