

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 5 月 17 日現在

機関番号：13401

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2010～2012

課題番号：22560327

研究課題名（和文） 高温・高周波エレクトロニクスの基礎研究

研究課題名（英文） Study on High-Temperature and High-Frequency Electronic Devices

研究代表者

葛原 正明 (KUZUHARA MASAOKI)

福井大学・工学研究科・教授

研究者番号：20377469

研究成果の概要（和文）：高温・高周波で安定に動作する電子デバイスの実現をめざして、AlGaIn/GaN 絶縁ゲート HEMT (MISHEMT) を作製した。ゲート絶縁膜として、SiN, Al₂O₃, HfO₂, ZrO₂ とそれらの複合膜を広く検討した。試作した ZrO₂/Al₂O₃ 複合絶縁膜をもつ MISHEMT は室温で低いゲートリーク電流 (1×10^{-10} A/mm) を示した。この値は従来の HEMT に比べて約 3 桁低い値であった。ZrO₂/Al₂O₃ 複合絶縁膜 MISHEMT は、デバイス動作温度が室温から 300℃まで上昇しても、ゲートリーク電流の増加が最も小さいことが分かった。また、ZrO₂/Al₂O₃ 複合絶縁膜 MISHEMT は優れた直流特性と安定した界面特性を示した。これらの結果から、今回開発した ZrO₂/Al₂O₃ 複合絶縁膜 MISHEMT が高温・高周波エレクトロニクス応用として相応しいことが明らかとなった。

研究成果の概要（英文）：AlGaIn/GaN MISHEMTs with various dielectric materials, such as SiN, Al₂O₃, HfO₂, and ZrO₂, have been fabricated for stable high temperature operation. The ZrO₂/Al₂O₃ dual dielectric film MISHEMT exhibited a gate leakage current of 1×10^{-10} A/mm at room temperature, which was about 3 orders of magnitude lower than that for the Schottky-gated AlGaIn/GaN HEMT. The amount of increase in the gate leakage current from RT to 300 °C for the ZrO₂/Al₂O₃ dual dielectric film MISHEMT was the lowest among devices fabricated in this work. These results indicate that the proposed ZrO₂/Al₂O₃ dual dielectric film MISHEMT is promising for reducing the gate leakage current at high temperatures.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	1,800,000	540,000	2,340,000
2011年度	1,000,000	300,000	1,300,000
2012年度	600,000	180,000	780,000
年度			
年度			
総計	3,400,000	1,020,000	4,420,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：電子デバイス・電子機器

キーワード：電子デバイス・集積回路

1. 研究開始当初の背景

窒化ガリウム (GaN) を代表とするⅢ族窒化物半導体を用いた電子デバイスが、無線通

信およびパワーエレクトロニクス分野のキーデバイスとして研究開発が活発化している。次世代自動車などの分野では、センサ部

に近接した高温部で動作する高周波増幅器などの電子デバイスが求められている。

2. 研究の目的

高温環境下 (200 °C 以上) において、マイクロ波周波数で動作する無線通信用半導体デバイス実現のための基礎研究を行う。MIS 構造を基本とする窒化物半導体 HEMT を試作し、高温での温度特性評価を通して、電子伝導特性の高温における基礎特性を明らかにする。

3. 研究の方法

窒化物半導体への絶縁膜形成技術の開発、MIS ダイオードの作製と高温での電気特性評価、窒化物半導体 MIS ゲート HEMT の試作と高温におけるデバイス特性評価を行う。以上を通して、高温かつ高周波で動作する窒化物半導体 MIS ゲート HEMT の基礎技術を構築する。

4. 研究成果

本研究で用いた MIS ゲート AlGaIn/GaN HEMT の試作プロセスは以下の通りである。まず、反応性イオンエッチング (BCl₃+Cl₂ 混合ガス) を用いて素子間分離を行う。次に、ソース及びドレイン領域のオーミック電極として、Ti/Al/Mo/Au (15/60/35/50 nm) を蒸着し、短時間熱処理装置を用いて、窒素雰囲気中で 850 °C、30 秒熱処理を行う。BHF 溶液で AlGaIn 表面を洗浄後、ゲート絶縁膜の成膜を行う。成膜した絶縁膜は、表面保護膜の役割も果たしている。ゲート金属として Ni/Au (100/150 nm) を蒸着後、300 °C で 10 分間のポスト熱処理を行う。オーミック電極部分に形成された絶縁膜をエッチング除去することにより MIS ゲート HEMT が完成する。デバイス寸法は、ソースゲート間隔 L_{sg}=2 μm、ゲート長 L_g=2 μm、ゲートドレイン間隔 L_{gd}=5 μm、ゲート幅 W_g=100 μm とした。絶縁膜には原子層堆積 (ALD) 法で形成した Al₂O₃、ZrO₂、HfO₂ を用いた。同時に、これら絶縁膜を組み合わせた複合絶縁膜構造 Al₂O₃/ZrO₂、Al₂O₃/HfO₂、HfO₂/Al₂O₃、HfO₂/ZrO₂、ZrO₂/HfO₂、ZrO₂/Al₂O₃ についても検討した。膜厚は単層膜 4nm、複合膜では 2nm/2nm とした。試作した HEMT の断面構造を図 1 に示す。

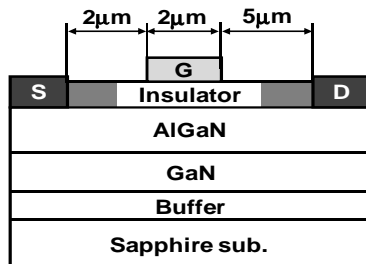


図 1 試作した MIS-HEMT の断面構造

図 2 に単層膜 MIS ダイオードの C-V 特性を示す。飽和容量値を用いて比誘電率を求めると、 $\epsilon_{\text{Al}_2\text{O}_3}=8.3$ 、 $\epsilon_{\text{ZrO}_2}=29.8$ 、 $\epsilon_{\text{HfO}_2}=22.6$ となった。電圧掃引によるヒステリシスは観測されなかった。次に MIS 構造 HEMT の特性について議論する。単層 Al₂O₃ 膜を用いた MIS ゲート HEMT のドレイン I-V 特性においては、室温から 300 °C の環境温度上昇により、ドレイン電流は室温のドレイン電流値の 50% 以上大きく低下した。しきい値電圧は、

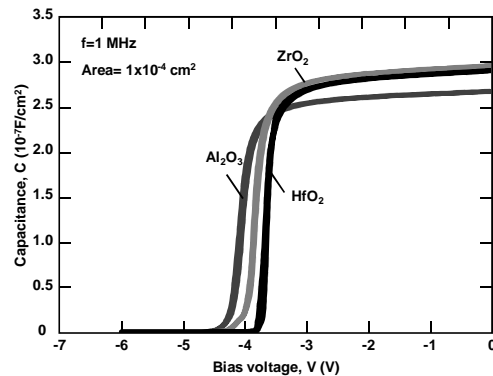


図 2 容量電圧特性

$V_{\text{th}}=-3.7 \text{ V}$ であり、逆バイアス印加 $V_{\text{gd}}=-100 \text{ V}$ でのゲートリーク電流は 10^{-9} A/mm と良好であった。順方向リーク電流は、ZrO₂ や HfO₂ MIS と比べても最も小さく、順方向耐圧も 4.85 V と最も高かった。300 °C においても、C-V 特性のヒステリシスは観察されず良好である。 V_{th} の温度変動は室温から 300 °C で 1.2 V であった。高温時のゲートリーク電流は $V_{\text{gd}}=-40 \text{ V}$ 付近までは 10^{-8} A/mm 程度の増加に留まるが、 $V_{\text{gd}}=-40 \text{ V}$ 以上の高電圧においてリーク電流が急激に上昇した。また絶縁膜の破壊も生じた。

単層 ZrO₂ 膜を用いた MIS HEMT の直流特性には顕著なヒステリシスは見られないものの、逆方向バイアスがストレスとなりドレイン電流の低下現象(コラプス)が生じた。リーク電流については、十分に抑制されており、高電圧側でも 10^{-10} A/mm と低く Al₂O₃ 膜 MIS ゲート HEMT より良好である。また、順方向耐圧は 3.2 V であった。高温 300 °C では、室温時に見られた電流コラプスが観測されなくなる。ゲートリーク電流は、温度上昇に伴い 2 桁増加するが、HfO₂ とほぼ同等の電流値となった。

室温および 300 °C における単層 HfO₂ 膜 MIS ゲート HEMT の直流特性では、ZrO₂ 膜 MIS HEMT と類似した特性が確認された。順方向耐圧は、3.55 V であった。温度上昇による V_{th} の変動は 0.9 V と 3 種類の絶縁膜の中で最も小さく、ショットキーゲート HEMT の V_{th} 変動である $\sim 0.6 \text{ V}$ に近い。

以上の結果をまとめると、単層絶縁膜構造

では、逆方向リーク電流の観点から ZrO_2 や HfO_2 が、特に高温動作において効果的であることが分かった。しかし、 V_{th} のヒステリシスや電流コラプスが生じるため、現状では絶縁膜-半導体間の界面特性が良好であるとは言い難い。一方、 Al_2O_3 膜では、逆方向リーク電流が高温で増加するものの、ヒステリシスは少なく、順方向リークが小さいという利点も有することが明らかとなった。

次に、複合絶縁膜構造 MIS ゲート HEMT の室温および 300°C における直流特性について議論する。 AlGaIn と接する界面側に、 ZrO_2 や HfO_2 を用いると単層構造で見られた電流コラプスが室温において顕著に認められた。一方、 Al_2O_3 を AlGaIn 界面側に用いた 2 層絶縁膜構造には、顕著なコラプスが起らなかった。これより、単層構造でヒステリシスや電流コラプスの観測されない絶縁膜を AlGaIn 界面側に用いることが有効であることが分かった。また、界面側・表面側を問わず Al_2O_3 を用いたデバイスのドレイン電流が大きい傾向にあった。これは、 Al_2O_3 を用いることでシートキャリア濃度が増加したことによるものと考えられる。 300°C では、すべての複合絶縁膜構造デバイスにおいて、ドレイン電流、相互コンダクタンスの熱的低下と V_{th} の温度変動が見られるものの、 V_{th} ヒステリシスは観測されなくなった。 V_{th} の変動も実際には 0.7 V から 1.2 V の間に収まり、2 層絶縁膜構造にしたことによる悪影響は少ないものと考えられる。

次に、複合絶縁膜構造 MIS ゲート HEMT の室温及び 300°C における 2 端子電流リーク特性について述べる。いずれのデバイスも、室温における $V_{gd} = -100\text{ V}$ でのリーク電流は 10^{-10} A/mm 程度であり、絶縁膜種による有意差はない。 300°C において、 Al_2O_3 を用いたデバイスでは、高電界側で波形が乱れ、破壊する例が見られたが、 Al_2O_3 単層構造と比べるとリーク電流に強い ZrO_2 や HfO_2 との組合せにより破壊するデバイス数は僅かであった。一方、 $\text{HfO}_2/\text{ZrO}_2$ と $\text{ZrO}_2/\text{HfO}_2$ の両デバイスにおいては、安定したリーク特性が得られた。

今回試作した複合絶縁膜構造 MIS ゲート HEMT の中で、 300°C でのゲートリーク電流が最も小さかったのは、 $\text{ZrO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ 複合膜であった。図 3 に室温におけるドレイン I-V 特性を示す。最大ドレイン電流は 480 mA/mm であり、しきい値電圧は -3.3 V であった。図 4 に複合絶縁膜 $\text{ZrO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ を用いた MIS ゲート HEMT の 2 端子ゲートリーク電流を示す。 $V_{gd} = -100\text{ V}$ にて測定したリーク電流は、ショットキーゲートをもつ標準 HEMT に比べて約 3 桁小さいことが分かった。今回の実験において得られた主な直流特性と界面特性をまとめて表 1 に示す。表には、複合絶縁膜構

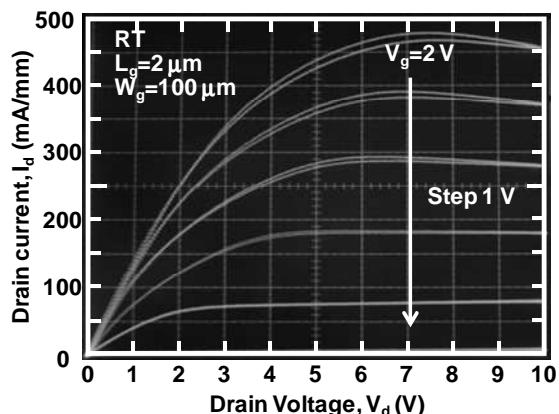


図 3 室温におけるドレイン I-V 特性

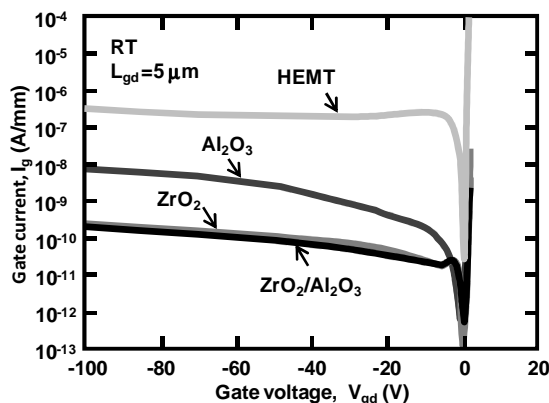


図 4 ゲートリーク電流特性

造に加えて、単層 Al_2O_3 構造、単層 ZrO_2 構造、標準 HEMT についても記載した。 $\text{ZrO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ 複合膜構造と単層 Al_2O_3 構造において、他の構造に比較して高いドレイン電流が得られた。一方、最大相互コンダクタンスについては、構造間で有意な差は認められなかった。複合膜構造と単層 ZrO_2 構造では、 10^{-10} A/mm 程度の低いゲートリーク特性が得られた。サブスレショルド特性においても、複合膜構造と単層 ZrO_2 構造において最良値 71 mV/dec が得られた。一方、C-V 特性から求めた界面準位密度については、単層 Al_2O_3 構造が最良であり、複合膜構造と単層 ZrO_2 構造を比較すると、界面に Al_2O_3 をもつ前者の方が優れていることが分かった。

表 1 主な直流特性と界面特性のまとめ

structure	$I_{d,max}$ (mA/mm)	$G_{m,max}$ (mS/mm)	V_{th} (V)	BV_{ds} (V)	$I_{g,leak}$ (A/mm)	SS (mV/dec)	Dit (cm^{-2})
$\text{ZrO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ (2nm/2nm)	480	94	-3.3	275	9×10^{-11}	71	2×10^{12}
Al_2O_3 (4nm)	489	96	-3.7	330	2×10^{-9}	78	9×10^{11}
ZrO_2 (4nm)	425	93	-2.9	275	1×10^{-10}	71	4×10^{12}
HEMT	340	98	-2.6	275	2×10^{-7}	92	---

図5に、 ZrO_2/Al_2O_3 複合膜構造 HEMT と標準 HEMT について2端子ゲートリーク電流の温度依存性を示す。 ZrO_2/Al_2O_3 複合膜構造のリーク電流は、 $300^\circ C$ においても 4×10^{-10} A/mm 以下に抑えられ、この値は標準 HEMT の室温におけるリーク電流より小さかった。

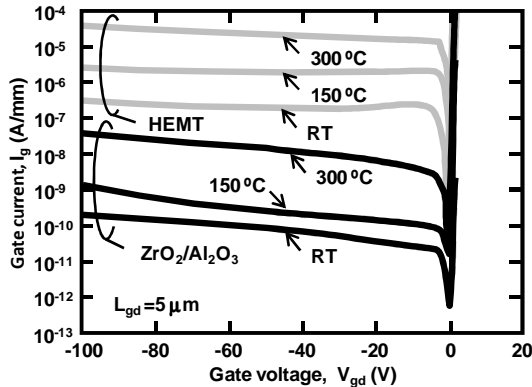


図5 2端子ゲートリーク電流の温度依存性（複合絶縁膜構造と標準 HEMT の比較）

室温と $300^\circ C$ におけるゲートリーク電流特性を ZrO_2/Al_2O_3 複合絶縁膜構造、単層 Al_2O_3 構造、単層 ZrO_2 構造、標準 HEMT の4種類について比較表示した図を図6に示す。複合絶縁膜構造の優位性が明確に示されている。

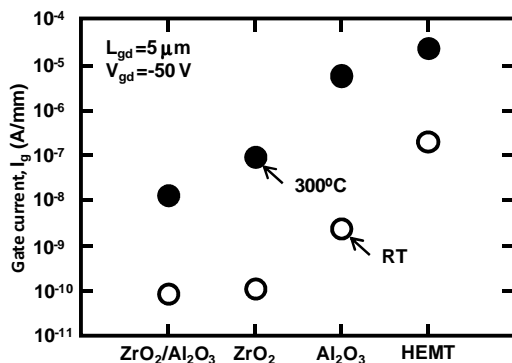


図6 ゲートリーク電流特性の構造間比較

以上の検討より、 ZrO_2/Al_2O_3 複合絶縁膜 MISHEMT が高温・高周波エレクトロニクス応用デバイスとして相応しいことが明らかとなった。

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4件）

[1] M. Hatano, N. Yafune, H. Tokuda, Y. Yamamoto, S. Hashimoto, K. Akita, and M. Kuzuhara, "Superior DC and RF Performance of

AlGaIn-Channel HEMT at High Temperatures, IEICE Trans. Electron., Vol.E95-C, pp.1332-1336, (2012).

[2] H. Tokuda, J. Yamazaki, and M. Kuzuhara, "High temperature electron transport properties in AlGaIn/GaN heterostructures," J. Appl. Phys., 108, 104509 (2010).

[3] H. Tokuda, M. Hatano, N. Yafune, S. Hashimoto, K. Akita, Y. Yamamoto, and M. Kuzuhara, "High Al composition AlGaIn-channel high-electron-mobility transistor on AlN substrate," Appl. Phys. Express, 3, 121003 (2010).

[4] H. Tokuda, J. Yamazaki, and M. Kuzuhara, "High temperature electron transport properties in AlGaIn/GaN heterostructures," J. Appl. Phys., 108, 104509 (2010).

〔学会発表〕（計12件）

[1] M. Hatano, Y. Taniguchi, H. Tokuda, and M. Kuzuhara, "Influence of annealing on DC performance for AlGaIn/GaN MIS HEMTs," 2012 International Workshop on Nitride Semiconductors, Sapporo, p.485, (2012).

[2] 畑野舞子, 谷口裕哉, 徳田博邦, 葛原正明, 「AlGaIn/GaN MIS HEMT の高温特性」, 第73回応用物理学会学術講演会, 12p-F2-2, 2012

[3] 畑野舞子, 谷口裕哉, 徳田博邦, 葛原正明, 「AlGaIn/GaN MIS HEMT の直流特性に与える熱処理の影響」, 信学技報, Vol.112 No.154, pp.1-4, 2012

[4] M. Kuzuhara and H. Tokuda, "AlGaIn/GaN Heterojunction FETs for High-Breakdown and Low-Leakage Operation," Pacific Rim Meeting on Electrochemical and Solid-State Science (PRIME 2012), Honolulu, Hawaii, Dig., E4, 2532 (2012).

[5] M. Kuzuhara, "GaN-based electronics," The Ninth Int'l Conf. on Advanced Semiconductor Devices and Microsystems (ASDAM 2012), Smolenice, Slovakia, Proc., pp.1-6, (2012).

[6] M. Kuzuhara and H. Tokuda, "Status and Perspective of GaN-based Technology in Japan," CS MANTECH, Boston, USA, Dig., pp.39-42, (2012).

[7] M. Hatano, J. Yamazaki, N. Yafune, S. Hashimoto, K. Akita, Y. Yamamoto, and M. Kuzuhara, "High-Temperature RF Characterization of AlGaIn-Channel HEMTs," 9th Topical Workshop on Heterostructure Microelectronics (TWHM 2011), Gifu, Dig., pp.13-14 (2011).

[8] J. Yamazaki, M. Hatano, H. Tokuda and M. Kuzuhara, "High-temperature RF characterization of AlGaIn/GaN HEMTs," 38th International Symposium on Comp. Semicond.,

Berlin, Dig., pp.355-356 (2011).

[9] M. Kuzuhara, “Next Challenges in III-Nitride HEMTs (invited),” Workshop on Frontier Photonic and Electronic Materials and Devices, Granada, Dig., p.22, (2011).

[10] M. Hatano, N. Kunishio, H. Chikaoka, J. Yamazaki, Z. B. Makhzani, N. Yafune, K. Sakuno, S. Hashimoto, K. Akita, Y. Yamamoto, and M. Kuzuhara, “Comparative high temperature DC characterization of HEMTs with GaN and AlGaN channel layers,” CS-MANTECH, Portland, p.101, (2010).

[11] M.Kuzuhara, “Temperature Characterization of GaN and AlGaN-based HEMTs (invited),” International Workshop on Nitride Semiconductors (IWN2010), Tampa, Program & Abstracts, N3.1, p.22, (2010).

[12] M. Kuzuhara, “Next challenges in GaN HEMT electronics (invited),” HETECH 2010, Greece, Dig., Session 5, Tue-1 (2010).

〔図書〕（計 1 件）

[1] 大橋弘通・葛原正明, 丸善株式会社, 「パワーデバイス」, 2011, 248 頁

〔産業財産権〕

○出願状況（計 1 件）

名称：窒化物半導体を用いた電界効果型トランジスタ及びその製造方法

発明者：葛原正明、徳田博邦、矢船憲成

権利者：国立大学法人福井大学

種類：特許

番号：特願 2012-084259

出願年月日：24年4月2日

国内外の別：国内

〔その他〕

ホームページ等

<http://fuee.u-fukui.ac.jp/~kuzuhara/index.html>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

葛原 正明 (KUZUHARA MASA AKI)

福井大学・大学院工学研究科・教授

研究者番号：20377469

(2) 研究分担者

山本 あき勇 (YAMAMOTO AKIO)

福井大学・大学院工学研究科・教授

研究者番号：90210517