

## 電力変換損失を革新的に低減する多重台形ゲート型窒化ガリウムトランジスタ

### 代表研究者

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 橋詰 保

### 共同研究者

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 佐藤 威友

同 博士課程 田村 隆博

同 修士課程 大井 幸多

### 1. はじめに

省エネ・環境保全の観点から、電気エネルギーの損失を劇的に低減することが最重要課題の1つである。情報・家電製品、冷暖房製品、ハイブリッド車・電車、ビル・工場設備など、ほとんど全ての製品・設備では、交流-直流変換や電圧値変換を含む電源が装備されており、インバータと総称されている電力変換システムが組み込まれている。その中枢素子としてシリコン(Si)トランジスタが使用されているが、トランジスタ動作時の電力損失をさらに低減することが求められており、Si素子の性能限界を超える高効率素子の開発が急務となっている。

AlGa<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub>高電子移動度トランジスタ(High Electron Mobility Transistor : HEMT)は、高パワー(高耐圧、高電流密度)動作、低損失動作、あるいは高温の環境下で動作可能なことから電力スイッチングデバイスとして盛んに研究されている。電力変換時に熱損失となるオン抵抗については、Ga<sub>N</sub>のもつ高い絶縁破壊電界から大幅な低下が期待され、同じ耐圧のSiデバイスと比べて1/20程度の値が報告されている[1]。しかしながら、パワーデバイス応用に向けては、さらなる低オン抵抗化やしきい値電圧の制御、あるいは優れた電流安定性の実現などといった課題がある。

本研究では、しきい値電圧制御とゲート制御性向上を目的として図1に示すような多重台形チャネル(Multi Mesa Channel : MMC) HEMTを作製し、評価を行った。2次元電子層(2DEG)を台形型ゲート電極が包み込む構造を持っており、電界制御性、均一性および安定性の向上が期待され、ここでは、デバイスの基本特性と電流安定性の評価を行った。

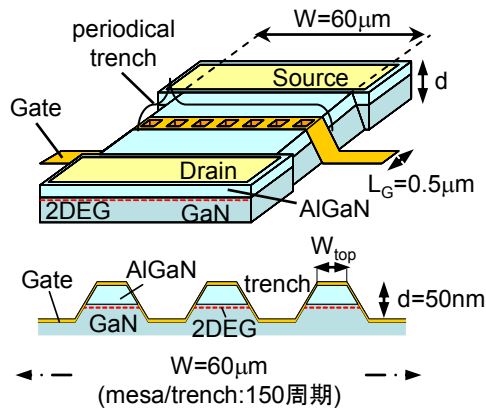


図 1 MMC HEMT の構造模式図

## 2. 実験方法

本研究では、サファイア基板上に有機金属気相成長(MOVPE)した  $\text{Al}_{0.25}\text{Ga}_{0.75}\text{N}/\text{GaN}$  ヘテロ接合構造を用いた。AlGaN 障壁層厚さは 30nm であった。室温における典型的な 2DEG のシート抵抗および電子移動度はそれぞれ  $480\Omega/\text{sq.}$ 、 $1350\text{cm}^2/\text{Vs}$  であった。

作製方法は、はじめに、AlGaN/GaN ヘテロ接合構造上に RF-PECVD により  $\text{SiO}_2$  を堆積し、電子ビーム露光とウェットエッチングによりパターンニングを施した。そのパターンニングをドライエッチングにおけるマスクパターンとして、ECR-RIBE によりガス混合比  $\text{CH}_4/\text{H}_2/\text{Ar}/\text{N}_2 = 5/15/3/3$  sccm の条件下でドライエッチングを行い[2]、周期的トレンチ構造を形成した。エッチング深さは、トレンチにて完全に 2DEG を除去し、プラズマダメージを最小限に抑えるために 50nm とした。その後、 $\text{SiO}_2$  を取り除き、ドレイン/ソース電極として、Ti/Al/Ti/Au を真空蒸着して、 $800^\circ\text{C}$  で 1 分間熱処理を行った。最後に、ゲート電極として Ni/Au をトレンチ上に真空蒸着した。表面パッシベーション処理は行っていない。作製したデバイスはすべてゲート長  $L_G=0.5\mu\text{m}$  である。今回は、比較のためにゲート幅  $60\mu\text{m}$ 、ゲート長  $0.5\mu\text{m}$  の最も一般的なデバイス構造であるプレーナ型 HEMT を同時に作製した。

## 3. 結果と考察

図 2 に今回作製したゲート-ドレイン間距離( $L_{GD}$ ) が  $10\mu\text{m}$  の MMC HEMT の SEM 像を示す。図 2 から分かるようにゲート電極直下に周期的トレンチ構造が形成されている。また、この図からメサ幅  $W_{\text{top}}$  とトレンチ幅  $W_{\text{bot}}$  がそれぞれ、70nm、330nm と判断できる。ゲート幅  $60\mu\text{m}$  中にメサ/トレンチが 150 周期含まれている。実効的なゲート幅

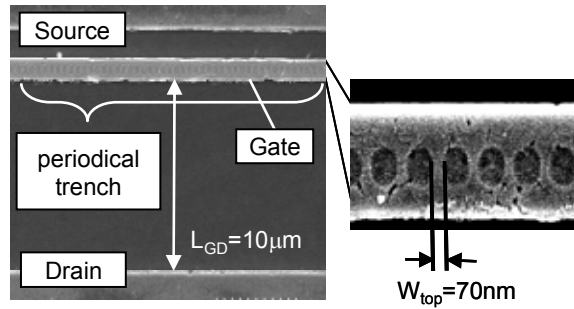


図 2 作製したデバイス SEM 像

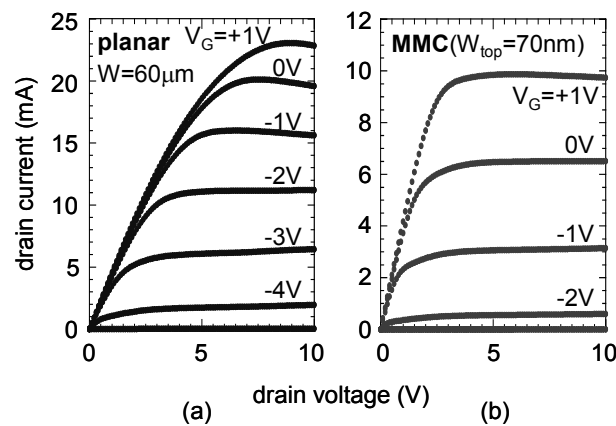


図 3 (a)プレーナ型および(b)MMC HEMT の  $I_{DS}$ - $V_{DS}$  特性

$W_{top-sum}$  は、 $W_{top}$  を 150 周期分足し合わせると  $10.5\mu\text{m}$  となる。

図 3 にプレーナ型および MMC HEMT の室温におけるドレイン電流-電圧( $I_{DS}$  - $V_{DS}$ ) 特性を示す。図 3 に示すように、MMC HEMT はプレーナ型 HEMT と同様に完全なチャネルピンチオフを伴った良好な  $I_{DS}$  - $V_{DS}$  特性を示した。実効的なゲート幅で規格化しゲートリーク電流を比較したところ、両者ともほぼ同等の値を示した。この結果から、MMC HEMT のメサ側面からのゲートリーク電流は、メサ上面からのリーク電流と比べ無視できると考えられる。実際、金属と 2DEG 端界面の整流特性が実験結果と計算によって報告されている[3, 4, 5]。

MMC HEMT のゲート制御性を調べるために、プレーナ型 HEMT と MMC HEMT のサブスレッショルド特性および伝達特性を評価した。両者のサブスレッショルド領域でのドレイン電流を比較したものを図 4 に示す。プレーナ型 HEMT の S 値(sub-threshold slope)は  $190\text{mV/decade}$  であった。この値は、AlGaIn/GaN HEMT の報告例に近い値である[6]。対照的に MMC HEMT の S 値は  $110\text{mV/decade}$  と相対的に小さな値であ

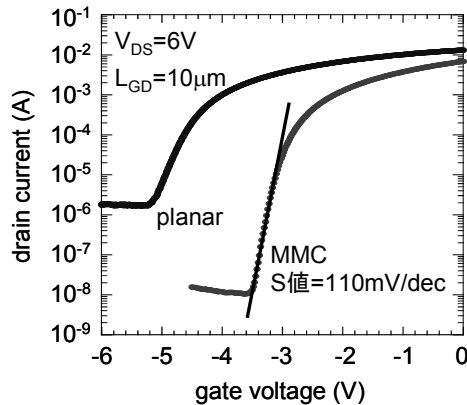


図4 プレーナ型およびMMC HEMT のサブスレッショルド特性

った。また、ドレイン電流におけるオン/オフ比は、プレーナ型 HEMT と比較して 2 桁高い結果となった。

図 5(a) に線形領域 ( $V_{DS}=0.5V$ ) における両者の伝達特性を示す。図 5(a) から分かるように、MMC HEMT のしきい値電圧はおよそ  $-2.5V$  であり、プレーナ型 HEMT と比較して  $2V$  以上正方向にシフトしている。また、実効的なゲート幅が  $10.5\mu m$  と通常のプレーナ型 HEMT の  $1/5$  程度にも関わらず、ドレイン電流、相互コンダクタンス ( $g_m$ ) とともに同程度の値が得られた。この電流駆動能力増大の原因に関しては今のところ明らかになっていないが、MMC 構造における 2DEG の囲い込み効果、高インピーダンスチャネル、およびメサ側面からの熱放散効果が可能性として考えられる。

MMC 構造におけるしきい値電圧のシフトについて検討するために、数値計算により  $V_{DS}=0V$  の条件下でメサ構造断面の 2 次元ポテンシャル分布を調べた。チャネル幅は作製したデバイスと同様の  $W_{top}=70nm$ 、ゲート電圧はしきい値電圧近傍の  $-2.5V$  に設定した。ショットキー障壁高さは  $1.4eV$  とした[7]。図 5(b) にその結果を示す。メサゲート構造では、側面ゲートが 2DEG 端に接しているため、メサ上面からだけでなく横方向からの電界の効果がある。チャネル幅が狭くなると、側面ゲートからの電界がアンドープ GaN 層を通じて効率良くポテンシャルを変化させ、2DEG を囲い込むように制御している。この効果により、2DEG 近傍にて大きくポテンシャルが引き上げられる。そのため、MMC HEMT ではしきい値電圧が正方向にシフトする。チャネル幅を変えて計算を行ったところ、このようなゲート電極による 2DEG の囲い込み効果は、 $W_{top}$  が  $100nm$  以下になると顕著に現われることがわかった。詳細はまだ明らかではないが、ゲート駆動力の向上、あるいはチャネル内の電界分布の均一化により、個々のチャネルにおける電

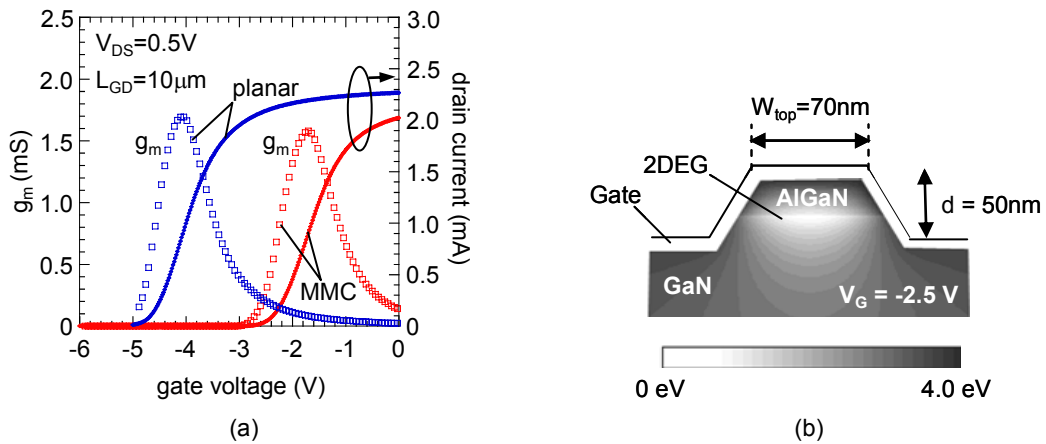


図 5 (a)線形領域( $V_{DS}=0.5V$ )におけるプレーナ型 および MMC HEMT の伝達特性, (b)MMC 構造断面での 2 次元ポテンシャル分布

流駆動能力が向上した可能性がある。

図 6 はプレーナ型および MMC HEMT の  $I_{DS}-V_{DS}$  特性を同じ電流レベルで比較したものである。ゲート電圧は、両者とも 0V である。両者の knee 電圧( $V_{knee}$ )を比較すると、MMC HEMT のほうが 3V ほど低くなっている。デバイス構造の違いによる  $V_{knee}$  の変化を調べるために、異なる  $L_{GD}(=1, 10\mu m)$ を持つプレーナ型および MMC HEMT の  $I_{DS}-V_{DS}$  特性を評価した。プレーナ型 HEMT では、 $L_{GD}$  の増加に伴って、線形領域でのドレイン電流の傾きが減少し、 $V_{knee}$  は増加した。ゲート長およびゲート-ソース間距離 ( $L_{GS}$ )が同じであれば、ドレイン電流の傾きはゲート-ドレイン間領域のアクセス抵抗によって支配される。

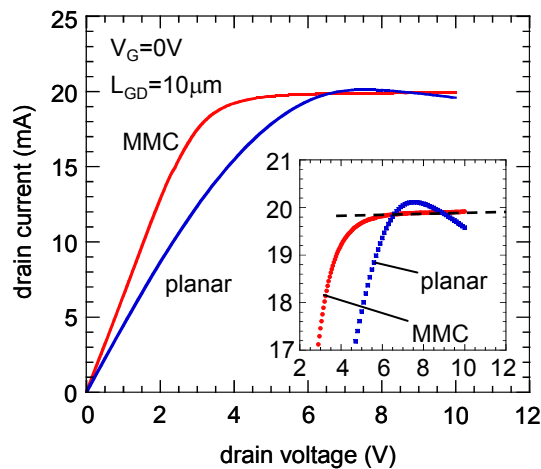


図 6 プレーナ型および MMC HEMT の  $I_{DS}-V_{DS}$  特性(同じ電流レベル)

つまり、 $L_{GD}$  が延びると、その分のアクセス抵抗が増えるために、ドレイン電流の傾きが減少し、 $V_{knee}$  が増加する。この結果は、 $L_{GD}$  の増加に伴って電流の傾きが減少するという報告例と一致している[6]。対照的に、MMC HEMT では、 $L_{GD}$  を  $1\mu\text{m}$  から  $10\mu\text{m}$  へ変化させても、ドレイン電流の傾きの減少の割合は、プレーナ型 HEMT に比べ非常に小さかった。そのため、 $V_{knee}$  の増加の割合も小さい。MMC HEMT では、チャンネル幅が  $100\text{nm}$  以下になるとチャンネルのインピーダンスは、数  $\text{k}\Omega$  となりプレーナ型 HEMT より 2 桁大きい値となる。そのため、 $L_{GD}$  が長くなっても相対的にアクセス抵抗増加の割合が小さく、ドレイン電流の変化に大きな影響を及ぼさないと思われる。

図 6 においてドレイン電流の範囲を狭くして特性を比較すると、プレーナ型 HEMT は飽和ドレイン電流が減少している。ドレイン電流が流れることによりチャンネル中に熱が蓄えられチャンネル温度が上昇し、その温度上昇に伴うドリフト速度の低下が起因していると考えられる。一方、MMC HEMT の飽和ドレイン電流は一定を保ち、優れた電流安定性が確認された。MMC 構造にすることでメサ側面からの放熱の効果が現われ、同程度の電流が流れてもチャンネル温度がプレーナ型 HEMT ほど上昇していないと思われる。

最後に、オフ状態におけるプレーナ型および MMC HEMT の絶縁破壊特性を評価した。図 7(a)に  $L_{GD}=1\mu\text{m}$ 、図 7(b)に  $L_{GD}=10\mu\text{m}$  における両者の絶縁破壊特性を示す。ゲート電圧は、プレーナ型および MMC HEMT それぞれ、 $-7\text{V}$  と  $-5\text{V}$  とした。図 7(a)が示すように、 $L_{GD}=1\mu\text{m}$  における両者の絶縁破壊電圧はおよそ  $55\text{V}$  と同等の値を示した。 $L_{GD}=3, 5\mu\text{m}$  の場合、フィールドプレート構造なしの AlGaIn/GaN HEMT の絶縁破壊電圧は  $80 \sim 150\text{V}$  と報告されている[1, 9]。

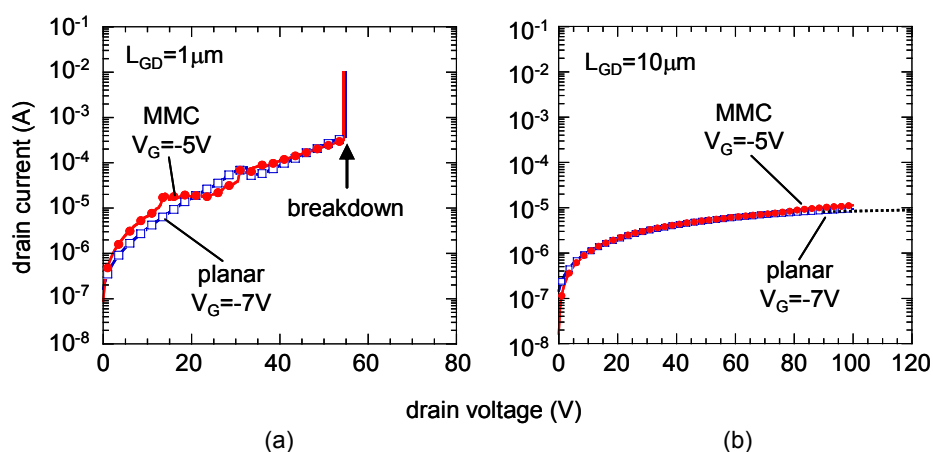


図 7 (a) $L_{GD}=1\mu\text{m}$ , (b) $L_{GD}=10\mu\text{m}$  におけるプレーナ型および MMC HEMT の絶縁破壊特性

一方、 $L_{GD}=10\mu\text{m}$  の場合、図 7(b)に示すように、 $L_{GD}=1\mu\text{m}$  と比較して低いドレインリーク電流が得られた。リーク電流については、得られた値とほぼ同等の値が報告されている[1, 8, 9]。測定限界のためドレイン電圧を 100V 以上印加できなかったが、MMC HEMT はプレーナ型 HEMT と非常に似たリーク特性を示した。このことから、ゲート電極直下が周期的トレンチ構造である MMC HEMT において、デバイス構造に起因した絶縁破壊特性悪化の影響がないと考えられる。

#### 4. まとめ

AlGaIn/GaN HEMT のしきい値電圧制御とゲート制御性向上を目的に新デバイス構造として MMC HEMT を作製し、評価を行った。MMC HEMT では、一般的なプレーナ型 HEMT と比較してしきい値電圧が浅くなった。2次元ポテンシャル計算の結果、側面ゲートからの電界が 2DEG を囲い込むように制御し、チャンネル中のポテンシャルを効率良く変化させていることがわかった。この 2DEG の囲い込み効果から良好なサブスレッショルド特性と電流駆動能力の向上が得られたと推測される。耐圧向上のためゲート-ドレイン間距離を長くとした MMC HEMT においても、低い knee 電圧が得られた。また MMC HEMT はプレーナ型 HEMT と比較して、優れた電流安定性が得られた。最後に、プレーナ型および MMC HEMT のオフ状態におけるドレインリーク電流特性と絶縁破壊特性を評価したところ、ほぼ同等な特性が得られた。このことから、周期的トレンチ構造に起因した絶縁破壊特性の悪化はないと考えられる。

なお、本研究は(財)JFE21 世紀財団技術研究助成(2007 年度)の援助により実施致し、意義ある研究成果を得ることができました。ここに、財団の関係者に心より感謝致します。

#### 発表論文

- 1) T. Tamura, J.Kotani, S.Kasai, and T. Hashizume, "Nearly temperature-independent saturation drain current in a multi-mesa-channel AlGaIn/GaN high-electron-mobility transistor", Appl. Phys. Express **1**, Art. No. 023001(2008).
- 2) T. Hashizume, (Invited) "Surface control of AlGaIn for the stability improvement of AlGaIn/GaN HEMTs", 66th Device Research Conference (DRC-66), Univ. California, Santa Barbara, USA, June 23-25, 2008.
- 3) Kota Ohi, Takahiro Tamura, Junji Kotani and Tamotsu Hashizume, " Mesa-gate AlGaIn/GaN HEMTs having narrow-width channels", 2007 International Conference

- on Solid-State Devices and Materials (SSDM2007), Tsukuba, Sep. 24-26, 2008.
- 4) T. Hashizume, (Invited) "Surface control structures for high-performance AlGaIn/GaN HEMTs", 7th International Conference on Advanced Semiconductor Devices and Microsystems (ASDAM 2008), Smolenice, Slovakia, October 12-16, 2008.
- 5) 大井幸多、橋詰保、「ナノ細線チャネルを利用した台形ゲート AlGaIn/GaN HEMT」、電子情報通信学会研究会、1月 14-16 日、東京。

#### 参考文献

- [1] W.Saito, Y.Takada, M.Kuraguchi, K.Tsuda, I.Omura, T.Ogura, and H.Ohashi, IEEE Trans.Electron Devices., 50, 2528 (2003)
- [2] Z. Jin, T. Hashizume, and H. Hasegawa, Appl. Surf. Sci., 190, 361 (2002).
- [3] S.G.Petrosyan and A.Ya.Shik, Sov. Phys.Semicond., 23(6), 696 (1989)
- [4] B.L.Gelmont, W.Peatman, and M.Shur, J.Vac. Sci. Technol., B 11(4), 1670 (1993)
- [5] T.Hashizume, H.Okada, K.Jinushi and H.Hasegawa, Jpn. J. Appl. Phys., 34(1995)
- [6] T.Palacios, S.Rajan, A.Chakraborty, S.Heikman, S.Keller, S.P.DenBaars, U.K.Mishra, IEEE Trans.Electron Devices., 52, 2117 (2005)
- [7] J. Kotani, M. Kaneko, H. Hasegawa, and T. Hashizume. J. Vac. Sci. Technol., B, 24, 2148 (2006).
- [8] Y.C.Choi, M.Pophristic, B.Peres, M.G.Spencer, and L.F.Eastman, J. Vac. Sci. Technol., B, Vol. 24, 2601 (2006).
- [9] T.Nanjo, M.Takeuchi, M.Suita, T.Oishi, Y.Abe, Y.Tokuda and Y.Aoyagi, Appl. Phys. Lett., 92, 263502 (2008)