

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成25年4月30日現在

機関番号：10101

研究種目：基盤研究(A)

研究期間：2009～2012

課題番号：21246007

研究課題名（和文）電子準位制御と新ゲート構造による窒化ガリウム系トランジスタの高信頼化

研究課題名（英文）Reliability improvement of GaN transistors based on the control of electronic states and a novel gate structure

研究代表者

橋詰 保 (HASHIZUME TAMOTSU)

北海道大学・量子集積エレクトロニクス研究センター・教授

研究者番号：80149898

研究成果の概要（和文）：窒化物半導体ヘテロ構造を利用した高電子移動度トランジスタ（HEMT）の高信頼化を目的として、絶縁膜界面の電子準位の評価と制御、多重台形チャネル構造の作製と評価を行った。独自に開発した厳密計算法と光支援容量法を $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{AlGaIn}/\text{GaN}$ 構造に適用し、 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{AlGaIn}$ 界面の電子準位密度を初めて求めることに成功した。また、多重台形チャネル構造が電流安定性の向上に有効であることを明らかにした。

研究成果の概要（英文）：To improve the operation stability of GaN-heterostructure transistors, we have carried out characterization and control of electronic states at insulator-semiconductor interfaces, fabrication and characterization of the multi-mesa-channel (MMC) transistors, and the related experiments. By applying the novel simulation and photo-assisted capacitance-voltage methods to $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{AlGaIn}/\text{GaN}$ structures, we determined the density distribution of electronic states at the $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{AlGaIn}$ for the first time. It was also found that the MMC structure is very effective in improving the current stability of the GaN-based transistors.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	11,400,000	3,420,000	14,820,000
2010年度	9,800,000	2,940,000	12,740,000
2011年度	7,400,000	2,220,000	9,620,000
2012年度	6,500,000	1,950,000	8,450,000
年度			
総計	35,100,000	10,530,000	45,630,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：応用物理学・工学基礎・薄膜・表面界面物性

キーワード：窒化ガリウム、表面・界面、電子準位、絶縁膜、トランジスタ

1. 研究開発当初の背景

窒化ガリウム（GaN）は、シリコン（Si）と比較して約10倍の絶縁破壊電界を有する。これに起因して、トランジスタの動作抵抗をSiの1/100以下に低減することが可能であり、次世代電力変換への応用が期待されている。しかし、GaNトランジスタにおいては、表面および結晶内に存在する電子準位の影響、そのストレスによる増大と新たな準位の発生が、局

所的な高密度電荷発生や電界集中を誘発し、デバイスの特性劣化に直結している可能性が指摘されている。しかしながら、GaNおよびそのヘテロ界面での電子準位はほとんど特定されておらず、デバイス特性劣化との相関も明らかにされていない。このため、トランジスタの動作安定性・信頼性に多くの課題が残されている。

2. 研究の目的

窒化物半導体ヘテロ界面を利用した高電子移動度トランジスタ (HEMT) の劣化特性と表面・バルク電子準位との相関、表面・バルク電子準位の特長解明、電子準位制御構造の開発、新しく提案する多重台形チャネル構造の適用と評価を通して、真に安定な窒化物半導体トランジスタ構造技術の構築を、研究の目的とした。

3. 研究の方法

研究方法として、以下の4つを柱とした。

- (1) AlGaInおよびInAlInのバルク準位/表面準位の系統的評価
- (2) AlGaIn/GaN HEMTの劣化特性と電子準位との相関
- (3) 電気化学的酸化と原子層絶縁膜堆積による表面制御構造
- (4) 多重台形チャネル型AlGaIn/GaN HEMTの電気的特性・信頼性評価

4. 研究成果

(1) AlGaInのバルク電子準位の評価

有機金属気相成長により成長したAlGaInに過渡容量分光法 (DLTS) および光容量法を適用し、深い電子捕獲準位の検出を行った。図1は、検出された支配的準位のエネルギーをAl組成に対してプロットした結果である。本報告のデータは赤四角であり、その他のデータは既報告からの引用である。Al組成の増加に従い、深い準位のエネルギー位置は禁制帯中央付近に近づき、両バンドに対して大きな活性化エネルギーを持つことになる。このAl組成依存性は、両性欠陥モデルに基づくフェルミ準位安定化エネルギーと良く対応しており、欠陥形成エネルギーの考察より、逆位置欠陥と空孔欠陥ペアを含む複合欠陥がAlGaIn結晶中の支配的な深い準位の成因であることが示唆された。

(2) Al₂O₃/n-GaN界面の評価と制御

原子層堆積 (ALD) によるGaN表面へのAl₂O₃ゲート構造の形成プロセスを最適化した。オーミック電極形成プロセスにおける熱処理が、Al₂O₃/GaN界面の電子準位密度を増加させ

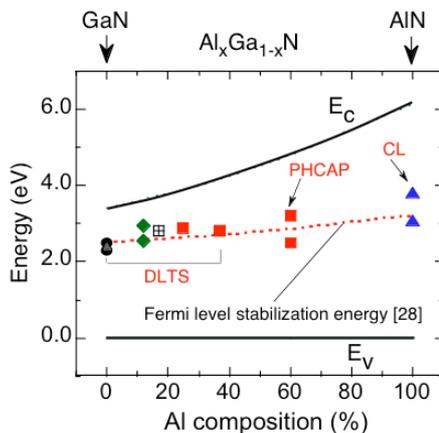


図1 AlGaIn結晶中に検出された深い準位エネルギーのAl組成依存性

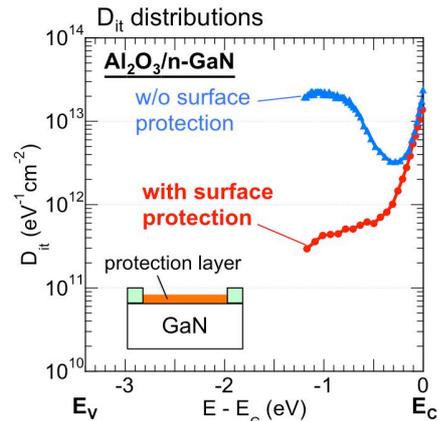


図2 Al₂O₃/GaN構造の界面電子密度分布

ることを明らかにした。この対策として、図2の挿入図に示す様に、オーミックプロセスに表面保護構造を適用し、保護層を除去後にAl₂O₃ゲート構造を形成した。このプロセスにより、図2に示す様に、界面準位密度を10¹¹ cm⁻²eV⁻¹台に低減することが可能となった。

(3) 光支援C-V法によるAl₂O₃/AlGaIn/GaN界面の評価

AlGaInの禁制帯幅以下のエネルギーを持つ光照射を利用しAl₂O₃/AlGaIn界面の電子捕獲準位を評価した。暗状態で逆バイアス方向にC-V測定を行ない、2DEGが空乏するバイアスで単色光を60秒間照射し、光をoffして順バイアス方向にC-V掃引を行う。界面準位に捕獲されている電子が単色光のエネルギーに対応して伝導帯に放出され、界面電荷が相対的に正方向に増加するため、図3に示すようにC-V曲線の逆バイアス方向へのシフトが生まれる。2つのエネルギーの単色光照射に対応するC-V曲線の電圧シフト量 (ΔV_2) は、光エネルギー差 ($\Delta h\nu$) に相当するエネルギー範囲の界面準位電荷変化量に相当する。したがって、界面準位密度は非常にシンプルな計算によって求められる。

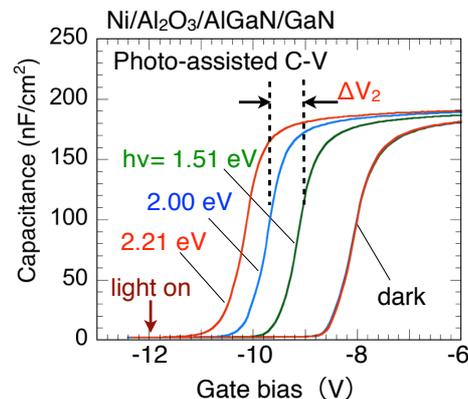


図3 光支援C-V評価の結果

(4) ドライエッチ面を含む $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{AlGaIn}/\text{GaIn}$ 構造の界面準位評価

誘導結合プラズマ (ICP) 支援によるドライエッチングが $\text{AlGaIn}/\text{GaIn}$ 接合の表面ポテンシャル制御に与える影響を調べるために、 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{AlGaIn}/\text{GaIn}$ 構造の容量-電圧 (C-V) 特性評価を行った。バンド不連続量、分極効果、電子捕獲準位の放出時定数を取り入れたC-V特性の厳密数値計算と実験値を比較する手法により、 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{AlGaIn}$ の界面準位密度分布を推定した。図4に、ICPプロセスにより AlGaIn 表面を7nmエッチングした後に原子層堆積法により Al_2O_3 膜を20nm形成したMOS構造のC-V特性を示す。界面準位を考慮しない計算と比較すると、順バイアス領域でのC-V曲線の傾きと立ち上がり電圧 (Step1) に大きな差が見られた。エネルギー的に連続な電子捕獲準位を導入すると、図4に示すように、実験値を再現することができた。さらに、前述の光支援C-V法により禁制帯中央近傍の電子準位を評価した。2つの方法により求めた $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{AlGaIn}$ 界面の電子準位密度分布を図5に示す。ICPエッチングにより、 AlGaIn 表面に多数の原子ステップが形成されることがTEM観測から明らかになり、ステップ端に生

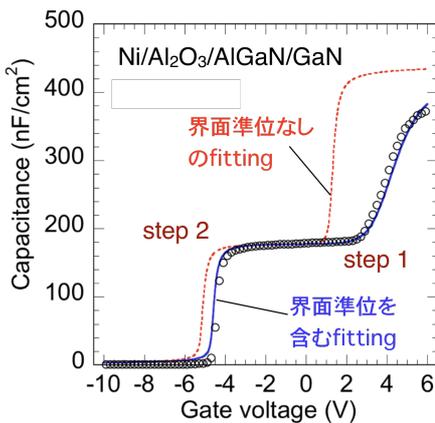


図4 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{AlGaIn}/\text{GaIn}$ 構造のC-V測定結果と計算値

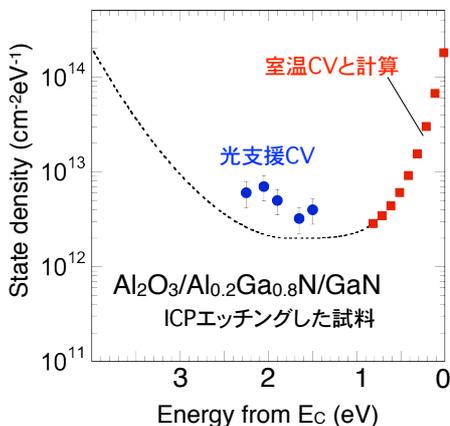


図5 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{AlGaIn}$ 界面の電子準位密度分布

じるダングリングボンドが高密度の電子捕獲準位の成因であると推定される。また、光支援C-V法との併用により、禁制帯中央より伝導帯下端にわたって、 $1 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}\text{eV}^{-1}$ 以上の電子準位が分布することが明らかになった。ヘテロ構造に形成した絶縁膜界面では初めての報告である。

(5) 選択的電気化学酸化プロセスによる埋め込みMOSゲート構造

選択的電気化学酸化により $\text{AlGaIn}/\text{GaIn}$ 構造表面に埋め込み酸化膜を形成し、それをゲートに利用したMOS HEMTを作製した。ヘテロ構造のポテンシャルに対応したステップ状の酸化反応電流が観測され、この反応電流のモニターにより酸化膜制御が可能である。図6に埋め込みMOSゲート $\text{AlGaIn}/\text{GaIn}$ HEMTの伝達特性を示す。酸化膜を形成しないショットキーゲート素子では、そのしきい値電圧は-3.4Vであった。酸化層の膜厚が厚くなるに従ってしきい値は正方向にシフトし、膜厚20nmの場合には+1.2Vとなりノーマリオフ動作が実現した。

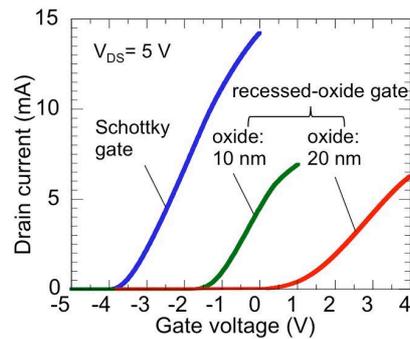


図6 埋め込み酸化ゲート $\text{AlGaIn}/\text{GaIn}$ HEMTの伝達特性

(6) 多重台形チャネル $\text{AlGaIn}/\text{GaIn}$ HEMTの電流安定性評価

多重台形チャネル (MMC) 素子と通常のプレーナ素子において、ドレインゲート間の電極距離 (L_{GD}) を変化させた構造を作製し、電流-電圧特性を評価した。結果を図7に示すが、2つの図で横軸の値が異なることに注意されたい。プレーナ素子では、 L_{GD} の増加に伴ってKnee電圧が増加し、かつ、線形領域の傾きが著しく低下する。 L_{GD} の増加に従って、ドレインゲート間のアクセス抵抗が増大するため、トランジスタのオン抵抗に大きな影響を与える。一方、MMC素子では、Knee電圧・オン抵抗の両方とも L_{GD} 依存性が弱いことが分かった。さらに、バイアス点をオフ領域に設定したパルス電流測定により電流変動特性を評価し、プレーナ素子よりも格段に電流変動が少ないことを見いだした。

次に、多重台形チャネル (MMC) 素子と通常のプレーナ素子において、ドレインバイスを加えたままオフ状態を維持した「オフストレス」が、オン状態にスイッチした場合のドレ

イン電流に与える影響を調べた。結果を図8に示す。なお、両方の素子とも表面パシベーションは行っていない。プレーナ素子では、ストレス印加時のドレイン電圧が30V以上になると、オン抵抗が初期値の数倍になる顕著な電流コラプスが発生する。一方MMC素子では、ストレス印加時のドレイン電圧が50Vの場合でも、オン抵抗の増加は1.5倍にとどまっている。本研究で使用したHEMTのゲート電極幅は $100\mu\text{m}$ であり、この場合、オフストレス中でのドレインアクセス領域の抵抗増加は数 100Ω と見積もられた。プレーナ素子のチャンネル抵抗は数 10Ω であるため、アクセス抵抗増加はオン抵抗増加に直結する。一方、MMC素子のチャンネル幅は 100nm 以下であり、チャンネル抵抗は数 $\text{k}\Omega$ となる。この高インピーダンスにより、MMCでは相対的にアクセス抵抗の影響が少なく、コラプス耐性に優れていると考えられる。表面パシベーションとの組み合わせにより、優れた電流安定性を達成することができる。

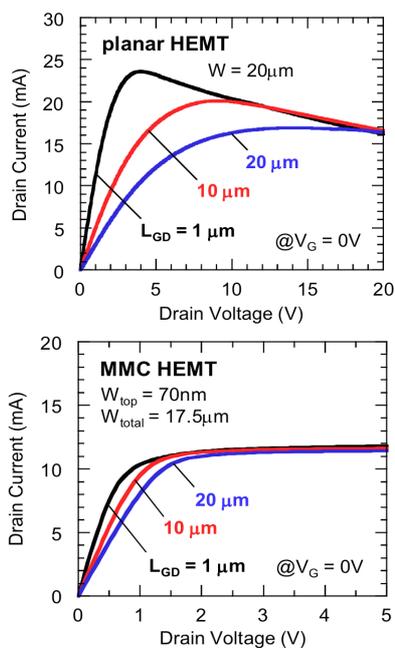


図7 ドレイン-ゲート間距離を変化させた時の電流-電圧特性

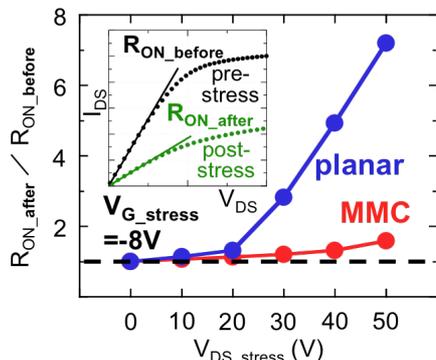


図8 AlGaIn/GaN HEMTにおけるオフストレス印加後のオン抵抗の増加

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22件)

- 1) Z. Yatabe, Y. Hori, S. Kim, and T. Hashizume, "Effects of Cl_2 -Based Inductively Coupled Plasma Etching of AlGaIn on Interface Properties of $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{AlGaIn}/\text{GaN}$ Heterostructures", Appl. Phys. Express 6, 016502 (2013). [DOI:10.7567/APEX.6.016502]
- 2) M. Matys, B. Adamowicz, and T. Hashizume, "Determination of the deep donor-like interface state density distribution in metal/ Al_2O_3 /n-GaN structures from the photocapacitance-light intensity measurement", Appl. Phys. Lett. 101, 231608 (2012). [DOI:10.1063/1.4769815]
- 3) C.-Y. Hu and T. Hashizume, "Non-localized trapping effects in AlGaIn/GaN heterojunction field-effect transistors subjected to on-state bias stress", J. Appl. Phys. 111, 084504 (2012). [DOI: 10.1063/1.470439]
- 4) S. Kim, Y. Hori, W.-C. Ma, D. Kikuta, T. Narita, H. Iguchi, T. Uesugi, T. Kachi, and T. Hashizume, "Interface properties of Al_2O_3 /n-GaN structures with inductively coupled plasma etching of GaN surfaces", Jpn. J. Appl. Phys. 51, 060201 (2012). [DOI: 10.1143/JJAP.51.060201]
- 5) Y. Hori, C. Mizue and T. Hashizume, "Interface state characterization of ALD- Al_2O_3 /GaN and ALD- Al_2O_3 /AlGaIn/GaN structures", Physica Status Solidi C 9, 1356-1360 (2012). [DOI 10.1002/pssc.201100656]
- 6) K. Ohi and T. Hashizume, "Reduction of current collapse in multi-mesa-channel AlGaIn/GaN HEMTs", Physica Status Solidi C 9, 898-902 (2012). [DOI 10.1002/pssc.201100301]
- 7) M. Miczek, P. Bidzinski, B. Adamowicz, C. Mizue and T. Hashizume, "The influence of interface states and bulk carrier lifetime on the minority carrier behavior in an illuminated metal/insulator/GaN structure", Solid State Commun. 151, 830-833 (2011). [DOI:10.1016/j.ssc.2011.03.021]
- 8) M. Tajima and T. Hashizume, "Impact of gate and passivation structures on current collapse of AlGaIn/GaN HEMTs under off-state-bias stress", Jpn. J. Appl. Phys. 50, 061001 (2011). [DOI: 10.1143/JJAP.50.061001]
- 9) P. Bidzinski, M. Miczek, B. Adamowicz, C. Mizue and T. Hashizume, "Impact of Interface States and Bulk Carrier Lifetime on Photocapacitance of Metal/Insulator/GaN Structure for Ultraviolet Light Detection", Jpn. J. Appl. Phys. 50, 04DF08 (2011). [DOI: 10.1143/JJAP.50.04DF08]
- 10) M. Akazawa, B. Gao, T. Hashizume, M. Hiroki, S. Yamahata, and N. Shigekawa, " $\text{Al}_{0.44}\text{Ga}_{0.56}\text{N}$ spacer layer to prevent electron accumulation inside barriers in lattice-matched InAlN/AlGaIn/AlN/GaN heterostructures", Appl. Phys. Lett. 98, 142117 (2011). [DOI: 10.1063/1.3578449]

- 11) N. Harada, Y. Hori, N. Azumaishi, K. Ohi and T. Hashizume, "Formation of recessed-oxide gate for normally-off AlGaIn/GaN HEMTs using a selective electrochemical oxidation", *Appl. Phys. Express* 4, 021002 (2011). [DOI: 10.1143/APEX.4.021002]
- 12) C. Mizue, Y. Hori, M. Miczek, and T. Hashizume, "Capacitance-voltage characteristics of Al₂O₃/AlGaIn/GaN structures and state density distribution at Al₂O₃/AlGaIn interface", *Jpn. J. Appl. Phys.* 50, 021001 (2011). [DOI: 10.1143/JJAP.50.021001]
- 13) E. Ogawa and T. Hashizume, "Variation of Chemical and Photoluminescence Properties of Mg-Doped GaN Caused by High-Temperature Process", *Jpn. J. Appl. Phys.* 50, 021002 (2011). [DOI: 10.1143/JJAP.50.021002]
- 14) M. Akazawa, B. Gao, T. Hashizume, M. Hiroki, S. Yamahata, and N. Shigekawa, "Measurement of valence-band offsets of InAlN/GaN heterostructures grown by metal-organic vapor phase epitaxy", *J. Appl. Phys.* 109, 013703 (2011). [DOI:10.1063/1.3527058]
- 15) C.-Y. Hu, T. Hashizume, K. Ohi, M. Tajima, "Trapping effect evaluation of gateless AlGaIn/GaN heterojunction field-effect transistors using transmission-line-model method", *Appl. Phys. Lett.* 97, 222103 (2010). [DOI: 10.1063/1.3506583]
- 16) K. Ooyama, K. Sugawara, S. Okuzaki, H. Taketomi, H. Miyake, K. Hiramatsu, and T. Hashizume, "Deep electronic levels of Al_xGa_{1-x}N with a wide range of Al composition grown by metal-organic vapor phase epitaxy", *Jpn. J. Appl. Phys.* 49, 101001 (2010). [DOI: 10.1143/JJAP.49.101001]
- 17) Y. Hori, C. Mizue, and T. Hashizume, "Process conditions for improvement of electrical properties of Al₂O₃/n-GaN structures prepared by atomic layer deposition", *Jpn. J. Appl. Phys.* 49, 080201 (2010) [DOI: 10.1143/JJAP.49.080201].
- 18) D. Gregušová, R. Stoklas, C. Mizue, Y. Hori, J. Novák, T. Hashizume, and P. Kordoš, "Trap states in AlGaIn/GaN metal-oxide-semiconductor structures with Al₂O₃ prepared by atomic layer deposition", *J. Appl. Phys.* 107, 106104(2010). [DOI:10.1063/1.3428492]
- 19) M. Akazawa, T. Matsuyama, T. Hashizume, M. Hiroki, S. Yamahata, and N. Shigekawa, "Small valence-band offset of In_{0.17}Al_{0.83}N/GaN heterostructure grown by metal-organic vapor phase epitaxy", *Appl. Phys. Lett.* 96, 132104 (2010).[DOI:10.1063/1.3368689]
- 20) T. Kubo, H. Taketomi, H. Miyake, K. Hiramatsu, and T. Hashizume, "Variation of surface potentials of Si-doped Al_xGa_{1-x}N (0 < x < 0.87) grown on AlN/sapphire template by metal-organic vapor phase epitaxy", *Appl. Phys. Express* 3, 021004(2010).[DOI: 10.1143/APEX.3.021004]
- 21) K. Ohi and T. Hashizume, "Drain Current Stability and Controllability of Threshold Voltage and Subthreshold Current in a Multi-Mesa-Channel AlGaIn/GaN High Electron Mobility Transistor", *Jpn. J. Appl. Phys.* 48, 081002-1-5 (2009).[DOI:10.1143/JJAP.48.081002]
- 22) K. Sugawara, J. Kotani and T. Hashizume, "Near-midgap deep levels in Al_{0.26}Ga_{0.74}N grown by metal-organic chemical vapor deposition", *Appl. Phys. Lett.* 94, Art. No. 152106-1-3 (2009). [DOI: 10.1063/1.3119643]
- [学会発表] (計110件)
(招待講演: 20件)
- 1) 赤澤正道、橋詰 保、「InAlN/GaN ヘテロ構造の表面・界面の評価と制御」、応用物理学関係連合講演会シンポジウム: GaN系材料表面・界面評価の進展、第60回応用物理学関係連合講演会、2013年3月27日~30日、神奈川工科大学、神奈川。
- 2) 橋詰 保、「GaNパワーデバイスにおける異種接合界面の制御」、日本表面科学会第74回表面科学研究会平成24年度中部表面科学シンポジウム、2013年1月26日、名古屋大学、名古屋。
- 3) T. Hashizume, "Characterization and control of insulated gates for GaN power switching transistors", The Ninth International Conference on Advanced Semiconductor Devices and Microsystems (ASDAM-2012), November 11-15, 2012, House of Scientists of Slovak Academy of Sciences, Slovakia.
- 4) 橋詰 保、「GaN系絶縁膜界面の制御とパワートランジスター応用」、応用電子物性分科会研究例会、2012年11月2日、金沢工業大学大学院虎ノ門キャンパス、東京。
- 5) T. Hashizume, "Insulated gate technologies for high-performance GaN transistors", International Workshop on Nitride Semiconductors 2012 (IWN2012), October 14-19, 2012, Sapporo Convention Center, Japan.
- 6) T. Hashizume, "In-grown and process-induced deep levels in AlGaIn alloys". International Workshop on "Frontier of Nitride Semiconductor Alloy Photonics (NSAP)", Hotel Springs, Chiba, May 10, 2012.
- 7) 橋詰 保、「GaNおよびAlGaInのバルク準位と界面準位評価」、第4回窒化物半導体結晶成長講演会、2012年4月27日、東大生研、東京。
- 8) T. Hashizume, "GaIn-based MOS structures processed with plasma-assisted dry etching", 4th International Symposium on Advanced Plasma Science and its Applications for Nitrides and Nanomaterials (ISPlasma2012), Chubu University, Kasugai, Mar. 5-8, 2012.
- 9) J. T. Asubar and T. Hashizume, "GaIn transistors for next-generation power conversion system", International Symposium on Technology for Sustainability, King Mongkut's Institute of Technology, Bangkok, Thailand, Jan. 26-28, 2012.
- 10) T. Hashizume, Y. Hori, and C. Mizue, "Characterization and control of GaIn-based MOS structures", 2011 Meijo International Symposium on Nitride Semiconductors (MSN 2011), Meijo University, Nagoya, Dec. 10, 2011.

- 11) 橋詰 保、「GaNヘテロ接合トランジスタの次世代インバータ展開」、日本金属学会第3分科会シンポジウム「環境・医療・IT調和型デバイス、及び材料の最前線」、2011年9月22日、科学技術館、東京。
- 12) 橋詰 保、「MOVPE法によるAlGaIn中の深い準位」、応用物理学会シンポジウム（ワイドギャップ窒化物AlGaInの結晶評価と深紫外光デバイス応用）、2010年9月16日、長崎大学、長崎。
- 13) 橋詰 保、「窒化物半導体の表面・界面制御とパワートランジスタ展開」、日本学術振興会アモルファス・ナノ材料第147委員会第108回研究会、2010年7月9日、主婦会館、東京。
- 14) T. Hashizume, Y. Hori and C. Mizue, "Interface control technologies of GaN-based MOS structures for high-efficiency power switching transistors", Workshop on Dielectrics in Microelectronics (WoDiM 2010), Hotel SUZA, Bratislava, Slovak, June 28-30, 2010.
- 15) 橋詰 保、「AlGaInの深い電子準位と表面ポテンシャル」、応用物理学会応用電子物性分科会研究会、2010年5月21日、大阪大学銀杏会館、大阪。
- 16) T. Hashizume and K. Ohi, "Current controllability and stability of multi-mesa-channel AlGaIn/GaN HEMTs", 2010 International Meeting for Future of Electron Devices, Kansai (IMFEDK), Kansai Univ., Osaka, May 13- 14, 2010.
- 17) T. Hashizume, "Effects of plasma processing on surface properties of GaN and AlGaIn", 2nd International Symposium on Advanced Plasma Science and its Applications for Nitrides and Nanomaterials (ISPlasma-2010), Meijo Univ., Nagoya, Mar. 8-10, 2010.
- 18) 橋詰 保、「窒化物半導体の特徴とデバイス展開」、第27回無機材料に関する最近の研究成果発表会-材料研究の最前線から-、2010年1月25日、東海大学校友会館、東京。
- 19) T. Hashizume, "Characterization and control of GaN and AlGaIn surfaces for high-performance GaN-based transistors", Huang Kun Forum, Chinese Academy of Science, Beijing, China, Nov. 6, 2009.
- 20) 橋詰 保、「窒化物半導体のMIS界面電子準位」、日本学術振興会第154委員会・第162委員会合同研究会、キャンパスイノベーションセンター東京、2009年10月26日。

(国際会議一般講演：38件)

(国内会議一般講演：52件)

[その他] ホームページ

<http://www.rciqe.hokudai.ac.jp/qcp>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

橋詰 保 (HASHIZUME TAMOTSU)
北海道大学・量子集積エレクトロニクス
研究センター・教授
研究者番号：80149898

(2) 研究分担者

佐藤 威友 (SATO TAKETOMO)
北海道大学・量子集積エレクトロニクス
研究センター・准教授
研究者番号：50343009
古賀 裕明 (KOGA HIROAKI)
北海道大学・量子集積エレクトロニクス
研究センター・助教
研究者番号：80519413
(平成21年度のみ)
久保 俊晴 (KUBO TOSHIHARU)
北海道大学・量子集積エレクトロニクス
研究センター・非常勤研究員
研究者番号：10422338
(平成21年度のみ)
赤澤 正道 (AKAZAWA MASAMICHI)
北海道大学・量子集積エレクトロニクス
研究センター・准教授
研究者番号：30212400
(平成22～24年度)