

Oral presentation | 13 Semiconductors : 13.7 Compound and power devices, process technology and characterization

📅 Fri. Sep 22, 2023 9:00 AM - 12:15 PM JST | Fri. Sep 22, 2023 12:00 AM - 3:15 AM UTC | 🏢 B201 (Civic Auditorium)

[22a-B201-1~12] 13.7 Compound and power devices, process technology and characterization

Kenji Shiojima(Univ. of Fukui)

9:00 AM - 9:15 AM JST | 12:00 AM - 12:15 AM UTC

[22a-B201-1] [Young Scientist Presentation Award Speech] Characterization of recombination center in homoepitaxial GaN with N-atoms-displacement-related defects introduced by electron beam irradiation

○Meguru Endo¹, Masahiro Horita^{1,2}, Jun Suda^{1,2} (1.Nagoya Univ., 2.Nagoya Univ. IMASS)

9:15 AM - 9:30 AM JST | 12:15 AM - 12:30 AM UTC

[22a-B201-2] Wafer-scale characterization of mosaics and the impact on point defects in GaN studied using 2D birefringence and photoluminescence measurements

○Kohei Shima¹, Shigefusa Chichibu¹ (1.IMRAM-Tohoku Univ.)

9:30 AM - 9:45 AM JST | 12:30 AM - 12:45 AM UTC

[22a-B201-3] Photoluminescence spectra of p-GaN epilayers grown by halide vapor phase epitaxy

○Shigefusa Chichibu¹, Kazuki Ohnishi², Shugo Nitta², Yoshio Honda^{2,3}, Hiroshi Amano^{2,3}, Kohei Shima¹ (1.IMRAM-Tohoku Univ., 2.IMASS, Nagoya Univ., 3.Nagoya Univ.)

9:45 AM - 10:00 AM JST | 12:45 AM - 1:00 AM UTC

[22a-B201-4] First principles study on impacts of Mg agglomeration on Mg acceptor states in GaN

○Emi Kano¹, Chokawa Kenta¹, Kobayashi Koki¹, Otsuki Ritsuo¹, Shiraishi Kenji¹, Oshiyama Atsushi¹, Ikarashi Nobuyuki¹ (1.Nagoya Univ.)

◆ Presentation by Applicant for JSAP Young Scientists Presentation Award

10:00 AM - 10:15 AM JST | 1:00 AM - 1:15 AM UTC

[22a-B201-5] Electrical characterization of semi-insulating GaN substrates doped with Fe, C or Mn grown by hydride vapor phase epitaxy

○Daiki Tanaka¹, Kenji Iso^{2,3}, Jun Suda^{1,3} (1.Nagoya Univ., 2.Mitsubishi Chemical, 3.Nagoya Univ. IMASS)

◆ Presentation by Applicant for JSAP Young Scientists Presentation Award

10:15 AM - 10:30 AM JST | 1:15 AM - 1:30 AM UTC

[22a-B201-6] Relationship between Transistor Parameters and Circuit Parameters in GaN HEMTs (Device Simulation Study)

○(M2)Hisashi Nishijima¹, Ken Kudara², Yutaro Yamaguchi², Toshiyuki oishi¹, Shitaro Shinjo², Koji Yamanaka² (1.Saga Univ., 2.Mitubishi Electric)

10:45 AM - 11:00 AM JST | 1:45 AM - 2:00 AM UTC

[22a-B201-7] Drain Voltage Dependence of Low-frequency Y21 and Y22 signals in GaN HEMTs

○Toshiyuki Oishi¹, Shiori Takada¹, Ken Kudara², Yutaro Yamaguchi², Shitaro Shinjo², Koji Yamanaka² (1.Saga Univ., 2.Mitsubishi Electric)

11:00 AM - 11:15 AM JST | 2:00 AM - 2:15 AM UTC

[22a-B201-8] Relationship between Trap Positions in GaN HEMTs and $\text{Im}(Y_{21})/\text{Im}(Y_{22})$ (Device Simulation)

○Toshiyuki Oishi¹, Shogo Morokuma¹, Ken Kudara², Yutaro Yamaguchi², Shitaro Shinjo², Koji Yamanaka² (1.Saga Univ., 2.Mitsubishi Electric)

◆ Presentation by Applicant for JSAP Young Scientists Presentation Award

11:15 AM - 11:30 AM JST | 2:15 AM - 2:30 AM UTC

[22a-B201-9] Simultaneous Evaluation of Trap and RF Characteristics for GaN HEMTs *in Transistor Operations using Frequency Dependence of S-parameters*

○(M1)Shinki Tsuyama¹, Ken Kudara², Yutaro Yamaguchi², Toshiyuki Oishi¹, Shintaro Shinjo², Koji Yamanaka² (1.Saga Univ., 2.Mitsubishi Electric)

◆ Presentation by Applicant for JSAP Young Scientists Presentation Award

11:30 AM - 11:45 AM JST | 2:30 AM - 2:45 AM UTC

[22a-B201-10] Thermal transient analysis of GaN HEMT under modulated operation using measured temperature characteristics

○Shunsuke Ito¹, Yoichi Tsuchiya¹, Atsushi Tanaka², Tadatomo Suga³, Akio Wakejima¹ (1.Nagoya Inst., 2.Nagoya Univ., 3.Meisei Univ.)

11:45 AM - 12:00 PM JST | 2:45 AM - 3:00 AM UTC

[22a-B201-11] Failure Process of GaN-HEMTs by Overvoltage Stress

○Wataru Saito¹, Shin-ichi Nishizawa¹ (1.Kyushu Univ.)

12:00 PM - 12:15 PM JST | 3:00 AM - 3:15 AM UTC

[22a-B201-12] Low frequency noise measurement of 2DEG at AlGaIn/GaN interface with different contacts

○Kosuke Ueda¹, Koshi Katakura, Takuya Hoshii¹, Kazuo Tsutsui², Hitoshi Wakabayashi², Kuniyuki Kakushima¹ (1.Tokyo Tech School of Eng, 2.Tokyo Tech IIR)

電子線照射により窒素変位関連欠陥を選択的に導入した ホモエピタキシャル成長 GaN 中の再結合中心の評価 Characterization of recombination center in homoepitaxial GaN with N-atoms-displacement-related defects introduced by electron beam irradiation

名大院工¹, 名大未来研², [○]遠藤慧¹, 堀田昌宏^{1,2}, 須田淳^{1,2}

Nagoya Univ.¹, Nagoya Univ. IMaSS², [○]Meguru Endo¹, Masahiro Horita^{1,2}, Jun Suda^{1,2}

E-mail: endo.meguru.n8@s.mail.nagoya-u.ac.jp

窒化ガリウム(GaN)デバイス作製プロセスにおいて GaN 結晶中に様々な点欠陥が導入され、デバイス特性に悪影響を及ぼすことから、点欠陥が形成する深い準位について理解することは重要である。これまでに我々は、電子線照射を用いて窒素(N)変位(V_N , N_i)関連欠陥を選択的に導入し、DLTS 測定により評価することで、N 原子変位関連欠陥により形成される伝導帯および価電子帯から 1 eV 以内の電子トラップおよび正孔トラップを報告してきた[1-3]。一方で、N 変位関連欠陥が再結合中心として働くかどうかを系統的に評価した報告はない。再結合中心の評価手法の一つに、p-n 接合ダイオードの順方向 I-V 特性の(空乏層内)再結合電流成分の解析がある。本研究では、137 keV の電子線照射により N 変位関連欠陥のみを GaN 中に導入したホモエピタキシャル成長 GaN p⁺-n 接合および p-n⁺接合ダイオードを作製し、その順方向 I-V 特性の再結合電流成分を解析することで、n-GaN および p-GaN 中の再結合中心について評価した。

実験には、n 型 GaN 自立基板上に MOVPE 法により成長した GaN p⁺-n 接合ダイオード(p 層 Mg 濃度 $5 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$, n 層 Si 濃度 $5 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$)および p-n⁺接合ダイオード(p 層 Mg 濃度 $2 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$, n 層 Si 濃度 $5 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$)を用いた。p 層オーミック電極形成後、GaN 表面での照射エネルギーを 137 keV, フルエンスを $4.7 \times 10^{15} \sim 4.6 \times 10^{17} \text{ cm}^{-2}$ とし、電子線照射を行った。Fig. 1 に各 p-n 接合ダイオードのフルエンス $1.9 \times 10^{16} \text{ cm}^{-2}$ で電子線照射を行った前後の室温における順方向 I-V 特性および n 値を示す。p⁺-n 接合および p-n⁺接合ダイオードともに約 2~2.5 V の範囲で $n \sim 2$ であり、空乏層内での再結合電流が支配的であることがわかる。n ~ 2 の領域において、電子線照射に伴い再結合電流が増大していることから、電子線照射に起因した再結合中心が生成されていることがわかる。再結合電流成分 J_{SRH} は、再結合中心密度 N_T , 電子・正孔の捕獲断面積および熱速度 σ_n , σ_p , $v_{th,n}$, $v_{th,p}$ を用いて、 $J_{SRH} = \pi n_i kT (v_{th,n} v_{th,p})^{1/2} / 2E_0 \times N_T (\sigma_n \sigma_p)^{1/2} \times \exp(eV/2kT)$ と表すことができる[4]。 E_0 は再結合中心での再結合レートが最大となる位置における電界強度である。この式を用いて再結合電流を計算し、順方向 I-V 特性の実験値にフィッティングすることにより、再結合中心に関する値である $N_T (\sigma_n \sigma_p)^{1/2}$ を求めることができる。Fig. 2 に n-GaN 中および p-GaN 中の支配的な再結合中心の $N_T (\sigma_n \sigma_p)^{1/2}$ のフルエンス依存性を示す。n-GaN, p-GaN とともにフルエンスの増加とともに線形に増加している。 σ_n , σ_p が一定であると仮定すれば、電子線照射により導入された N 変位関連欠陥の密度は線形に増加し、さらに支配的な再結合中心として働いていることを示唆している。以上より、GaN 中の N 変位関連欠陥は n-GaN および p-GaN のどちらの結晶中においても再結合中心として働く欠陥を形成することがわかった。

[1] M. Horita, *et al.*, Appl. Phys. Express **13**, 071007 (2020). [2] M. Endo, *et al.*, Appl. Phys. Lett. **120**, 142104 (2022).

[3] M. Endo, *et al.*, IWN2022, AT173 (2022). [4] T. Maeda, *et al.*, JJAP **58** SCCB14 (2019).

【謝辞】本研究は、文部科学省「革新的パワーエレクトロニクス創出基盤技術研究開発事業」JPJ009777 の助成を受けたものです。

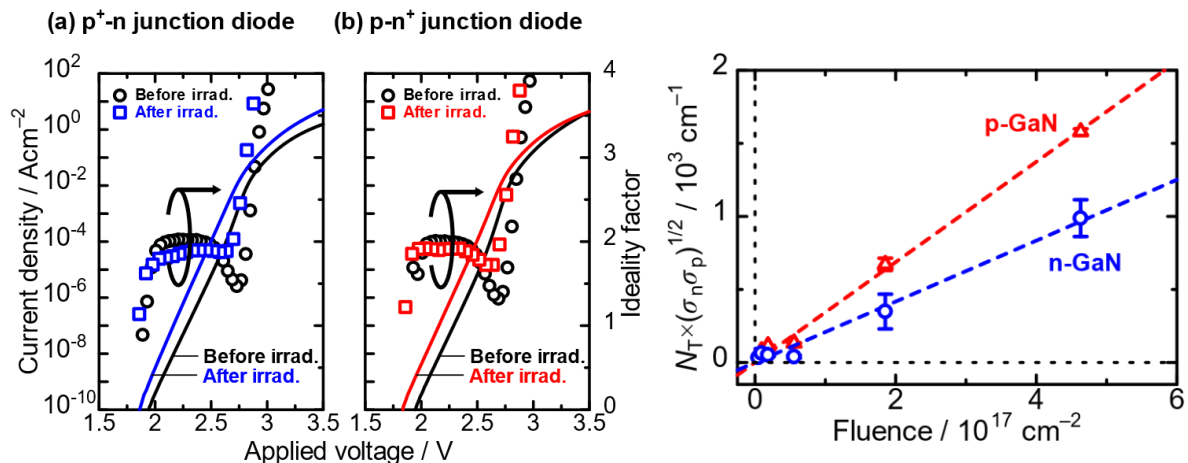


Fig. 1. Forward I-V characteristics of the GaN p-n junction diode at room temperature.

Fig. 2. The value of $N_T (\sigma_n \sigma_p)^{1/2}$ as a function of fluence of electron beam irradiation.

二次元複屈折およびフォトルミネッセンス測定による GaN ウエハの結晶モザイクと点欠陥の評価

Wafer-scale characterization of mosaics and the impact on point defects in GaN
studied using 2D birefringence and photoluminescence measurements

東北大多元研 °嶋紘平, 秩父重英

IMRAM-Tohoku Univ. °K. Shima and S. F. Chichibu

E-mail: kshima@tohoku.ac.jp

高周波動作が可能な縦型 GaN MOS パワーデバイス[1]を実現するためには、反りが無く貫通転位密度も低いモザイクフリーGaN 基板が必要である。ハイドライド気相エピタキシャル成長 (HVPE)法[2]は、大口径かつ比較的貫通転位密度が低い GaN を成長できるため、現在市販されている GaN 基板は HVPE 法によるものが殆どである。他方、電流縦流しデバイスの性能向上には、貫通転位や積層欠陥等の密度をウエハ全域で低下させる必要がある。非破壊で結晶モザイクを評価可能な手法として、X 線回折法[3]、ルミネッセンス法[4,5]、ラマン分光法[6]、複屈折法[7]等が挙げられる。本研究では、非破壊かつ高速に結晶モザイクのトポグラフィー像を取得可能な二次元複屈折評価システムを用いて GaN 基板の結晶モザイクをウエハスケールで評価した。さらに、結晶モザイクが空孔型欠陥[8]の取り込みに与える影響をフォトルミネッセンス(PL)法等により評価した結果を報告する。

2 インチ直径の HVPE GaN 基板に対して、二次元複屈折(Photonic Lattice, Inc., PA-300-L)および PL 測定を行った。図 1(a)に示すように、結晶モザイクに起因すると考えられる複屈折のリタデーション量(屈折率差とウエハ厚の積)のトポグラフィー像が明瞭に取得された。リタデーション量が小さい GaN ウエハの方が、室温におけるバンド端および深い準位の PL 強度が数倍高かった(図 2(b))。n 型 GaN において非輻射再結合中心として働く Ga 空孔と N 空孔の複空孔($V_{Ga}V_N$ [8])の濃度が、結晶モザイクが少ないウエハの方が低かったものと考えられる。講演では X 線回折測定および時間分解 PL 測定等の結果とも比較する。

PL 測定を補助して頂いた向田彰氏、GaN ウエハを提供して頂いた(株)サンリック、二次元複屈折測定を実施して頂いた(株)フォトリックラティスに感謝致します。本研究の一部は、人と知と物質で未来を創るクロスオーバーアライアンス/MEXT 等の助成を受けた。

[1] Pearton 他 JAP **86**, 1 (1999). [2] 元木他 JJAP **40**, L140 (2001). [3] Lou 他 CrystEngComm **20**, 2861 (2018). [4] 谷川他 APEX **11**, 031004 (2018). [5] Yi 他 APEX **12**, 051005 (2019). [6] 小久保他 APEX **11**, 061002 (2018). [7] 田中他 PSSB **257**, 1900553 (2020). [8] 秩父他, APL **86**, 021914 (2005); JAP **123**, 161413 (2018).

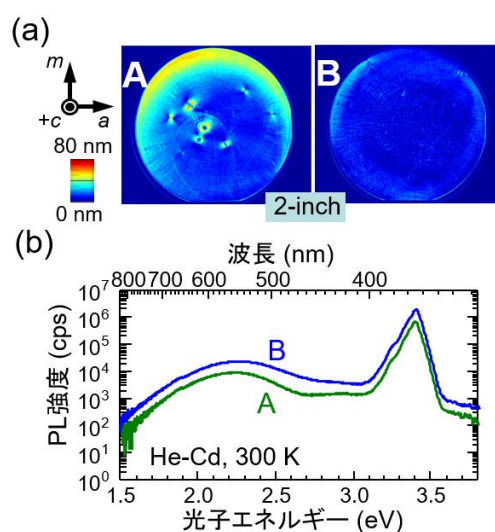


Fig. 1. (a) Topographic images of retardation of 2-inch-diameter HVPE GaN wafers (labeled as A and B) measured by the 2D birefringence method. (b) PL spectra at 300 K from the centers of the two GaN wafers.

HVPE 成長 Mg 添加 p 型 GaN のフォトルミネッセンススペクトル

Photoluminescence spectra of p-GaN epilayers grown by halide vapor phase epitaxy

東北大多元研¹, 名大 ImaSS², 名大高等研究院³

○秩父重英¹, 大西一生², 新田州吾², 本田善央^{2,3}, 天野浩^{2,3}, 嶋紘平¹

Tohoku Univ.¹, Nagoya Univ.^{2,3}

○S. F. Chichibu¹, K. Ohnisi², S. Nitta², Y. Honda^{2,3}, H. Amano^{2,3}, and K. Shima¹

E-mail: chichibulab@yahoo.co.jp

【はじめに】縦型 GaN パワーデバイス実用化に必要な要素部品として、反りが無く貫通転位(TD)密度も低いモザイクフリー導電性 GaN 基板、制御された低キャリア濃度 n 型ドリフト層、イオン注入による p, n 型セグメント、GaN との界面まで含めた良好な絶縁膜等が挙げられる。ドリフト層に用いる高耐圧 n 型層の形成には有機金属気相エピタキシャル成長(MOVPE)法が広く使用されているが、エピ膜の炭素濃度と成長速度はトレードオフの関係にあり、高耐圧厚膜ドリフト層の成長には原料分子に炭素を含まないハライド気相エピタキシャル成長(HVPE)法が適している。これまでに、HVPE 法を用いた超高純度無添加 GaN[1]や n-GaN 層の成長、および MgO 原料を用いた Mg 添加 p-GaN (p-GaN:Mg) 成長[2]、再成長を用いない連続成長による pn 接合の形成[3]等が報告されている。本講演では、HVPE 成長 p-GaN:Mg のフォトルミネッセンス(PL)測定結果を MOVPE 成長 p-GaN:Mg の結果[4]と比較し、現状と課題について吟味する。

【内容】MgO 原料上に HCl を流すことにより MgCl_2 ドーピング源を合成し、c 面サファイア基板 (Fig.1 左端のみ GaN 基板) 上に HVPE 成長させた p-GaN:Mg の弱励起定常 PL および時間分解 PL 測定を行った。Fig.1 に示すように、 Mg_{Ga} アクセプタに起因する紫外発光(UVL)帯[5]および p-GaN に特徴的な青色発光(BL)帯が観測されており、電気特性評価結果[2]と矛盾しない。低温における UVL 強度と室温におけるバンド端領域の発光強度 (及び寿命) は[Mg]増加に従い減少した。いずれも広義にはバンド端に付随する発光であるため、非輻射再結合中心(NRC)濃度が増加したと考えられる。本試料群の炭素濃度は $3 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ 未満であるため、内因性の NRC すなわち Ga 空孔 (V_{Ga})と N 空孔(V_{N})の空孔クラスターである $V_{\text{Ga}}(V_{\text{N}})_2$ [4]の濃度増加によるものと考えられる。

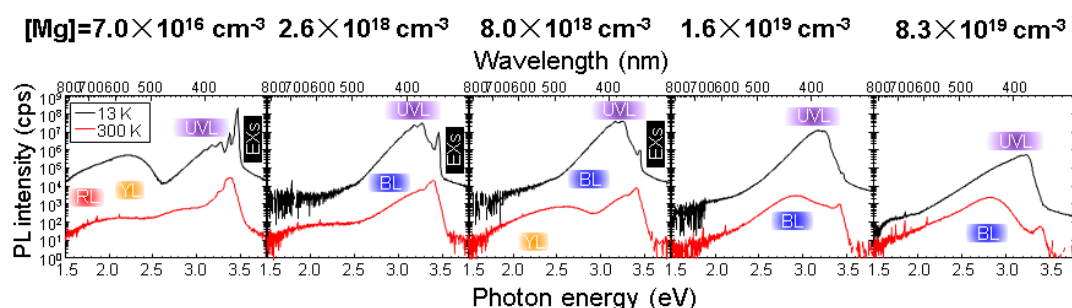


Fig. 1 Photoluminescence spectra of Mg-doped p-GaN / (0001) sapphire grown by HVPE.

【謝辞】文科省革新ハウェア(JPJ009777)、クロスオーバーアライアンス、科研費(23K13672)等の援助を受けた。

【文献】[1]藤倉他 JJAP **56**, 085503 (2017); APL **117**, 012103 (2020). [2]大西他 APEX **13**, 061007 (2020); JCG **566**, 126173 (2021). [3]大西他 APL **119**, 152102 (2021). [4]秩父他 APL **112**, 211901 (2018). [5] Reshchikov and Morkoç, JAP **97**, 061301 (2005).

GaN 結晶中の Mg 凝集が Mg アクセプタの電子状態に与える影響の 第一原理計算を用いた評価

First principles study on impacts of Mg agglomeration on Mg acceptor states in GaN

名古屋大, °狩野絵美, 長川健太, 小林功季, 大築立旺, 白石賢二, 押山淳, 五十嵐信行

Nagoya Univ, °E. Kano, K. Chokawa, K. Kobayashi, R. Otsuki, K. Shiraishi, A. Oshiyama, N.

Ikarashi

E-mail: kano@imass.nagoya-u.ac.jp

【はじめに】Mg イオン注入による GaN の p 型ドーピングでは、Mg の偏析により、局所的に Mg 濃度が 1 at% を越える領域が形成される。^[1] 1 at% での Mg_{Ga} 間の平均距離は 0.6 nm である。高濃度の偏析は、アクセプタ (Mg_{Ga}) のエネルギー準位に影響を与える可能性があるが、^[2] Mg_{Ga} が近接して存在する場合のエネルギー準位に関する報告はない。Mg のアクセプタ準位には、わずかにエネルギーの異なる、局在準位と非局在準位が存在する可能性が報告されており、^[3] 後者のエネルギーは Mg_{Ga} 間距離が小さくなると変化する可能性がある。

本講演では、非局在性のアクセプタ準位について、 Mg_{Ga} 間の距離がそのエネルギーや局在性に与える影響を、第一原理計算を用いて調査した結果について報告する。

【モデルと計算手法】計算に用いた GaN supercell の大きさは $7 \times 7 \times 4$ であり、 Mg_{Ga} 近傍の対称性は Mg 置換前と同一である。この構造では、非局在の浅い準位が形成されると報告されている。^[4] Supercell の中で二つの Mg_{Ga} を a 軸方向に配置して計算を行った。比較のため、 Mg_{Ga} を一つのみ導入した構造についても計算を行った (Mg_{Ga} 間距離 22.7 Å)。計算には VASP を使用した。^[5] 本計算でのバンドギャップは 1.6 eV である。

【結果と考察】価電子帯頂上近傍の軌道のエネルギーの計算結果を Fig. 1(a) に示す。価電子帯頂上の 3 つの軌道は、主として N 2p 軌道で形成されており、このうちエネルギーの高い軌道が非占有軌道となる。これらの軌道のエネルギーは、 Mg_{Ga} 間距離 22.7 Å と 9.7 Å の計算結果では、顕著な違いは見られない。しかし、 Mg_{Ga} 間距離が 9.7 Å 以下では、これらのエネルギーが距離とともに上昇した。

価電子帯頂上の波動関数の空間分布を Fig. 1(b), (c) に示す。 Mg_{Ga} 間の距離が 22.7 Å の場合 (Fig. 1(b))、波動関数は supercell を越えて広がっているが、 Mg_{Ga} 間の距離が 3.2 Å の場合 (Fig. 1(c))、波動関数が Mg_{Ga} 近傍に局在していた。以上の結果は、Mg 濃度 1 at% を越える凝集では、 Mg_{Ga} が近接して存在する影響により、非占有軌道のエネルギー上昇や、局在化が起きる可能性を示しており、これらは、アクセプタの活性化等に影響を与える可能性があると考えられる。

[1] Kano, JAP 132, 065703 (2022), [2] Brochen, APL 103, 032102 (2013), [3] Sun, PRB 90, 165301 (2014). [4] Lany, APL 96, 142114 (2010). [5] Kresse et al., Phys. Rev. B 54, 11169 (1996)

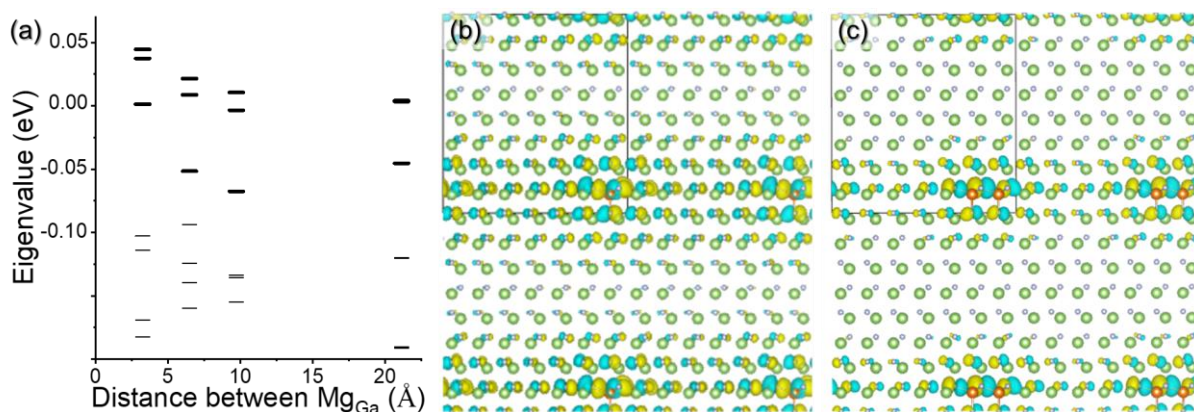


Fig. 1 (a) Eigenvalues of states at the valence band maximum. Top three bars indicate states consist mainly of N 2p states. (b), (c) The isosurface of wave function for the state with the highest eigenvalue with Mg_{Ga} distance of (b) 22.7 Å and (c) 3.2 Å. Blue and yellow shows plus and minus wave functions, respectively. Orange, green, and violet balls show Mg, Ga, and N atoms, respectively. The square shows supercell.

HVPE 法で作製した Fe, C, Mn ドープ 半絶縁性 GaN 基板の電気的特性評価

Electrical characterization of semi-insulating GaN substrates doped with Fe, C or Mn
grown by hydride vapor phase epitaxy

名大院工¹, 三菱ケミカル², 名大未来研³ ○田中 大貴¹, 磯 憲司^{2,3}, 須田 淳^{1,3}

Nagoya Univ.¹, Mitsubishi Chemical², Nagoya Univ. IMASS³,

Daiki Tanaka¹, Kenji Iso^{2,3}, and Jun Suda^{1,3}

E-mail: tanaka.daiki.j6@s.mail.nagoya-u.ac.jp

GaN 系高電子移動度トランジスタ (HEMT) は, 5G・6G を実現する高周波増幅器として期待されている. HEMT の更なる高性能化に向け, 近年 GaN 基板上 HEMT が注目されている.

一般に HEMT では絶縁性基板が用いられる. GaN の場合, 残留ドナーによる n 型伝導を深いアクセプタ準位で補償した半絶縁性基板が使用される. 補償ドーパントとして, これまでに鉄 (Fe) や炭素 (C), マンガン (Mn) が報告されている. Fe や C ドープ GaN については, Hall 効果測定によりその電気的特性を詳細に調べた報告が多数存在する一方, Mn ドープ GaN については報告例が少なく, 電気的特性が未解明である. 本研究では, Fe, C, Mn を様々な濃度でドーピングした半絶縁性 GaN 基板を作製し, Hall 効果測定により電気的特性を評価したので報告する.

半絶縁性 GaN 基板は三菱ケミカルにてハイドライド気相成長法 (HVPE 法) により作製した. 貫通転位密度が約 $8.0 \times 10^5 \text{ cm}^{-2}$ の HVPE 成長 n 型 GaN 種基板上に半絶縁性 GaN 層を 400 μm 成長した後, 研削研磨により種結晶を完全に除去し, 厚さ 300 μm の半絶縁性 GaN 基板を得た. 得られた基板を 6 mm 角の正方形に切り分け, 四隅に Ti/Au 電極を蒸着することで Hall 効果素子を作製した.

図 1 は作製した全試料の抵抗率の温度依存性である. 測定した温度範囲 (300–800 K) では, Mn ドープ試料が最も高い抵抗率を示した. Hall 効果測定の結果, Fe ドープ試料は n 型, C ドープと高 Mn ドープ試料は p 型を示した. キャリア濃度の温度依存性の解析から, Fe は $E_c - (0.59-0.61) \text{ eV}$, C は $E_v + (0.90-1.07) \text{ eV}$, Mn は $E_v + 1.55 \text{ eV}$ 付近にアクセプタ準位を形成していることが分かった. Mn ドープ試料では, Mn のアクセプタ準位が GaN のミッドギャップ付近にあることに起因して, Hall 係数の正負が逆転する現象を観測した. 得られた知見を基に, 半絶縁性 GaN 基板のドーパントごとにドーピング濃度と 800 K での抵抗率の関係を計算した (図 2). 残留ドナー密度に応じて Mn を適量ドーピングすることで, 800 K でも $10^7 \Omega \text{ cm}$ 以上の抵抗率を有する GaN 基板が作製可能であることを明らかにした. 高温でも高い絶縁性を維持する半絶縁性 GaN のドーパントとして Mn が最適であり, 高温エレクトロニクスなどへの応用が今後期待される.

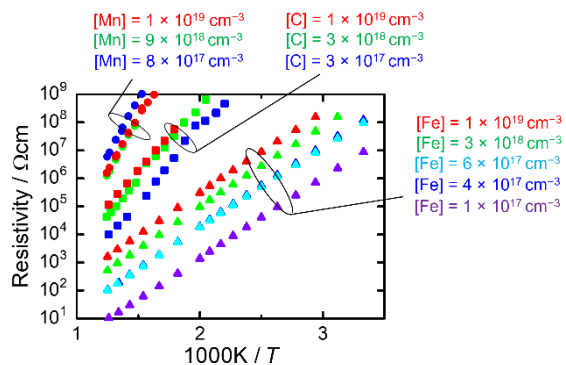


Fig. 1. 半絶縁性 GaN 基板の抵抗率の温度依存性.

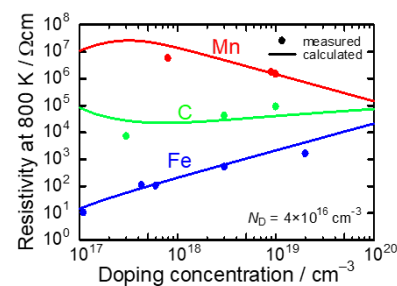


Fig. 2. 800 K における半絶縁性 GaN 基板の抵抗率のドーパントおよびドーピング濃度依存性.

GaN HEMT の DC パラメータがトラップ特性(低周波 Y_{22})に与える影響(デバイスシミュレーションによる検討)

Effects of Transistor DC Parameters on Trap Characteristics (Low-frequency Y_{22}) in GaN HEMTs (Device Simulation Study)

西嶋 尚^{*1} 久樂 顕^{*2} 山口 裕太郎^{*2} 大石 敏之^{*1} 新庄 真太郎^{*2} 山中 宏治^{*2}
Hisashi Nishijima Ken Kudara Yutaro Yamaguchi Toshiyuki Oishi Shitaro Shinjo and Koji Yamanaka

^{*1} 佐賀大学
Saga University

^{*2} 三菱電機株式会社
Mitsubishi Electric Corporation

1. はじめに

GaN 半導体の優れた材料物性（高絶縁破壊電界強度、高電子速度など）を利用した GaN 電子デバイスは高出力高周波分野だけでなく、パワーデバイス分野にも応用されている。電子デバイスを用いた回路やモジュールを作製するためには高精度な回路モデルが必要で、トラップの性質を精度よく取込むことが重要となる。回路モデルはバイアス毎の回路網パラメータで表現される。我々は GaN HEMT における GaN（バルク）中の Fe トラップと Y パラメータの関連性について検討している。これまで、デバイスシミュレーションを用いて、 Y_{22} 虚部の大きさがトラップの電荷の変化量を表すことを示した[1]。今回、DC パラメータと Y_{22} 、 Y_{21} の実部虚部との関連性をデバイスシミュレーションで検討したので、報告する。

2. デバイス構造とシミュレーション方法

図 1 に GaN HEMT のシミュレーション構造を示す。SiC 基板上に GaN 層と AlGaIn 層を設け、その上にソース、ドレイン、ゲート電極を置いた。Y パラメータは、ソースを接地し、ゲートをポート 1、ドレインをポート 2 とした。トラップは GaN 層中に入れ、活性化エネルギー 0.68 eV、捕獲断面積 $3.5\text{E-}14\text{ cm}^2$ とした。まず、DC 特性と Y パラメータの実測を再現するパラメータを決めた。その後、 $\pm 10\%$ となる範囲で電子移動度、飽和速度、ゲートショットキー電極の仕事関数、AlGaIn/GaN 分極を変化させ、DC 特性、Y パラメータを計算した。また、自己発熱を考慮した。なお、シミュレーションはシルバコ社の ATLAS を用いた。

3. シミュレーション結果と考察

図 2 に Y_{22} 実部と虚部の周波数依存性について、実測

とシミュレーション結果の比較を示す。低周波における Y_{22} は GaN 層中の Fe トラップが応答することが分かっている。 Y_{22} 虚部には 4 kHz 付近に Fe トラップに関連するピークが観察される。また、 Y_{22} 実部では単調に増加する傾向がシミュレーションにより再現できている。

図 2 のシミュレーションパラメータを基準とし、DC 特性と Y パラメータを計算、相関関係を調べた。図 3 は Y_{22} 虚部の Fe トラップピーク周波数と DC 電力（ドレイン電流とドレイン電圧の積）の関係を示す。今回、計算したパラメータのいずれでも同じ相関関係を持つことがわかる。DC 電力が増加すると自己発熱効果が増加、内部の格子温度が上昇する。このため、見かけ上の活性化エネルギーが減少し、対応するピーク周波数が増加（トラップの時定数が減少）したと考えられる。また、 Y_{21} 虚部のピーク周波数においても同様な傾向が見られた。さらに Y_{22} 実部はドレインコンダクタンス、 Y_{21} 実部は相互コンダクタンスにトラップの影響が加わっている。

4. まとめ

GaN HEMT の DC パラメータを変化させ、DC 特性と Y パラメータを計算し、その関連性について検討した。その結果、DC パラメータは自己発熱による内部温度の上昇を通して、トラップの時定数に影響することがわかった。熱回路とトラップ回路を関連つけるモデルにより精度の高い回路性能予測が可能であると考えられる。

参考文献

1. 諸隈他、信学会研究会 ED2022-91、2023.01.27, pp.29-32.

謝辞

本研究は JSPS 科研費 JP21K04139 の助成を受けたものです。

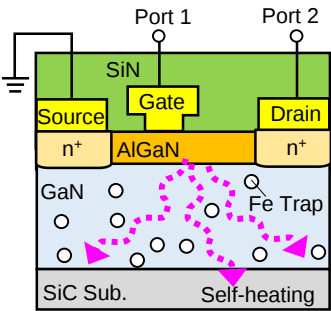


Fig.1 Simulated GaN HEMT structure.

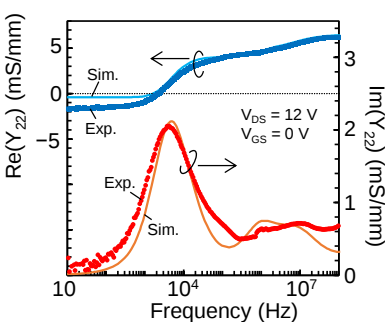


Fig.2 Comparison between simulation and experimental results.

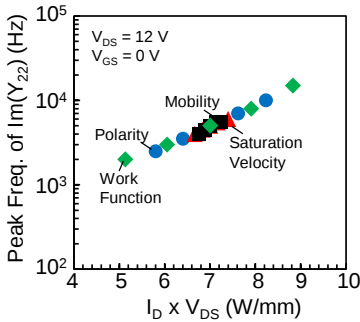


Fig.3 Relationship between peak frequency of $\text{Im}(Y_{22})$ and DC power.

GaN HEMT 中のトラップ位置と低周波 Y_{21}/Y_{22} 虚部の関係 (デバイスシミュレーションによる検討)

Relationship between Trap Positions in GaN HEMTs and $\text{Im}(Y_{21})/\text{Im}(Y_{22})$ (Device Simulation)

大石 敏之*¹ 諸隈 奨吾*¹ 久樂 顕*² 山口 裕太郎*² 新庄 真太郎*² 山中 宏治*²
Toshiyuki Oishi Shogo Morokuma Ken Kudara Yutaro Yamaguchi Shintaro Shinjo and Koji Yamanaka

*1 佐賀大学

Saga University

*2 三菱電機株式会社

Mitsubishi Electric Corporation

1. はじめに

GaN HEMT (High Electron Mobility Transistor) は、窒化物半導体を持つ優れた材料物性を利用した高周波高出力/パワートランジスタとして使われている。デバイス内部にはトラップが存在し、電気的特性に影響を与えるため、その挙動を解析することが重要な課題のひとつである。我々は等価回路を構築しやすい二端子対回路パラメータを測定することで、トラップを評価する研究を進めている。これまで、ドレイン電圧変動に対するドレイン電流の変化である Y_{22} を用いて GaN 層中のトラップを評価してきた[1]。今回、 Y_{22} に加えてゲート電圧変動に対するドレイン電流の変化である Y_{21} をデバイスシミュレーションで計算し、トラップの位置が Y_{21} と Y_{22} 虚部に与える影響について検討した。

2. デバイス構造とシミュレーション方法

図 1 にシミュレーションに用いた GaN HEMT の断面構造模式図を示す。SiC 基板上に GaN 層、AlGaIn 層を配置、その上にソース、ゲート、ドレイン電極を設けた。ゲート電極は T 型、 $0.4 \mu\text{m}$ である。今回、トラップの位置による影響を明確にするために、非常に狭い範囲 (4 nm) で、高濃度な ($1\text{E}19 \text{ cm}^{-3}$) 仮想的なアクセプタ型トラップを GaN 層から AlGaIn 層まで深さを変えながら Y_{21} と Y_{22} の周波数依存性を計算した。なお、トラップエネルギーは 0.6 eV 、捕獲断面積は $1\text{E}-14 \text{ cm}^2$ と一定とした。DC バイアスは 2 次元電子ガスが形成されているオン状態 (ゲート電圧 0 V 、ドレイン電圧 10 V) とした。また、トラップによる信号がピークとして現れる Y パラメータ虚部を評価に用いた。さらに、DC バイアスを $\pm 0.1 \text{ V}$ 変化させた電圧 (Y パラメータの入力信号を模擬) でトラップのイオン化濃度を計算、その変化量の積分値 (Δn_0) を計算

した。また、自己発熱は考慮していない。なお、シルバコ社のデバイスシミュレーションを用いた。

3. シミュレーション結果と考察

図 2 にトラップが GaN 層中、または AlGaIn 層中に存在する場合の Y_{21} 、 Y_{22} 虚部の周波数依存性を示す。なお、トラップ A は GaN 層上部から $0.2 \mu\text{m}$ 下、トラップ B は AlGaIn 層上部から $0.015 \mu\text{m}$ 下に配置した。図 2(a) に示すように GaN 層中のトラップによる信号は Y_{21} 、 Y_{22} の両方に明確に観察された。また、ピーク周波数は Y_{21} と Y_{22} で同じである。一方、AlGaIn 層中トラップでは Y_{21} に明瞭な信号が現れるが、 Y_{22} の信号強度は Y_{21} と比べて非常に小さいことがわかる。

図 3 に Y_{21} 、 Y_{22} 虚部の信号強度と Δn_{it} の関係を示す。AlGaN 層中トラップに対する Y_{22} 虚部の信号強度は他に比べて無視できる程度に小さい。また、信号強度が増加すると Δn_{it} も増加している。よって、入力された信号の変化によるトラップの電荷量変化が Y パラメータにおける信号強度となると考えられる。

4. まとめ

デバイスシミュレーションで Y_{22} 、 Y_{21} のトラップ信号とその位置の関係を調べた。その結果、トラップが GaN 層に存在する場合は Y_{21} 、 Y_{22} ともに信号が明瞭に表れるが、AlGaIn 層中では Y_{21} にのみ、明瞭なトラップ信号が現れることがわかった。これから Y_{22} 、 Y_{21} の信号を比較することで、おおよそのトラップ位置がわかると考えられる。

参考文献

1. T. Nishida et. al., Solid-State Electronics 201 p.108589 (2023).

謝辭

本研究は JSPS 科研費 JP21K04139 の助成を受けたものです。

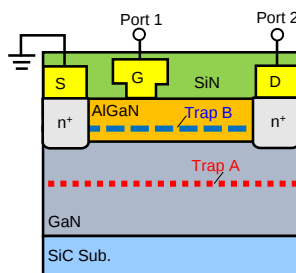


Fig.1 Simulated GaN HEMT structure.

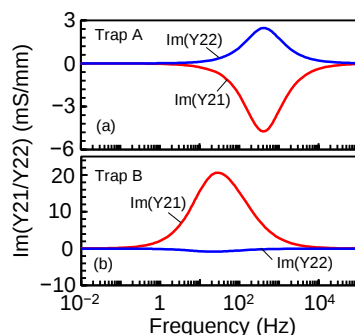


Fig.2 $\text{Im}(Y_{21})$ and $\text{Im}(Y_{22})$ depending on frequency for trap in (a) GaN and (b) AlGaIn layers

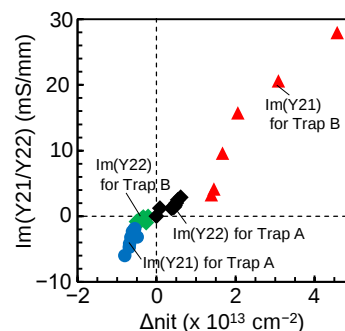


Fig.3 $\text{Im}(Y_{21})$ and $\text{Im}(Y_{22})$ depending on Δn_{it} .

S パラメータの周波数依存性を用いたトランジスタ動作時における GaN HEMT のトラップと RF 特性の同時評価

Simultaneous Evaluation of Trap and RF Characteristics for GaN HEMTs in Transistor Operations using Frequency Dependence of S-parameters

津山 慎樹^{*1} 久樂 顕^{*2} 山口 裕太郎^{*2} 大石 敏之^{*1} 新庄 真太郎^{*2} 山中 宏治^{*2}
Shinki Tsuyama Ken Kudara Yutaro Yamaguchi Toshiyuki Oishi Shitaro Shinjo and Koji Yamanaka

^{*1} 佐賀大学
Saga University
^{*2} 三菱電機株式会社
Mitsubishi Electric Corporation

1. はじめに

GaN 半導体の優れた材料物性（高絶縁破壊電界強度、高電子速度など）を利用した GaN HEMT は高周波・高出力増幅器として実用化されている。今後はシステムの高性能化に伴い、増幅器への要求も複雑となり、精度の高い設計技術が必要となる。これまで、GaN HEMT のトラップを考慮した等価回路モデルにより利得の大きさだけでなく位相特性も実測を再現できることが報告されているが[1]、トラップ特性と RF 特性は別々の方法で評価されることが多い。トラップは低周波でのみ応答し、増幅動作する高周波では応答しない。そこで、二端子対回路網パラメータを低周波から高周波まで測定することで、トラップと GaN HEMT 本体（真性領域）が同時に評価できると考えられる。今回、我々は Hz から GHz オーダーの周波数で S パラメータを測定し、トラップと RF 特性を評価し、ソースフィールドプレート (SFP) の効果について検討したので報告する。

2. 実験方法

図 1 に評価系と GaN HEMT の断面構造模式図を示す。SiC 基板上に GaN 層と AlGaIn 層をエピタキシャル成長し、その上にソース、ドレイン、ゲート電極を形成している。今回、SFP 有無の 2 種類の構造を作製した。二端子対回路網パラメータ (S パラメータ) はベクトルネットワークアナライザ (Keysight, B5061B) を用い、低周波 (10 Hz) から高周波 (3 GHz) まで一度に測定した。今回、トランジスタの動作点として、オン状態 (ゲート電圧 (V_{GS}) 0 V、ドレイン電圧 (V_{DS}) 0 ~ 30 V) を測定した。低周波領域 (10 Hz ~ 100 MHz) の S パラメータは Y パラメータに変換し、 Y_{22} と Y_{21} 虚部を使って、トラップを評価した。高周波領域 (1 ~ 3 GHz) の S パ

ラメータにより利得を算出し、RF 特性を評価した。

3. 実験結果と考察

図 2 に低周波における Y_{21} 虚部の周波数依存性を示す ($V_{DS} = 30$ V)。SFP によりトラップ信号強度が減少していることがわかる。 Y_{22} 虚部の周波数依存性 (図示せず) と比較することで、この信号の減少は表面側のトラップによることがわかった。SFP によりゲート電極端の電界が緩和され、表面側トラップの応答が低減されたと考えられる。

図 3 は高周波における電流利得の周波数依存性を示す ($V_{DS} = 30$ V)。電流利得遮断周波数は SFP により 17.2 から 14.2 GHz に低下した。また、電流利得は SFP により 1.7 dB 低下している。これは SFP によりソース・ドレイン間容量が増加したためと考えられる。さらにデバイスシミュレーションを使うことで、SFP の効果は高い V_{DS} で顕著となることを確認した。

4. まとめ

GaN HEMT の S パラメータを低周波から高周波領域まで測定することで、トランジスタ動作におけるトラップと RF 特性を同時に評価した。その結果、SFP により表面側トラップの影響が低減できるものの電流利得が低下する現象を確認した。

参考文献

1. Y. Yamaguchi et.al., 2018 BCICTS, pp. 48-51.

謝辞

本研究は JSPS 科研費 JP21K04139 の助成を受けたものである。

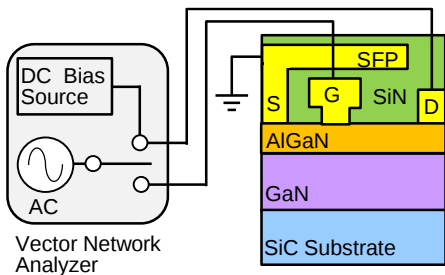


Fig.1 Measurement system and GaN HEMT structure.

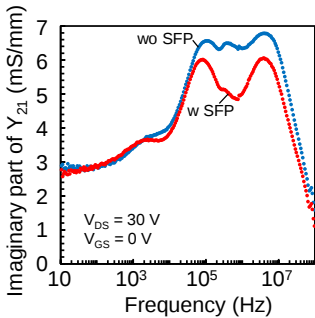


Fig.2 Imaginary part of Y_{21} in low frequency.

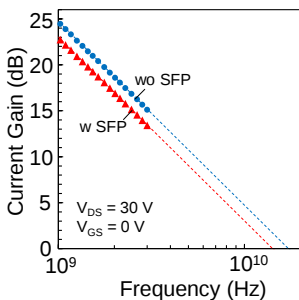


Fig.3 Current gain in high frequency.

GaN HEMT の実測温度特性を用いた変調動作下の熱過渡特性解析

Thermal transient analysis of GaN HEMT under modulated operation using measured temperature characteristics

名古屋工業大学 大学院工学研究¹, 名古屋大学 未来材料・システム研究²,

明星大学 連携研究センター³

°(M2)伊東 俊祐¹, 土屋 洋一¹, 田中 敦之², 須賀 唯知³, 分島 彰男¹

E-mail: s.ito.304@stn.nitech.ac.jp

1. はじめに

高度デジタル変調信号では瞬間的に電力が大きく変化することから、増幅器の温度がその電力の時間変化に応じて変化することが予想されている。そのため、増幅器やトランジスタの動作解析においては、電気特性の時間変化とあわせて、温度の時間変化(過渡温度変化)も重要なパラメータである。しかしながら、トランジスタ増幅器構造は、結晶、電極、絶縁膜などで構成された複雑な構造であることから、熱シミュレーションだけで過渡温度特性を予想することは困難と考えている。これまで、我々は、変調信号を模擬した消費電力が 1 Hz~10 kHz で変化する際の GaN HEMT の表面温度が、周波数が高くなると消費電力変化に追従しなくなることを報告した。[1,2,3] 本発表では、瞬間消費電力下での GaN HEMT の表面温度(実測)から RC 熱回路モデルを作成し、それを用いてランダムに変化する消費電力下での実測温度変化を再現できることを報告する。[4]

2. 熱回路モデリング

試料は CREE 社製 CGH40010 GaN HEMT である。表面温度測定は IR 測定にて行った。輻射率を向上させるために HEMT 表面にカーボンスプレー(黒色)を塗布した。

モデル構築のために、試料に電力オン時間 = 1 sec、オフ時間 = 1 sec、オン時瞬間電力 = 3.7 W のパルス電力を投入し、オン時の温度変化を測定した(図 1 中黒丸)。その結果を Cauer 型の RC 熱回路モデルを用いてフィッティングし(図 1 中赤線)、モデルを完成させた。

実測結果では、 10^{-4} sec 頃に温度が上昇し始め、 10^{-2} sec 頃に一度飽和傾向を示した後、 10^{-1} sec 頃に再び上昇を始めた。このことから、試料には少なくとも 2 つの時定数が存在することが考えられる。実際のフィッティングには 5 段の RC 熱回路を用いた。

図 2 に、ランダムパルス電力消費下(1 kHz:図 2 上部)の実測温度(図 2 下部黒)と、熱回路に同様の消費電力を投入したときのシミュレーション温度(図 2 下部赤)の比較を示す。作成した熱回路モデルは、瞬間的な電力変化に対する実測温度変化を再現できた。

謝辞: 本研究開発は、総務省 SCOPE(JP215006003)の委託を受けたものである。

参考文献: [1] S.Ito et.al., APMC2022 1570823256、[2]伊東俊祐他、第 83 回応物秋季 2022 23p-B204-1、[3]谷口悠高他、IEICE2021 ソサイエティ大会 C-2-9、[4]吉田慎吾他、IEICE 和文誌 C J97-C(12) 456-462, 2014

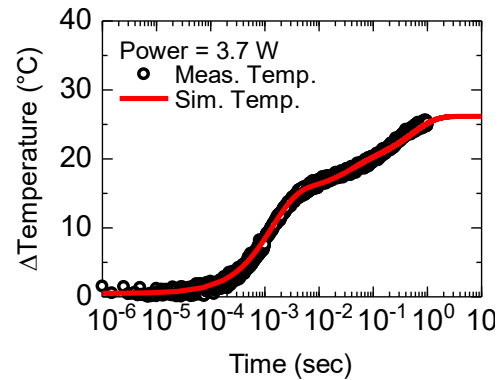


Fig. 1 Measured transient temperature and fitted result using thermal circuit.

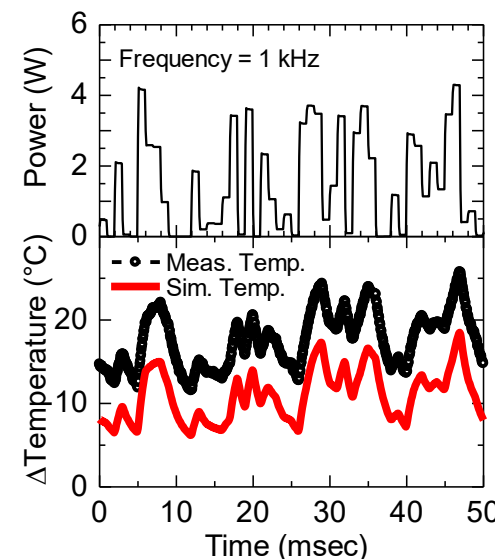


Fig. 2 Transient temperature under 1 kHz pulsed dissipation power.

GaN-HEMT の過電圧印加時破壊過程

Failure Process of GaN-HEMTs by Overvoltage Stress

九大応力研 °齋藤 渉, 西澤 伸一

Kyushu Univ., °Wataru Saito, Shin-ichi Nishizawa

E-mail: wataru3.saito@riam.kyushu-u.ac.jp

【はじめに】 GaN-HEMT は低オン抵抗・高速スイッチングにより高効率な電力変換を実現するパワーデバイスとして、実用化が始まっている。しかし、高電圧印加によりアバランシェ降伏が発生すると、素子が破壊するという問題がある。このため、保証電圧に対して大きな耐圧マージンを持たせた設計が採用され、低オン抵抗化の妨げとなっている。本発表では、繰り返し過電圧ストレス印加試験を行い、過電圧印加時の GaN-HEMT の破壊過程を調べた結果について報告する。

【実験方法】 パワーデバイスのアバランシェ耐量評価に用いられる UIS 試験回路を用いて短時間パルス（～100ns）の過電圧ストレスを印加した。繰り返しストレスは、同一ストレスを周期 40μs 10 回とした。誘導負荷を充電する電流を徐々に増加させることで印加過電圧を増加させ、破壊時の波形をオシロスコープで観測した。加えて、繰り返しストレス印加前後の C_{ds} - V_{ds} 特性の変化も計測した。測定対象素子には、Infineon 製 CoolGaN (IGLD60R070D1、600V/15A) を用いた。

【結果・考察】 同一過電圧ストレスを繰り返し印加することで破壊が発生することを観測した。破壊時の波形の代表例を Fig.1(a)に示す。10 回の繰り返しストレス印加において、6 回目に初期破壊が観測された。破壊後は電圧変化の傾きが変化し、7 回目以降はピーク電圧が低減し、放電電流の通電メカニズム変化がうかがえる。Fig. 1(b)に示すように破壊箇所は D-S 間であった。ストレス印加により C_{ds} が増加し、印加電圧の増加により C_{ds} の減少が観測された。これはアバランシェ降伏により発生したホールがトラップされた後、一部が排出されたと考えられる。これより、ホール排出に伴う欠陥増殖から AlGaIn/GaN 結晶成長層の TDDB 破壊が発生したものと推測される。

謝辞) 本研究は JSPS 科研費 JP23H01469 の助成を受けたものです。

1) T. Kikkawa *et al.*, *Proc. of IRPS*, 6C.1.1-6 (2015)

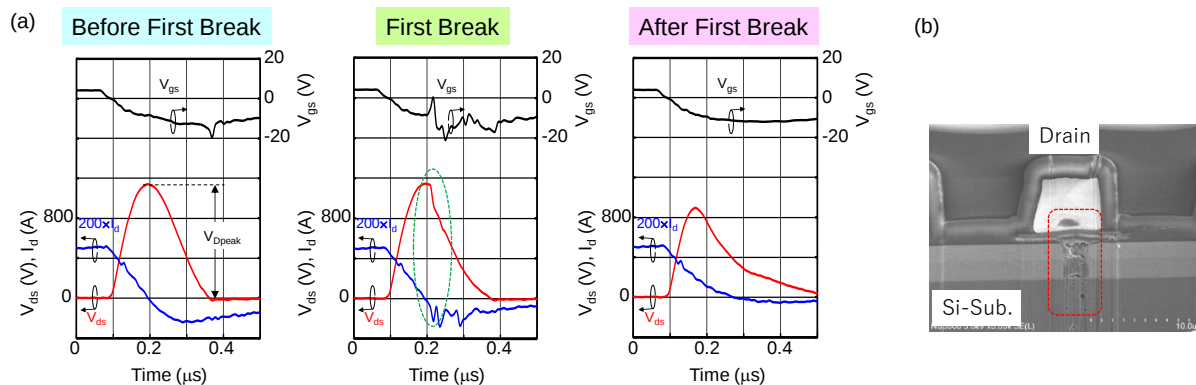


Fig. 1 (a) Change of UIS waveform during burst UIS before and after the first break and (b) a FIB-SEM image of the failure position.

コンタクトの異なる AlGa_{0.22}Ga_{0.78}N/GaN 界面 2DEG の低周波ノイズ測定

Low frequency noise measurement of 2DEG at AlGa_{0.22}Ga_{0.78}N/GaN interface with different contacts

東工大工学院¹, 東工大科学技術創成研究院²

○上田 浩輔¹, 片倉 滉司¹, 星井 拓也¹, 筒井 一生², 若林 整², 角嶋 邦之¹

Tokyo Tech School of Eng.¹, Tokyo Tech IIR², °K. Ueda¹, K. Katakura¹, T. Hoshii¹,

K. Tsutsui², H. Wakabayashi², K. Kakushima¹, E-mail: ueda.k.ar@m.titech.ac.jp

【はじめに】 GaN HEMT は高出力、高効率かつ広帯域の実現が可能である^[1]。GaN HEMT で発生する低周波帯ノイズは高周波帯へのアップコンバートするため抑制する必要がある^[2]。我々は既に GaN HEMT の中で 2DEG とのコンタクト部分に発生するノイズについて報告している^[3]。本報告では 2DEG に直接コンタクトをとったデバイスを新たに作製し、測定したノイズについて報告する。

【測定デバイスと測定系】作成したデバイスを Fig.1 と Fig.2 に示す。試料は GaN(2nm)を保護膜としたバリア層 AlGa_{0.22}Ga_{0.78}N(26nm)の GaN エピタキシャルウエハを用いた。デバイス 2 の n⁺GaN はスパッタリング法により堆積した。

【測定結果】 Fig.3 は電極間距離 30μm、ドレイン電流 20μA/μm の時のノイズの比較を示している。このグラフを見ると、直接コンタクトを行ったデバイス 2 のほうが、バリア層を介したコンタクトと比較して 1 桁程度ノイズが低くなっている。電極間距離依存性などの詳細について当日報告する。

【まとめ】 AlGa_{0.22}Ga_{0.78}N/GaN 界面の 2DEG の低周波ノイズの測定を行った。n⁺GaN で直接 2DEG にコンタクトをとった場合、ノイズを低減することができるということが分かった。

【参考文献】

- [1]秋山 他,SEI テクニカルレビュー, 195, p.23 (2019).
- [2]中澤,” GHz 帯 LC_発振器におけるフリッカーノイズ抑制手法に関する研究” (2010).
- [3]片倉 他, 第 69 回春季応用物理学会, 22a-E302-2,(2022).

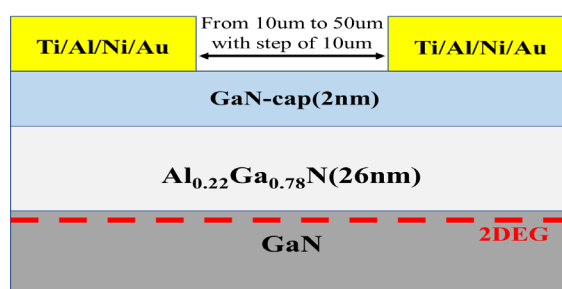


Fig. 1 Structure of device 1(indirect contact)

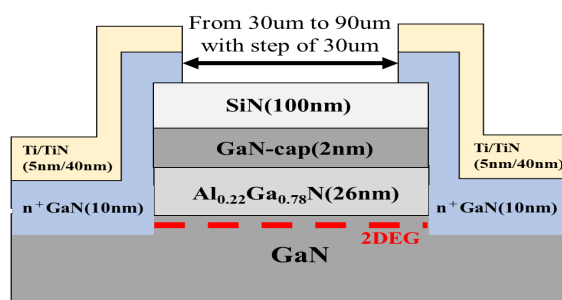


Fig. 2 Structure of device 2(direct contact)

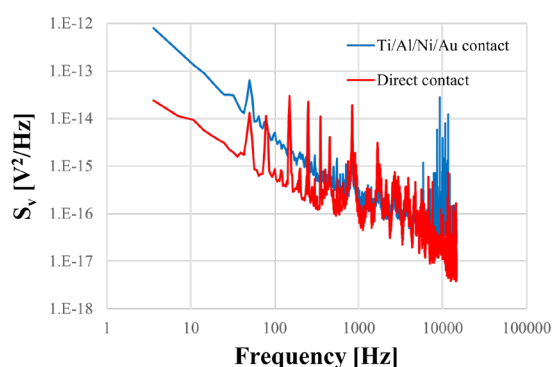


Fig. 3 Comparison of noise between device 1 and 2