

平成 30 年 5 月 31 日現在

機関番号：17401

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K18034

研究課題名(和文) 絶縁膜/窒化物半導体界面の評価・制御とトランジスタ応用への基礎的研究

研究課題名(英文) Characterization and control of insulator/AlGaN interface for power device application

研究代表者

谷田部 然治 (Yatabe, Zenji)

熊本大学・大学院先導機構・助教

研究者番号：00621773

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)：絶縁ゲート構造を有するAlGaN/GaN高電子移動度トランジスタ(AlGaN/GaN MIS HEMT)の、しきい値変動などの動作安定性・信頼性に係わる問題を解決するため、絶縁膜/AlGaN界面の界面準位密度の特性評価をおこない、AlGaN/GaN MIS HEMTをパワーデバイスへと応用する上で重要な知見を得た。容量・電圧特性の実験結果および理論的考察をもとに解析し、しきい値電圧変動は絶縁膜/AlGaN界面の界面準位に依存することが示唆された。また低ダメージの絶縁膜形成手法として有望なミスト化学気相成長法により、チタン酸アルミニウム薄膜を成膜することに成功した。

研究成果の概要(英文)：To control reliability and degradation issue such as threshold voltage (VTH) instability in AlGaN/GaN high-electron-mobility transistors (AlGaN/GaN HEMTs) with metal-insulator-semiconductor (MIS) structures, we have investigated insulator/AlGaN interface properties. The correlation between the interface properties and VTH instability in AlGaN/GaN MIS HEMTs were discussed on the basis of both experimental and theoretical results. From the analysis of the results, we have come to the conclusion that the interface states at insulator/AlGaN caused VTH instability in AlGaN/GaN MIS HEMTs. In addition, aluminum titanate, a novel and promising gate dielectric was successfully fabricated by ultrasonic spray-assisted mist chemical vapor deposition (mist CVD), which is a low-cost and low-damage alternative for dielectric deposition.

研究分野：半導体デバイス工学

キーワード：窒化物半導体 MIS構造 高電子移動度トランジスタ 界面準位

1. 研究開始当初の背景

生成された1次エネルギーの50%程度が電気エネルギーに変換され、電子・電気機器、動力、照明、熱として利用されている。このエネルギー変換には、「インバータ」と総称される電力変換システムが利用され、ほぼ全てのエネルギー流通・消費に関わっているため、インバータ変換損失を劇的に低減することは「省エネルギー技術の柱」と言える。現在インバータの中核素子として主流となっているシリコン(Si)パワートランジスタは、長年の技術蓄積を糧に研究開発が着実に進められている一方で、Siの材料限界のために現状の変換効率を大幅に向上させることは困難である。そこで、Siに代わる新しい材料の開拓が世界各国で活発に展開されており、特に炭化ケイ素(SiC)や窒化ガリウム(GaN)系に代表されるワイドギャップ半導体が次世代パワートランジスタ材料として注目されている。SiとSiCおよびGaN系半導体のトランジスタ動作時の抵抗(オン抵抗)を比較すると、それらの材料が持つ絶縁破壊電界から、SiCとGaN系半導体はSiよりも、オン抵抗を2桁以上低減でき、ジュール損失を著しく抑制することができる。この点ではSiCとGaN系半導体は同等の材料ポテンシャルを持っている。

GaN系半導体がSiCよりも勝る特筆すべき特徴として、異種(ヘテロ)接合を巧みに利用できる点にある。GaN系半導体は図1に示すように、ヘテロ接合界面に高密度・高移動度の2次元電子ガス層(2DEG)を形成することができる。さらに最近では、大口径Si基板へのAlGaN/GaN構造の結晶成長が可能となり、コストが高いという欠点も克服しつつあり、省エネルギー技術の切り札的存在として、実用化への研究・開発が猛烈な勢いで進展している。

しかし、metal-insulator-semiconductor(MIS)界面、すなわち絶縁ゲート構造を有するAlGaN/GaN高電子移動度トランジスタ(HEMT)には、しきい値変動、特性劣化などの信頼性・安定性に関わる大きな問題が残っており、実用化の前に立ちはだかっている。このため、開発の最先端を走る企業も、供給開始を大幅に遅らせている。実用化を阻害する主な問題はとして絶縁膜/AlGaN界面特性を正確に評価する手法が確立されていない点などが挙げられる。

2. 研究の目的

上述の課題を解決すべく、従来困難であったAlGaN/GaN MIS HEMT構造の絶縁膜/AlGaN界面の界面準位密度(D_{it})を正しく評価する手法を確立し、界面特性がしきい値(V_{TH})変動に与える影響を明らかにすることを目的とした。さらに界面準位密度を従来より低減させるプロセス技術を考案することにより、GaN系トランジスタの動作信頼性を本質的に向上させることを目指した。

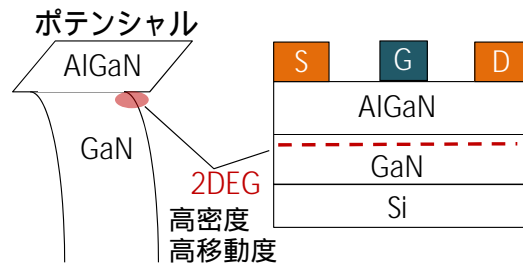


図1 AlGaN/GaNヘテロ接合

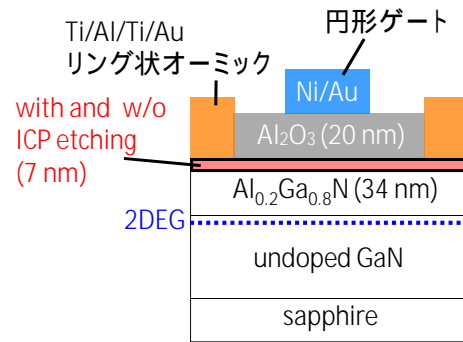


図2 Al₂O₃/AlGaN/GaNヘテロ接合

3. 研究の方法

(1) 試料構造

図2に本研究で用いたAl₂O₃/AlGaN/GaN構造の模式図を示す。サファイヤ基板上に成長したAlGaN/GaNで誘導結合プラズマ(ICP)を用いてAlGaN表面をエッチングした。ゲート絶縁膜は原子層堆積(ALD)法により堆積したAl₂O₃膜である。比較のため、ドライエッチングをおこなっていない試料も同時に作製し、界面特性の違いを評価した。

(2) 評価方法

界面特性の評価には容量-電圧($C-V$)法と任意の準位密度分布と電子放出時定数を考慮した数値計算とを組み合わせた手法により、伝導帯近傍の界面準位密度分布を求めた。また禁制帯中央近傍の界面準位密度分布評価には光支援 $C-V$ 法を用いた。

4. 研究成果

(1) 絶縁膜/AlGaN界面の界面準位密度の算出

室温における $C-V$ 特性の数値計算と実験値を比較することにより界面準位密度分布の算出をおこなった。計算には分極電荷とAl₂O₃/AlGaN界面の電子捕獲準位を仮定した。また、Shockley-Read-Hall(SRH)統計に基づいた界面準位からの電子放出時定数を考慮し、 $C-V$ 測定の掃印時間内に応答する準位のみを電荷変化に取り入れた。

Al₂O₃/AlGaN界面に電子捕獲準位を仮定しない場合、 $C-V$ 曲線は順バイアス、逆バイアス共に急峻な変化を示すが、実際の実験値では、順バイアスにおいて $C-V$ 曲線の傾きは緩く、容量の立ち上がり電圧が正バイアス方向にシフトすることが分かった。

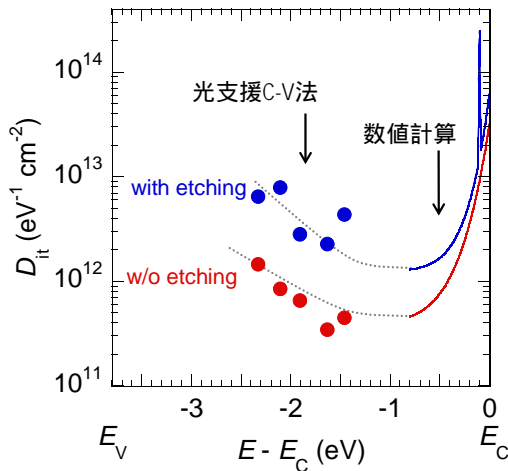


図3 数値計算と光支援 $C-V$ 法により算出した界面準位密度

そこで $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{AlGaIn}$ 界面において連続準位と離散準位を仮定し、計算することにより $C-V$ 曲線の実験値を再現することが出来た。一方、エッチングをおこなっていない試料に関しては連続準位のみで実験値を再現することが出来た。図3に計算に用いた密度分布を示す(実線)。SRH統計による電子放出時定数を考慮すると、室温の $C-V$ 測定から得られる界面準位の情報は、 AlGaIn 禁制帯幅の1/4程度に限定され、禁制帯中央より深い電子捕獲準位の算出は困難である。そこで本研究課題では禁制帯中央近傍の界面準位密度を算出するために、光支援 $C-V$ 法を適用した。図3に数値計算と光支援 $C-V$ 法により算出した $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{AlGaIn}$ 界面の界面準位密度分布を示す。禁制帯中央近傍に最小値を持つU字分布を示し、ICPエッチングをされた試料では、界面準位密度が増加することが明らかになった。このように絶縁膜/ $\text{AlGaIn}/\text{GaIn}$ 構造の $C-V$ 特性に与える界面準位の影響と室温評価の限界について統一的な見解を示し、電子物性的側面が必ずしも十分に解明されていなかった絶縁膜/ $\text{AlGaIn}/\text{GaIn}$ ヘテロ構造に対して、 AlGaIn の禁制帯内の広いエネルギー圏で絶縁膜/ AlGaIn 界面の電子準位密度分布を決定することに成功した。

(2) $\text{AlGaIn}/\text{GaIn}$ MIS HEMT の V_{TH} 変動

上記の知見を踏まえ、界面準位密度が $C-V$ 特性の V_{TH} シフトへ及ぼす影響を調べた。 $C-V$ 特性のバイアス掃印は V_{MAX} V_{MIN} (2DEGが十分に空乏化する電圧)とした。空乏領域における $C-V$ 特性の V_{MAX} 依存性を図4に示す。両サンプル共に V_{MAX} が増加するにつれて、 V_{TH} は順バイアス方向にシフトし、ドライエッチング面を含む試料はドライエッチングを行っていない試料よりも大きな V_{TH} シフトが観測された。この結果は $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{AlGaIn}$ 界面の荷電状態を考慮し計算した結果と一致することから、界面に捕獲されているアクセプタ型準位の負電荷の影響により V_{TH} 変動が生じている可能性が明らかになった。

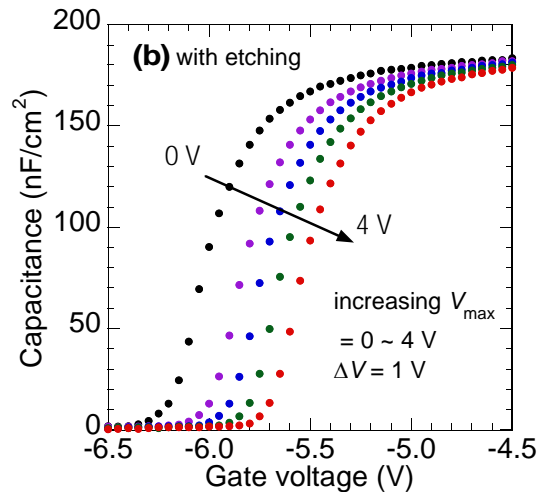
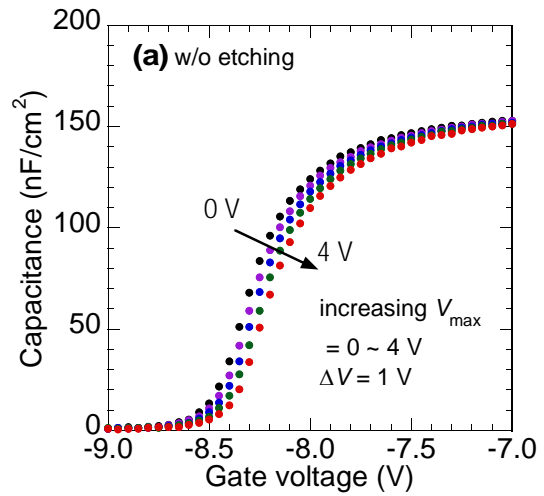


図4 空乏領域における $C-V$ 曲線の V_{MAX} 依存性

(3) ミスト化学気相成長法によるゲート絶縁膜堆積

GaIn 系半導体ゲート絶縁膜候補であるチタン酸アルミニウム (AlTiO) 薄膜堆積の基盤技術を確立した。 AlTiO の堆積には低コスト・低ダメージ薄膜形成技術であるミスト化学気相成長法を用いた。図5に成膜した AlTiO 薄膜の蛍光X線スペクトルを示す。定量分析結果、光学的バンドギャップ測定より、ミスト原料溶液中の Al/Ti 組成比を変化させることにより、形成した AlTiO 薄膜の Al/Ti 組成比、及び禁制帯幅制御が可能であることが明らかになった。

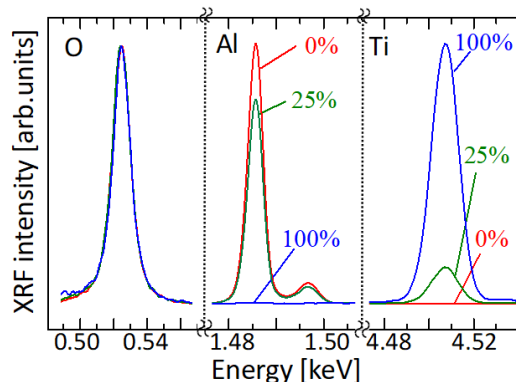


図5 AlTiO 薄膜の蛍光X線スペクトル

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)

T. Hashizume, K. Nishiguchi, S. Kaneki, Jan Kuzmik, Z. Yatabe: "State of the art on gate insulation and surface passivation for GaN-based power HEMTs (invited)", *Materials Science in Semiconductor Processing*, 78 85-95 (2018), 査読有り

DOI: 10.1016/j.mssp.2017.09.028

R. Stoklas, D. Gregušová, M. Blaho, K. Fröhlich, J. Novák, M. Matys, Z. Yatabe, P. Kordoš, T. Hashizume: "Influence of oxygen-plasma treatment on AlGaIn/GaN metal-oxide-semiconductor

heterostructure field-effect transistors with HfO₂ by atomic layer deposition: leakage current and density of states reduction", *Semiconductor Science and Technology*, 32(4) 045018-1-8 (2017), 査読有り

DOI: 10.1088/1361-6641/aa5fcb

M. Matys, B. Adamowicz, A. Domanowska, A. Michalewicz, R. Stoklas, M. Akazawa, Z. Yatabe, T. Hashizume: "On the origin of interface states at oxide/III-nitride heterojunction interfaces", *Journal of Applied Physics*, 120(22) 225305-1-11 (2016), 査読有り

DOI: 10.1063/1.4971409

S. Kaneki, J. Ohira, S. Toiya, Z. Yatabe, J. T. Asubar, T. Hashizume: "Highly-stable and low-state-density Al₂O₃/GaN interfaces using epitaxial n-GaN layers grown on free-standing GaN substrates", *Applied Physics Letters*, 109(16) 162104-1-5(2016), 査読有り

DOI: 10.1063/1.4965296

Z. Yatabe, J. T. Asubar, T. Hashizume: "Insulated gate and surface passivation structures for GaN-based power transistors (invited)", *Journal of Physics D: Applied Physics*, 49(39) 393001-1-19, 査読有り

DOI: 10.1088/0022-3727/49/39/393001

M. Matys, R. Stoklas, J. Kuzmik, B. Adamowicz, Z. Yatabe, T. Hashizume: "Characterization of capture cross sections of interface states in dielectric/III-nitride heterojunction structures", *Journal of Applied Physics*, 119(20) 205304-1-7 (2016), 査読有り

DOI: 10.1063/1.4952708

J. T. Asubar, Y. Sakaida, S. Yoshida,

Z. Yatabe, H. Tokuda, T. Hashizume, M. Kuzuhara: "Impact of oxygen plasma treatment on the dynamic on-resistance of AlGaIn/GaN high-electron-mobility transistors", *Applied Physics Express*, 8(11) 111001-1-4 (2015), 査読有り

DOI: 10.7567/APEX.8.111001

J. T. Asubar, Y. Kobayashi, K. Yoshitsugu, Z. Yatabe, H. Tokuda, M. Horita, Y. Uraoka, T. Hashizume, M. Kuzuhara: "Current Collapse Reduction in AlGaIn/GaN HEMTs by High Pressure Water Vapor Annealing", *IEEE Transactions on Electron Devices* 62(8) 2423-2428 (2015), 査読有り

DOI: 10.1109/TED.2015.2440442

[学会発表](計18件)

津田 貴昭, 西山 光土, 谷田部 然治, 須恵 耕二, 中村 有水, "ミストCVD法によるAlTiO₃薄膜の形成", 平成29年度応用物理学九州支部学術講演会, 2Ca-11, 宮崎観光ホテル(宮崎県宮崎市), 2017年12月1日-3日.

S. Kaneki, Z. Yatabe, T. Hashizume, "Correlation between V_{TH} instability and interface states in Al₂O₃/AlGaIn/GaN structures", 12th Topical Workshop on Heterostructure Microelectronics (TWHM 2017), 3-5, ホテル京セラ(鹿児島県霧島市), 2017年8月28日-31日.

Z. Yatabe, H. Tanoue, K. Okita, M. Takenouchi, T. Ishida, T. Tsuda, T. Mikuriya, S. Nagaoka, K. Sue, Y. Nakamura, "Mist-chemical vapor deposition grown-single crystalline oxide semiconductors (invited)", 35th Samahang Pisikang Pilipinas Physics Conference and Annual Meeting (SPP 2017), SPP-2017-INV-1B-01, セブ(フィリピン), 2017年6月7日-10日.

Z. Yatabe, J. T. Asubar, Y. Nakamura, T. Hashizume, "Effects of Electronic States at Insulator/AlGaIn Interfaces on Threshold Voltage Instability of Al₂O₃/AlGaIn/GaN Structures", 2016 International Conference on Solid State Devices and Materials (SSDM2016), つくば国際会議場(茨城県つくば市), N-4-02, 2016年9月26日-30日.

谷田部 然治, 堀 祐臣, 馬 万程, Joel T. Asubar, 赤澤 正道, 佐藤 威友, 橋詰 保, "Characterization of electronic states at insulator/(Al)GaN interfaces for improved insulated gate and surface passivation structures of GaN-based transistors (招待講演)", 第77回応用物理学秋季学術講演会, 14a-B1-1, 朱鷺メッセ(新潟県新潟市), 2016年9月13日-16日

J. T. Asubar, H. Tokuda, M. Kuzuhara, Z. Yatabe, K. Nishiguchi, T. Hashizume, "Improved linearity, stability, and thermal performance of multi-mesa-channel AlGaIn/GaN HEMTs (invited)", 34thSPP Physics Conference and Annual Meeting (SPP 2016), SPP-2016-1B-01, イロイロ(フィリピン), 2016年8月18日 - 21日

M. Matys, B. Adamowicz, R. Stoklas, M. Akazawa, Z. Yatabe, T. Hashizume, "Nature and origin of interface states at dielectric/III-N heterojunction interfaces", 2015 MRS Fall Meeting & Exhibit, RR9.12, ボストン(アメリカ合衆国), 2015年11月29日 - 12月4日

T. Hashizume, Z. Yatabe, "Characterization and control of GaN MOS interfaces for power transistor application (invited)", 2015 International Workshop on DIELECTRIC THIN FILMS FOR FUTURE ELECTRON DEVICES - SCIENCE AND TECHNOLOGY - (2015 IWDTF), S4-1, 日本科学未来館(東京都江東区), 2015年11月2日 - 4日

J. T. Asubar, Y. Sakaida, S. Yoshida, Z. Yatabe, H. Tokuda, T. Hashizume, M. Kuzuhara, "Comparative study of oxygen plasma treatment and GaN cap layer effects on the current collapse of AlGaIn/GaN HEMTs", 11th Topical Workshop on Heterostructure Microelectronics (TWHM 2015), 9-4, ひだホテルプラザ(岐阜県高山市), 2015年8月23日 - 26日

Z. Yatabe, J. Ohira, T. Sato, T. Hashizume, "Influence of dry etching on Al₂O₃/AlGaIn/GaN MOS interface properties", 11th Topical Workshop on Heterostructure Microelectronics (TWHM 2015), 9-4, ひだホテルプラザ(岐阜県高山市), 2015年8月23日 - 26日

〔その他〕

ホームページ等

<https://researchmap.jp/zenji.yatabe/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

谷田部 然治 (YATABE, Zenji)

熊本大学・大学院先端機構, 助教

研究者番号: 00621773