

令和 6 年 5 月 15 日現在

機関番号：82108

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2020～2023

課題番号：20K04587

研究課題名(和文) 界面制御による窒化ガリウムパワートランジスタの高性能化

研究課題名(英文) Improvement of GaN MOSFETs by controlling GaN interfaces

研究代表者

色川 芳宏 (Irokawa, Yoshihiro)

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

研究者番号：90394832

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：近年、省エネルギーの観点から、パワーデバイスの低損失化が求められている。現在、多くのパワーデバイスとしてSiからなる素子が使われているが、素子での電力損失が大きい。一方、GaN等の半導体は、材料の絶縁破壊電圧が高いために、電力損失の低減が期待されている。現状では、GaN素子は、酸化物/半導体界面の知見が十分に得られていないために、理論的に期待される特性が得られていない。そこで、酸化物/半導体界面を評価するオリジナルな手法として、水素を用いた特性評価法を開発した。さらに、作製した素子に対して酸化物/半導体界面の電気的特性評価を行った。

研究成果の学術的意義や社会的意義

一般的に、パワーデバイスの酸化膜は結晶構造を持たないアモルファス構造のために、その膜質を評価することは難しい。本研究によって得られた酸化膜の特性評価法は、酸素空孔をも評価できる可能性があり、学術的に重要であると思われる。さらに、GaNの自然酸化膜が洗浄後の試料にも残存しており、デバイス特性に影響を及ぼしている可能性を明らかにした。

研究成果の概要(英文)：Recently, energy-loss reduction on power devices is strongly required to save the energy. Currently, Si power devices are mostly used, but the energy-loss is large. On the other hand, GaN power devices are expected to reduce the energy-loss due to the wide band gap. But, lack of understanding of interfaces in the devices is a barrier for the fabrication of the devices with ideal performances. Here, a novel interface evaluation method using hydrogen has been developed.

研究分野：化合物半導体

キーワード：GaN interface hydrogen

様式 C - 19、F - 19 - 1 (共通)

1. 研究開始当初の背景

近年、省エネルギーの観点から、インバータ等の電力変換モジュールに用いられるパワーデバイスの低損失化が求められている。現在、多くのパワーデバイスとして Si からなる素子が使われているが、素子での電力損失が大きい。一方、GaN 等のバンドギャップが大きい半導体は、材料の絶縁破壊電圧が高いために、電力損失の低減が期待されている。現状では、GaN MOSFET は、酸化物 / 半導体界面の知見が十分に得られていないために、理論的に期待される特性が得られていない。

2. 研究の目的

GaN パワーデバイスを高性能化するためには、不足している酸化物 / 半導体界面の知見を得ることが重要である。さらに、インバータの主要部品の一つである MOS (金属 / 酸化物 / 半導体) 型 FET (電界効果トランジスタ) の酸化物 / 半導体界面を制御することで、デバイスの高特性化を目指す。

3. 研究の方法

酸化物 / 半導体界面を評価するオリジナルな手法として、水素を用いた特性評価法を開発した。具体的には、作製したショットキーダイオード・MOS キャパシタに対して、測定雰囲気を水素雰囲気に変えた時の電気的特性の変化を解析することで、酸化物 / 半導体界面の評価を行った。さらに、作製した MOSFET に対して、チャージポンピング法を適用して、酸化物 / 半導体界面の電気的特性評価を行った。

4. 研究成果

(1) 水素を用いた特性評価

酸洗浄後の GaN 表面を確認するために、Pt/GaN ショットキーダイオードを作製して、水素導入前後の電流 - 電圧特性を測定した。表 1 にその結果を示す。

表 1 . 電流 - 電圧特性による窒素雰囲気・水素雰囲気中でのダイオード特性

	N ₂	1% H ₂
n	1.04	1.07
Φ_B [eV]	0.95	0.74

表 1 より、水素導入後にショットキー障壁高さが減少していることがわかる。次に、水素導入前後の GaN 層中のキャリア濃度の変化を調べるために、電圧 - 容量測定を行った。表 2 にその結果を示す。

表 2 . 電圧 - 容量測定による窒素雰囲気・水素雰囲気中での GaN 層中のキャリア濃度

	N ₂	1% H ₂
$N_D - N_A$ [cm ⁻³]	1.8x10 ¹⁶	1.8x10 ¹⁶
Φ_B [eV]	1.19	0.87

表 2 より、水素導入後にショットキー障壁高さが減少していることがわかるが、GaN 層中のキャリア濃度の変化は見られなかった。次に、水素導入前後の素子の抵抗、容量成分を調べるために、インピーダンス測定を行った。表 3 にその結果を示す。

表 3 . インピーダンス測定による窒素雰囲気・水素雰囲気中での素子の抵抗、容量成分

	N ₂	1% H ₂
R [Ω]	4.92x10 ¹⁰	1.28x10 ⁷
C [pF]	6.65	8.05

表 3 より、水素導入後に素子の抵抗成分が大きく減少していることがわかる。以上の結果より、洗浄後の試料においても自然酸化膜が電極 / 半導体界面に残り、この界面層が水素と相互作用することによって素子の電気的特性が変化することがわかる。逆に、その水素応答を調べることで、界面層の性状を明らかにできる可能性がある。そこで、表 4 に示すような多様な絶縁膜を用いた MOS キャパシタを作製して、絶縁膜内にトラップされる水素起因の電荷量を求めた。その結果を図 1 に示す。

表 4 . 作製した MOS キャパシタの詳細

sample	dielectric layer	process	
		post-deposition annealing	post-metallization annealing
A1	Al ₂ O ₃	(as-grown)	
A2	Al ₂ O ₃		300 °C
A3	Al ₂ O ₃	800 °C	300 °C
B1	HfO ₂		300 °C
B2	HfO ₂	800 °C	300 °C
C1	Hf _{0.57} Si _{0.43} O _x	(as-grown)	
C2	Hf _{0.57} Si _{0.43} O _x	800 °C	

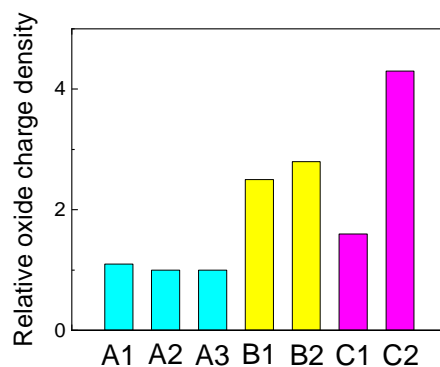


図 1 . 表 4 に示す様々な絶縁膜内にトラップされる水素起因の電荷量

図 1 に示すように、B1、B2 及び C2 の絶縁膜で絶縁膜内にトラップされる水素起因の電荷量が大いことがわかる。これより、絶縁膜内の水素は酸素欠損部にトラップされる可能性が高いことがわかる。ゆえに、本測定によって、絶縁膜内の酸素欠損に関する知見が得られる可能性が示された。

(2) チャージポンピング法による MOSFET 界面評価

次に MOSFET を作製してチャージポンピング法によって酸化物 / 半導体界面を調べた。図 2 にその結果を示す。

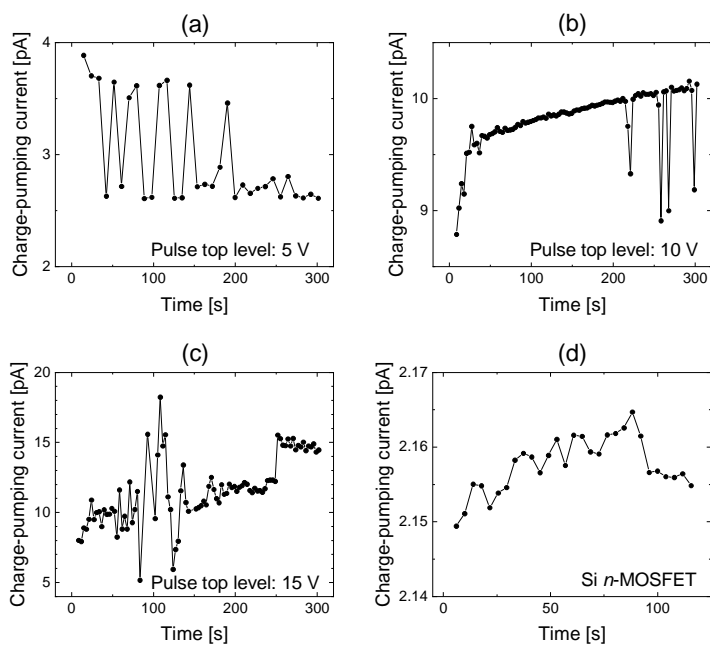


図 2 . チャージポンピング法による酸化物 / 半導体界面評価結果

図 2 より、GaN MOSFET はパルス電圧に対する電流の変動が大きく、半導体層内にトラップ準位があることがわかる。試料洗浄後も残存する自然酸化膜がこのトラップ準位に関係していることが予想される。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 4件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Irokawa Yoshihiro, Inoue Mari, Nabatame Toshihide, Koide Yasuo	4. 巻 11
2. 論文標題 Comparison of Hydrogen-Induced Oxide Charges Among GaN Metal-Oxide-Semiconductor Capacitors with Al ₂ O ₃ , HfO ₂ , or Hf _{0.57} Si _{0.43} O _x Gate Dielectrics	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 ECS Journal of Solid State Science and Technology	6. 最初と最後の頁 085010 ~ 085010
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1149/2162-8777/ac8a70	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 Irokawa Yoshihiro, Ohki Tomoko, Nabatame Toshihide, Koide Yasuo	4. 巻 60
2. 論文標題 Ambient-hydrogen-induced changes in the characteristics of Pt/GaN Schottky diodes fabricated on bulk GaN substrates	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Japanese Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 068003 ~ 068003
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.35848/1347-4065/ac0260	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 Yoshihiro Irokawa	4. 巻 59
2. 論文標題 Effect of hydrogen on Pt/GaN Schottky diodes	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Japanese Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 120901-1-5
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	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 Irokawa Yoshihiro, Mitsuishi Kazutaka, Izumi Takatomi, Nishii Junya, Nabatame Toshihide, Koide Yasuo	4. 巻 12
2. 論文標題 Gate-Bias-Induced Threshold Voltage Shifts in GaN FATFETs	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 ECS Journal of Solid State Science and Technology	6. 最初と最後の頁 055007 ~ 055007
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1149/2162-8777/acd1b4	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

〔学会発表〕 計0件

〔図書〕 計0件

〔出願〕 計2件

産業財産権の名称 酸化膜の膜質評価方法	発明者 色川 芳宏、生田目 俊秀	権利者 物質・材料研究 機構
産業財産権の種類、番号 特許、特願2022-142355	出願年 2022年	国内・外国の別 国内

産業財産権の名称 水素ガスセンサーおよびそのセンサーの使用方法	発明者 色川 芳宏、生田目 俊秀	権利者 物質・材料研究 機構
産業財産権の種類、番号 特許、特願2022-139622	出願年 2022年	国内・外国の別 国内

〔取得〕 計0件

〔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
---------	---------