

平成 30 年 6 月 20 日現在

機関番号：13401

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K06013

研究課題名(和文) 自立GaN基板・MMC構造を利用したGaN HEMTの信頼性向上へのアプローチ

研究課題名(英文) Improving the reliability of GaN HEMTs using MMC structures and free-standing GaN substrates

研究代表者

ASUBAR JOEL (Asubar, Joel)

福井大学・テニューアトラック推進本部・講師

研究者番号：10574220

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,800,000円

研究成果の概要(和文)：本研究課題の目的は、マルチメサチャネル構造をAlGaIn/GaN HEMT構造に適用し、上記の安定性および信頼性に関する問題を解決することである。MMC HEMTは電流コラプスおよびその他の不安定性に対して高い耐性を示し、有望なパワーデバイスの実現に向けて、有望なデバイス構造の一つになることが明らかになった。また、電流コラプスの対策法として、MMCと共に適用することができる、高圧水蒸気アニーリング、酸素プラズマ処理、フィールドプレートおよび金属-絶縁体-半導体構造についても評価をおこない、MMCとの同時併用が有望である可能性が示唆された。

研究成果の概要(英文)：Our aim is to achieve improved stability and reliability of AlGaIn/GaN HEMTs using structure-based strategies such as using the so-called multi-mesa-channel. Investigations have revealed that the MMC HEMT is highly resistant to current collapse and other instabilities, making it a leading power electronics prospect. We also investigated other current collapse approaches that can be used in conjunction with MMC in the future such as high pressure water vapor annealing, oxygen plasma treatment, field-plate and metal-insulator-semiconductor structures.

研究分野：Power device

キーワード：Gallium nitride current collapse power device semiconductor AlGaIn/GaN HEMT

1. 研究開始当初の背景

パワーエレクトロニクスは、エネルギーの効率的な利用を通じて地球温暖化の問題を解決するための重要な対策の一つであり、供給された電力を必要な形式の電力、または他の動力に変換、制御するための電子回路・システムのことである。電力は様々な機器に適した形式に、それぞれ変換されて消費される。この時に、投入されたすべての電力が仕事に変換されずに、必ず熱損失が起きる。従って、電力消費を抑えるために、この熱損失を減らすというアプローチが重要である。現在、この電力変換デバイスを構成しているのは主にシリコン(Silicon: Si)を材料としたトランジスタ、及びダイオードである。熱損失は、これらのデバイスの、とりわけオン抵抗に依存する。しかし、オン抵抗を減少させるには、Siの物性限界に達しているため、現在以上の大幅な損失低減は困難な状況である。そこで、窒化ガリウム(GaN)などの新たなパワーデバイス半導体材料に注目が集まっている。GaNはSiの約3倍のバンドギャップ、10倍の破壊電界を有しており、パワーデバイス応用に望ましい物性値となっている。GaNをパワーデバイス材料に利用することによって、より小さなデバイスになり、より低いデバイス抵抗を実現でき、熱損失も大幅に低くなる。従って、GaN半導体は、超低損失パワーデバイス実現の鍵となる材料である。もう一つのGaNの利点は、他のIII-V族窒化物半導体とヘテロ接合を形成することが出来る点である。その中で、最も研究されているのは、AlGaIn/GaNヘテロ接合である。強い自発分極と圧電分極によって、AlGaIn/GaN界面の三角形の量子井戸に2次元電子ガス(2DEG: 2-dimensional electron gas)が生じる。この比較的高密度の2DEGを用いることができるのが、AlGaIn/GaN高電子移動度トランジスタ(HEMT: high-electron-mobility transistor)デバイスの利点である(図1)。

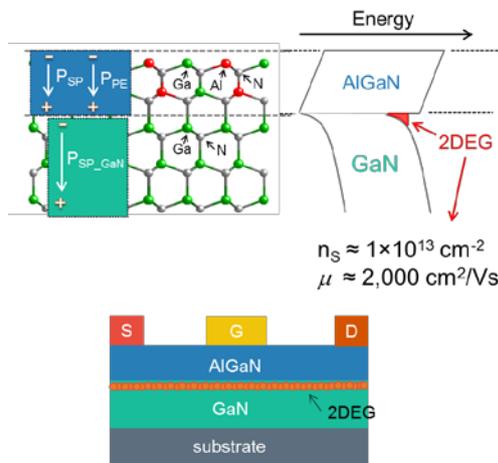


図1 (a) AlGaIn層の自発分極と圧電分極、(b) AlGaIn/GaNヘテロ構造のバンド図と2DEG、(c) AlGaIn/GaN高電子移動度トランジスタの模式図。

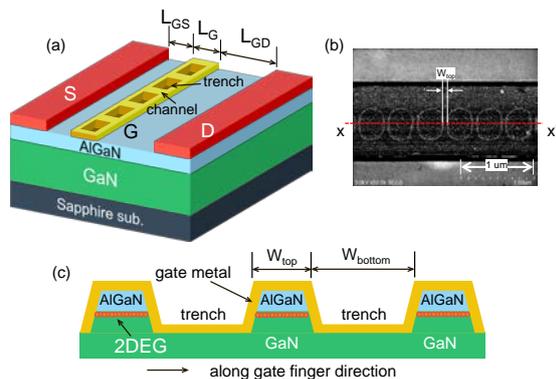


図2 Multi-mesa-channel (MMC) AlGaIn/GaN高電子移動度トランジスタ: (a)模式図、(b)走査型電子顕微鏡像、(c) MMC構造断面図。

しかし、AlGaIn/GaN HEMTの実用化に向けて、電流コラプス、キンク効果、高電流レベルでの直線性不良(g_m コラプス)、自己発熱、ノーマリオン動作などの信頼性・安定性に関わる問題が存在している。特に電流コラプスは、高電圧、または高電力ストレス印加後のドレイン電流の一時的な減少のことで(図2)、AlGaIn/GaN HEMTの広範な普及を実現するための大きな壁となっており、これらの問題を解決する必要がある。

2. 研究の目的

電流コラプスは、AlGaIn表面上に電子がトラップすることに起因すると考えられているため、電流コラプスの対策として、通常、表面パッシベーションなどが用いられている。しかしながら、現状、表面パッシベーションを適用しても電流コラプスの完全な解決には至っていない。そこで、本研究課題では、より安定なAlGaIn/GaN HEMTの動作を得るため、ナノマイクロ構造を適用するなどの新しい手法により、電流コラプス、キンク効果、高電流レベルでの直線性不良、自己発熱、ノーマリオン動作などを解決することを目的とした。図2にナノ構造を持つ多重台形チャネル(MMC: multi-mesa-channel) HEMTを示す。MMCはそのユニークな構造により、2DEGを上部からではなく、サイド壁を通して、ポテンシャルを変調させ、ゲート制御性が著しく向上させることが可能である。さらなる電流コラプスの低減のため、このMMCと組み合わせて使用することができる、高圧水蒸気(HPWVA: High Pressure Water Vapor Annealing)処理、O₂プラズマ処理をAlGaIn表面に対しておこない、それらのAlGaIn/GaN HEMTに対する効果を評価・検討をおこなった。ノーマリオフの問題に関しては、リセスゲートAlGaIn/GaN MIS-(Metal Insulator Semiconductor) HEMTの作製と評価もおこなった。また、AlGaIn/GaN HEMTにおける自己発熱の基板(Sapphire, SiC, GaN)依存性について、初期的な評価もおこなった。

3. 研究の方法

(1) 試料構造

AlGaIn/GaN ヘテロ構造を試料として使用した。まず、電子ビームリソグラフィとウェットエッチングにより SiO₂ マスクをパターンニングした。パターンはドライエッチングにより基板に転写され、デバイスアイソレーション、及びトレンチ構造を形成した。ソース、及びドレインオーミック電極として、Ti/Al/Ti//Au を真空蒸着して、800 °C、1 分間の熱処理をおこなった。ゲート電極には Ni/Au を用いた。

(2) 評価方法

通常のスイッチング動作で AlGaIn/GaN HEMT デバイスの性能を評価するために、これらのデバイスに対して、電圧ストレスに依存する動的オン抵抗 (R_{on}) 測定をおこなった。ドレインバイアスは 100 V とし、負荷線が DC における $I-V$ 曲線の最大ドレイン電流の 1/4 未満と交差するように、負荷抵抗は約 10 k Ω に設定した。すなわち、線形領域における動的オン抵抗を測定した。また、 V_{GSoff} と V_{GSon} の間で交互に切り替えるパルス列をゲートに印加した。オン状態の電圧を保持する時間を t_{on} 、オフ状態を保持する時間を t_{off} とした。指定したオン時間におけるドレイン電圧、及びドレイン電流値を測定し、これらの値から動的オン抵抗 (Dynamic R_{on}) を求めた。また、Dynamic R_{on} と DC の Static R_{on} の比を規格化動的オン抵抗、(NDR : Normalized Dynamic R_{on}) と定義し、これを電流コラプス評価の指標とした。NDR が大きいほど、直流オン抵抗に対し動的オン抵抗が高く、電流コラプス特性が悪いことを意味する。

4. 研究成果

MMC HEMT はキック効果を抑制するのに有効であることが実証された。キック現象は、 V_{DS} の増加に伴う出力コンダクタンスの急激な増加であり、図 3a の I_D-V_{DS} 特性に示すように従来のプレーナーデバイスでは顕著である。

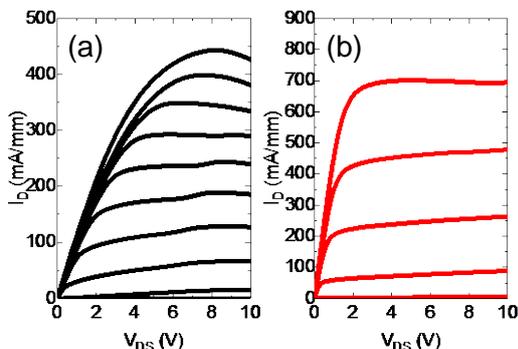


図 3 AlGaIn/GaN HEMT の I_D-V_{DS} 特性の比較 (a) プレーナー (b) MMC.

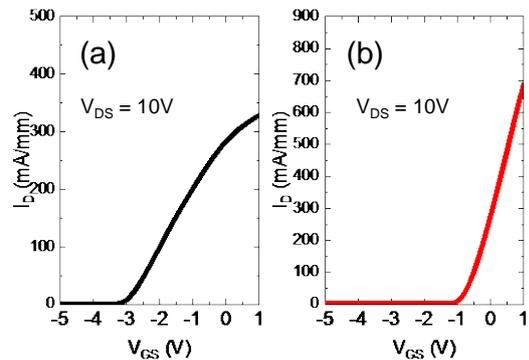


図 4 AlGaIn/GaN HEMT の I_D-V_{GS} 特性の比較 (a) プレーナー (b) MMC.

一方、このキック現象は、MMC デバイスでは観測されなかった (図 3b)。さらに、MMC デバイスの I_D-V_{GS} 特性 (図 4 a) の直線性が良いことからわかるように、MMC デバイスは g_m コラプスを抑制していることが明らかになった。言い換えると、従来のプレーナーデバイスに比べて非常に線形性に優れている (図 4 b)。

電流コラプスに関し、図 5 に MMC の V_{DD} に対する NDR の依存性を従来のプレーナーデバイスと比較した図を示す。プレーナーデバイスと比較して、MMC デバイスの NDR が低いことから、MMC デバイスでは電流コラプスが抑制されていることが明らかになった。 $V_{DD} \geq 30$ V では、MMC デバイスの NDR はプレーナーデバイスの NDR の約 60% しかなかった。したがって、MMC AlGaIn/GaN HEMT が、実際の回路上のスイッチング条件においても、従来のプレーナー型よりも優れた性能を有することが確認できた。

さらなる電流コラプスの低減を目指し、MMC と組み合わせて使用することができる、HPWVA 処理、O₂ プラズマ処理を AlGaIn 表面に対しておこない、AlGaIn/GaN HEMT を作製した。パルス測定などによる評価・解析結果から HPWVA 処理は動的オン抵抗の増加を抑制し、電流コラプスの改善に非常に有効であることが明らかになった。

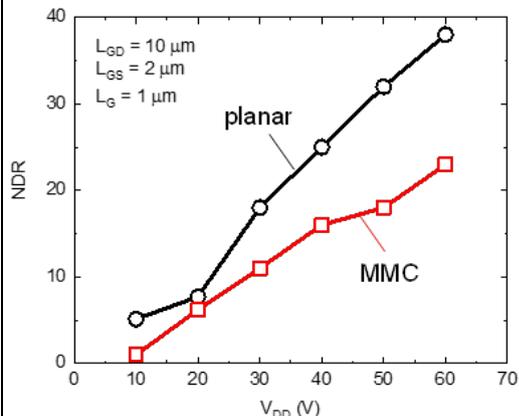


図 5 プレーナーと MMC の NDR の比較

すなわち、HPWVA 処理は、比較的簡便なプロセスで、低ダメージ・低温プロセスであるため、AlGa_N/Ga_N HEMT の性能を改善するのに有望な手段の 1 つであると言える。次に O₂ プラズマ処理の効果について評価を行った。O₂ プラズマ処理をおこなった試料は、O₂ プラズマをおこなわなかった試料と比べ、より安定した動的な特性を示した。O₂ プラズマ処理も HPWVA と同様に電流コラプスの低減に効果的であることが明らかになった。さらなる動作の安定性を得るために、O₂ プラズマ処理とフィールドプレート構造を組み合わせたデバイスも作製した。このデバイスは、さらに安定した動的な動作が実現された。

また、AlGa_N/Ga_N HEMT における自己発熱効果の基板 (Sapphire、SiC、Ga_N) 依存性について初期的な評価をおこなった。結果としては SiC 基板上の AlGa_N/Ga_N HEMT が、最も自己発熱効果を抑制することが明らかになった。

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 12 件)

- ① Joel T. Asubar, Hirokuni Tokuda, Masaaki Kuzuhara, Zenji Yatabe, Kenya Nishiguchi, and Tamotsu Hashizume: "Improved linearity, stability, and thermal performance of multi-mesa-channel AlGa_N/Ga_N HEMTs (invited)", accepted for publication in PISKA (2018) 査読有り
- ② Hirokuni Tokuda, Kosuke Suzuki, Joel T. Asubar, and Masaaki Kuzuhara: "Electron concentration in highly resistive Ga_N substrates co-doped with Si, C, and Fe", Japanese Journal of Applied Physics 57 071001-1-4 (2018), 10. 7567/JJAP. 57. 071001
- ③ Taisei Yamazaki, Joel T. Asubar, Hirokuni Tokuda, and Masaaki Kuzuhara: Impact of rounded electrode corners on breakdown characteristics of AlGa_N/Ga_N high-electron mobility transistors", Applied Physics Express 11 054102-1-5 (2018), 査読有り 10. 7567/APEX. 11. 054102
- ④ Shintaro Ohi, Taisei Yamazaki, Joel T. Asubar, Hirokuni Tokuda, and Masaaki Kuzuhara: Correlation of AlGa_N-Ga_N high-electron-mobility transistors electroluminescence characteristics with current collapse", Applied Physics Express 11 024101-1-4 (2018),

査読有り 10. 7567/APEX. 11. 024101

- ⑤ Hirokuni Tokuda, Joel T. Asubar, and Masaaki Kuzuhara: Analytical derivation of interface state density from sub-threshold swing in AlGa_N-Ga_N metal-insulator-semiconductor high-electron mobility transistors", Japanese Journal of Applied Physics 56 104101-1-5 (2017), 査読有り 10. 7567/JJAP. 56. 104101
- ⑥ H. Tokuda, J. T. Asubar, and M. Kuzuhara: AlGa_N/Ga_N MIS-HEMTs with high on/off current ratio of over 5 × 10¹⁰ achieved by ozone pretreatment and using ozone oxidant for Al₂O₃ gate insulator", Japanese Journal of Applied Physics 55 (2016), 120305-1-4, 査読有り 10. 7567/JJAP. 55. 120305
- ⑦ S. Kaneki, J. Ohira, S. Toiya, Z. Yatabe, J. T. Asubar, and T. Hashizume: Highly-stable and low-state-density Al₂O₃-Ga_N interfaces using epitaxial n-Ga_N layers grown on free-standing Ga_N substrates", Applied Physics Letters 109 162104-1-5 (2016), 査読有り 10. 1063/1. 4965296
- ⑧ Z. Yatabe, J. T. Asubar, and T. Hashizume: Insulated gate and surface passivation structures for Ga_N-based power transistors (invited)", Journal of Physics D: Applied Physics 49 393001-1-19 (2016), 査読有り 10. 1088/0022-3727/49/39/393001
- ⑨ M. Kuzuhara, J. T. Asubar, H. Tokuda: AlGa_N/Ga_N HEMT Technology for High-Voltage and Low On-Resistance Operation (invited)", Japanese Journal of Applied Physics 55 (7) 070101-1-12 (2016), 査読有り 10. 7567/JJAP. 55. 070101
- ⑩ J. T. Asubar, S. Yoshida, H. Tokuda, and M. Kuzuhara: Highly Reduced Current Collapse in AlGa_N/Ga_N HEMTs by Combined Application of Oxygen Plasma Treatment and Field-plate Structures", Japanese Journal of Applied Physics 55 04EG07-1-5 (2016), 査読有り 10. 7567/JJAP. 55. 04EG07
- ⑪ J. T. Asubar, Y. Sakaida, S. Yoshida, Z. Yatabe, H. Tokuda, T. Hashizume, and

M. Kuzuhara: Impact of oxygen plasma treatment on the dynamic on-resistance of AlGa_N/Ga_N high-electron-mobility transistors", Applied Physics Express 8 111001-1-4 (2015), 査読有り 10.7567/APEX.8.111001

- ⑫ J. T. Asubar, Y. Kobayashi, K. Yoshitsugu, Z. Yatabe, H. Tokuda, M. Horita, Y. Uraoka, T. Hashizume, and M. Kuzuhara: Current Collapse Reduction in AlGa_N/Ga_N HEMTs by High-Pressure Water Vapor Annealing", IEEE Transactions on Electron Devices, 62 2423-2428 (2015), 査読有り 10.1109/TED.2015.2440442

[[学会発表] (計 28 件)

- ① Kosuke Suzuki, Atsuki Aoai, Joel T. Asubar, Hirokuni Tokuda, Kohei Nojima, Naoto Ishibashi, Narihito Okada, Kazuyuku Tadatomo, and Masaaki Kuzuhara, "Characterization of resistivity and breakdown field in Fe-doped semi-insulating Ga_N substrates", Workshop on Compound Semiconductor Devices and Integrated Circuits held in Europe (WOCSDICE 2018), Bucharest, Romania, May 14-16, 2018
- ② Wataru Gamachi, Joel Asubar, Hirokuni Tokuda, and Masaaki Kuzuhara, "Characterization of AlGa_N/Ga_N recessed MIS-HEMTs using sputtered Si_N as gate dielectric", 2018-nendo Shunki Dai-65-kai Ouyou Butsuri Gakku Kankei Rengou Koenkai (Japan Society of Applied Physics 65th Spring Meeting), Waseda University, Tokyo, Japan, March 17-20, 2018
- ③ H. Tokuda, J. T. Asubar, and M. Kuzuhara, "A method for deriving interface state density from sub-threshold swing in AlGa_N/Ga_N HEMTs", International Symposium on Advanced Plasma Science and its Applications for Nitrides and Nanomaterials (ISPlasma 2018), Meijo University, Nagoya, Japan, March 4-8, 2018
- ④ W. Gamachi, K. Ishii, J. T. Asubar, H. Tokuda, and M. Kuzuhara, "Enhancement-Mode AlGa_N/Ga_N MOS-HEMTs with Recessed-Gate Structures Exhibiting High Threshold Voltage", 6th International Symposium on Organic and Inorganic Electronic Materials and Related Nanotechnologies (EM-NANO 2017), Fukui, Japan, June 18-21, 2017
- ⑤ Taisei Yamazaki, Joel T. Asubar, Hirokuni Tokuda, and Masaaki Kuzuhara, "Effect of Substrate Thermal Resistivity on Breakdown Voltage of AlGa_N/Ga_N HEMTs", 6th International Symposium on Organic and Inorganic Electronic Materials and Related Nanotechnologies (EM-NANO 2017), Fukui, Japan, June 18-21, 2017
- ⑥ Joel T. Asubar, Hirokuni Tokuda, Tamotsu Hashizume, and Masaaki Kuzuhara, "Investigation of Dynamic On-Resistance of Multi-Mesa-Channel AlGa_N/Ga_N HEMTs", 6th International Symposium on Organic and Inorganic Electronic Materials and Related Nanotechnologies (EM-NANO 2017), Fukui, Japan, June 18-21, 2017
- ⑦ J. T. Asubar, H. Tokuda, and M. Kuzuhara, "Effective Suppression of Current Collapse in AlGa_N/Ga_N HEMTs (invited)", 35th Samahang Pisika ng Pilipinas Physics Conference (SPP 2017), Cebu, Philippines, June 7-10, 2017
- ⑧ Z. Yatabe, J. T. Asubar, Y. Nakamura, and T. Hashizume, "Effects of Electronic States at Insulator/AlGa_N Interfaces on Threshold Voltage Instability of Al₂O₃/AlGa_N/Ga_N Structures", 2016 International Conference on Solid State Devices and Materials (SSDM 2016), Tsukuba, Japan, September 26-29, 2016
- ⑨ S. Makino, S. Ohi, T. Yamazaki, J. T. Asubar, H. Tokuda, M. Kuzuhara, "Effect of Metal Electrode Process on Breakdown Voltages in AlGa_N/Ga_N HEMTs", 2016-nendo Shuuki Dai-77-kai Ouyou Butsuri Gakkai Gakujutsu Koenkai (Japan Society of Applied Physics 77th Autumn Meeting), Toki Messe, Niigata, Japan, Sept. 13 -16, 2016
- ⑩ Z. Yatabe, Y. Hori, W.C. Ma, J. T. Asubar, M. Akazawa, T. Sato, and T.

- Hashizume, "Characterization of electronic states at insulator/(Al)GaN interfaces for improved insulated gate and surface passivation structures of GaN-based transistors (invited)", 2016-nendo Shuuki Dai-77-kai Ouyou Butsuri Gakkai Gakujutsu Koenkai (Japan Society of Applied Physics 77th Autumn Meeting), Toki Messe, Niigata, Japan, Sept. 13 -16, 2016
- ⑪ J. H. Ng, J. T. Asubar, H. Tokuda, M. Kuzuhara, "AlGaIn/GaN HEMTs on Free-standing GaN Substrates with Critical Electric Field of 1.2 MV/cm", 2016-nendo Shuuki Dai-77-kai Ouyou Butsuri Gakkai Gakujutsu Koenkai (Japan Society of Applied Physics 77th Autumn Meeting), Toki Messe, Niigata, Japan, Sept. 13 -16, 2016
- ⑫ T. Yamazaki, Y. Suzuki, J. T. Asubar, H. Tokuda, M. Kuzuhara, "Effect of drain electrode shape on breakdown voltage in AlGaIn/GaN HEMTs", 2016-nendo Shuuki Dai-77-kai Ouyou Butsuri Gakkai Gakujutsu Koenkai (Japan Society of Applied Physics 77th Autumn Meeting), Toki Messe, Niigata, Japan, Sept. 13 -16, 2016
- ⑬ J. T. Asubar, H. Tokuda, M. Kuzuhara, Z. Yatabe, K. Nishiguchi, and T. Hashizume, "Improved linearity, stability, and thermal performance of multi-mesa-channel AlGaIn/GaN HEMTs (invited)", 34th Samahang Pisika ng Pilipinas Physics Conference (SPP 2016), University of the Philippines Visayas, Iloilo, Philippines, August 18-21, 2016
- ⑭ S. Ohi, S. Makino, T. Yamazaki, H. Tokuda, J. T. Asubar, and M. Kuzuhara, "Impact of Drain Electrode Shape Irregularities on Breakdown Voltage of AlGaIn/GaN HEMTs", 2016 Compound Semiconductor Week (CSW 2016), Toyama International Conference Center, Toyama, Japan, June 26-30, 2016
- ⑮ H. Tokuda, J. T. Asubar, M. Kuzuhara, "High on/off ratio AlGaIn/GaN MIS-HEMTs with ALD deposited Al₂O₃ gate dielectric using ozone as an oxidant", 2016 Asia-Pacific Workshop on Fundamentals and Applications of Advanced Semiconductor Devices (AWAD 2016), Hakodate, Japan, July 4-6, 2016
- ⑯ S. Makino, T. Yamazaki, S. Ohi, H. Tokuda, J. T. Asubar, and M. Kuzuhara, "Effect of Metal Electrode Shape Irregularities on AlGaIn/GaN HEMTs Breakdown Voltage Revealed by Electroluminescence", 40th Workshop on Compound Semiconductor Devices and Integrated Circuits (WOCSDICE) 2016, Aveiro, Portugal, June 6-10, 2016
- ⑰ J. H. Ng, J. T. Asubar, H. Tokuda, and M. Kuzuhara, "AlGaIn/GaN HEMTs on Free-standing GaN Substrates with Breakdown Voltage of 5 kV and Effective Lateral Critical Field of 1 MV/cm", 2016 International Conference on Compound Semiconductor Manufacturing Technology (CS Mantech 2016), Miami, Florida, USA, May 16-19, 2016
- ⑱ J. T. Asubar, S. Yoshida, H. Tokuda, M. Kuzuhara, "Highly Reduced Current Collapse in AlGaIn/GaN HEMTs by Combined Application of Oxygen Plasma Treatment and Field-plate Structures", 2015 International Conference on Solid State Devices and Materials (SSDM 2015), Sapporo, Japan, September 27-30, 2016

[その他]

ホームページ等

https://www.researchgate.net/profile/Joel_Asubar

6. 研究組織

(1) 研究代表者

Joel T. Asubar (Asubar Joel Tacla)

福井大学・テニユアトラック推進本部・講師
研究者番号：10574220

(2) 研究分担者

葛原 正明 (Kuzuhara Masaaki)

福井大学・学術研究院工学系部門・教授
研究者番号：20377469