Development of AlGaIn/GaN FETs for Power Supply

Ryohei Baba Non-member (Sanken Electric Co., Ltd)

Osamu Machida Non-member (Sanken Electric Co., Ltd)

Nobuo Kaneko Non-member (Sanken Electric Co., Ltd)

Akio Iwabuchi Non-member (Sanken Electric Co., Ltd)

Koji Yano Member (University of Yamanashi)

Takashi Matsumoto Non-member (University of Yamanashi)

Keywords : GaN, FET, reverse conduction , normally-off

AlGaIn/GaN FET is one of attractive candidates for next generation high power devices because of high carrier mobility in 2DEG (two-dimensional electron gas) channels and high breakdown voltage due to high critical electric field. In order to apply the AlGaIn/GaN FETs for power switching applications, reverse conductive operation and normally-off characteristics are required.

In this paper, AlGaIn/GaN FET with a built-in SBD which has the reverse conductive operation and the normally-off characteristics is reported for the purpose of designing AlGaIn/GaN FETs for power supply. The fabricated device exhibited a stable reverse conductive operation and a threshold voltage of +0.8V. In addition, low capacitance characteristics are obtained due to the reduction of mirror effect.

Fig.1 shows a schematic cross section of the fabricated AlGaIn/GaN FET (RC-GaN FET). For the purpose of normally-off characteristics, a recess gate structure is formed by ICP-RIE (inductive coupled plasma-reaction ion etching) and deposition of p-type material /Ni/Au. As a result, the threshold voltage of +0.8V is obtained. For the reverse conductive operation, anode electrode of SBD is formed between gate electrode and drain electrode. In addition, cathode electrode was common with drain electrode and anode electrode was connected to source electrode. Anode FP (field plate) is formed for the purpose of relaxation of electric field.

I-V characteristics of RC-GaN FET and conventional AlGaIn/GaN FET are shown Fig.2. Conventional AlGaIn/GaN FET shows a large voltage drop depends on gate negative voltage

at reverse conductive state (third quadrant). On the other hand, RC-GaN FET exhibits excellent reverse conductive characteristics which do not depend on the gate negative voltage.

Capacitance characteristics of RC-GaN FET are shown Fig.3 compared with conventional AlGaIn/GaN FET. The Crss (reverse transfer capacitance) of RC-GaN FET is smaller than that of conventional AlGaIn/GaN FET due to the reduction of mirror effect. This result says that RC-GaN FET is effective for low loss power switching device.

Fig. 2. I-V characteristics

Fig. 3. Capacitance characteristics

Fig. 1. Schematic cross section of the fabricated AlGaIn/GaN FET

電源用 AlGaIn/GaN FET の開発

非会員 馬場 良平* 非会員 町田 修*
 非会員 金子 信男* 非会員 岩渕 昭夫*
 正員 矢野 浩司** 非会員 松本 俊**

Development of AlGaIn/GaN FETs for Power Supply

Ryohei Baba*, Non-member, Osamu Machida*, Non-member, Nobuo Kaneko*, Non-member, Akio Iwabuchi*, Non-member,
 Koji Yano**, Member, Takashi Matsumoto**, Non-member

AlGaIn/GaN FET with a built-in SBD which has a reverse conductive operation and normally-off characteristics is fabricated for the purpose of designing GaN power device for power supply. The fabricated device exhibited a threshold voltage of +0.8V and excellent reverse conductive characteristics. In addition, low capacitance characteristics are obtained due to the reduction of mirror effect. From these results, it is confirmed that the fabricated device is effective for low loss power switching device.

キーワード：窒化ガリウム，電界効果トランジスタ，逆導通，ノーマリオフ

Keywords : GaN, FET, reverse conduction, normally-off

1. はじめに

地球環境保全の観点から省エネルギー化による炭酸ガス排出量の削減が求められている。電源機器分野においてはその効率を改善することが必要であり、機器内部で発生する損失を低減させる回路や制御法が開発されているが、パワースイッチング素子そのものを低損失化することも強く求められている。SJ（スーパージャンクション）構造を有する Si-MOSFET や IGBT においては年々特性向上がなされているが、その材料物性による限界から大幅な向上は難しい。

ワイドバンドギャップ半導体である GaN（窒化ガリウム）は絶縁破壊電界強度が高いことから次世代のパワースイッチングデバイスとしての期待が大きく、多くの研究・開発が進められている⁽¹⁾。GaN 結晶の成長基板においては GaN、サファイア、SiC、Si などいくつかの選択肢があるが、大口径化、低コスト化の観点から筆者らは Si 基板を採用している^{(2)~(4)}。

電源用途の Si パワーデバイスは通常、縦型構造であるが、Si 基板上に GaN 系結晶を成長（GaN on Si）し縦方向に電流

を流した場合、GaN 系成長層と Si 基板の界面に大きな電圧ドロップを生じるため、縦型構造は現実的ではない。そのため横型構造を採用しているが、この場合には AlGaIn/GaN ヘテロ界面に発生する高濃度な 2 次元電子ガス（Two Dimensional Electron Gas）層を導電層として利用している。しかしながら、この導電層を利用した単純なショットキゲート構造の横型 AlGaIn/GaN FET を作製した場合、ゲート電圧 0V においても 2 次元電子ガスがゲート電極下に存在するため、通常ノーマリオン特性となる。さらに、ショットキゲート構造におけるリーク電流は従来の熱電子放出理論では説明できない大きなリーク電流特性を示し、デバイスの消費電力の増大や、信頼性の劣化などを引き起こす。GaN パワースイッチング素子の実現には上記問題を解決する事が求められている。

電源機器によっては、スイッチング素子に電流帰還動作（逆導通機能）を要する回路構成がある。例えば、このような用途に逆導通機能の無い Si-IGBT を適用する場合、電流帰還用に別チップのダイオードを並列に接続した 2 チップ構成が採用される。AlGaIn/GaN FET においては通常、安定した逆導通特性を期待出来ないため、ダイオードを並列に接続することが好ましい⁽⁵⁾。さらに低コスト化、チップ実装の省スペース化などを考えると、FET とダイオードを 1 チップで構成することが望まれる。

以上のような背景、要求を踏まえ、AlGaIn/GaN FET のリーク電流抑制技術、およびノーマリオフ化技術について報告する。またこれらの技術に加え、電源機器への搭載を考

* サンケン電気（株） 技術本部 先行技術開発統括部
 〒352-8666 埼玉県新座市北野 3-6-3
 Advanced technology development division, Sanken Electric Co., Ltd.

3-6-3, Kitano, Niiza, Saitama 352-8666
 ** 国立大学法人山梨大学 大学院医学工学総合研究部
 〒400-8510 山梨県甲府市武田 4-4-37
 Interdisciplinary Graduate School of Medical and Engineering,
 National university corporation, University of Yamanashi
 4-4-37, Takeda, Kohu, Yamanashi 400-8510

えた場合に必要となる逆導通機能を有する 1 チップ AlGaIn/GaN FET (以下、逆導通 GaN FET) について、その構造および特性を報告する。

2. 技術要素

〈2・1〉 リーク電流抑制技術 デバイス表面側に電極端子を設ける横型の AlGaIn/GaN FET や SBD (Schottky Barrier Diode) において高電圧が印加された場合には FET においてはゲート・ドレイン電極間、SBD においてはアノード・カソード電極間でその電圧が保持される。このとき、それぞれの電極端部に局所的に電界が集中し、そのいずれかの電界が臨界電界に到達した時点で絶縁破壊が起こる。そこでデバイスの耐圧を向上するため、各電極部の電界集中をフィールドプレート (FP) 構造の適用によって緩和する技術が用いられている⁽⁶⁾。

金属-AlGaIn 接触からなるショットキ接合のリーク電流は従来の熱電子放出理論では説明できない大きなリーク電流特性を示し、その原因としてトンネル効果によるリーク電流のモデリングが提案されている⁽⁷⁾⁽⁸⁾。したがってリーク電流を抑制するためには FET や SBD のショットキ接合部の電界集中を緩和することが重要と考えられる。

そこで上記背景を踏まえ、一定傾斜を有する FP 構造による電界緩和機構について 2 次元デバイスシミュレーションにより検証した。解析に用いたデバイス構造を Fig.1 に示す。AlGaIn 層は Al 組成 0.26、厚みを 25nm とした。ショットキ接合を有するゲート電極長は 2.0 μm 、ゲート・ドレイン電極間距離を 12 μm とした。保護膜には酸化膜 (SiOx) を用い、厚みを 500nm とした。ゲート電極に接続された FP 電極をドレイン電極側に配置し、SiOx により傾斜を設けた。実際のデバイス作製可能範囲を考慮した傾斜角を 2 種類設定した (Structure A, B 傾斜角 A>B)。分極電荷については AlGaIn/GaN ヘテロ界面にのみ正電荷を考慮し、ゲート電極部においてはバリアトンネリングモデルを導入した。

各傾斜角における OFF 動作時のゲートリーク電流特性を実際に作製したデバイスの特性も併せて Fig.2 に示す。傾斜角の小さい Structure B の方が、ゲートリーク電流が抑制され、実際のデバイスにおいても同様の傾向が得られた。Fig.3 にドレイン電圧 200V におけるゲート電極端部の電界分布、及び AlGaIn 層表面からの深さ 5nm におけるチャネル方向の電界分布を示す。Structure B の方が、電界が緩和されている。

ショットキゲートリーク電流を抑制するために、電流経

Fig. 1. Device structure for simulation

路となる電極端部の電界緩和が有効であることが、シミュレーション、実デバイス特性の両面から確認された。SBD のアノード電極においても同様の技術によりリーク電流が抑制できることを確認している。

〈2・2〉 ノーマリオフ化技術 2 次元電子ガスを利用した横型 AlGaIn/GaN FET において、ON 抵抗の増大を抑制しながらノーマリオフ特性を得るためにゲートリセス構造が用いられることが多い⁽⁹⁾。しかしながら通常のリセスショットキゲート電極構造だけでは閾値電圧は 0V 付近となり十分かつ安定したノーマリオフ特性を実現するには不十分であると筆者らは考えている。そこで GaN と同等のバンドギャップを有し、P 型の伝導性を持つ電極材料のゲート電極構造への導入を検討した。本検討構造は通常のショットキゲート電極構造よりも閾値電圧を正側へシフトさせ、より安定したノーマリオフ特性を実現できると期待される。

Si 基板上に成長した AlGaIn/GaN エピタキシャルウェハを

Fig. 2. Gate leakage current characteristics

Fig. 3. Electric field distribution at gate edge

Fig. 4. Relationship between AlGaN thickness and V_{th}

Fig. 5. Schematic cross section of reverse conduction GaN FET

用いて本検討ゲート構造 (Structure A) 及び比較用として Ni/Au ショットキゲート構造 (Structure B) を有するデバイスを作製し、最上層 AlGaN 層厚と閾値電圧の相関を調査した。その結果を Fig.4 に示す。Structure B に比べ、Structure A の閾値電圧は正側へシフトすることが確認された。その変化は実験水準範囲内の AlGaN 厚すべてに見られ、変化量は約 0.8V であった。AlGaN 層厚 6nm において閾値電圧 1.0V が得られた。

3. 逆導通 GaN FET の概要

Fig.5 に逆導通 GaN FET の断面構造を示す。使用した GaN on Si ウェハは Si 基板上にバッファ層、GaN 層、AlGaN 層を順次積層、約 5 μ m 成長したものである。AlGaN 層は Al 組成が 0.26、厚みが 25nm である。安定したノーマリオフ特性を得るために、先述した P 型の伝導性を持つ電極を制御電極に適用し、かつその直下のみ AlGaN 層を薄層化した。電流帰還用ダイオードを融合するために、単純な GaN SBD の並列接続は採用せず、ゲート電極とドレイン電極の間にショットキ接合されたアノード電極を配置した構造を採用した。アノード電極はソース電極と電気的に接続し、カソード電極はドレイン電極と共通化した。アノード電極の設置により OFF 動作時にはアノード・ドレイン電極間に強電界がかかるため、先述した電界緩和技術を実用化

Fig. 6. Comparison of measured IV characteristics

Fig. 7. Comparison of calculated IV characteristics

極部に適用した。600V 以上の素子耐圧を得るためにアノード・ドレイン電極間距離は 12 μ m とした。特性評価の際には Si 基板をソース電極とショートした。

4. 逆導通 GaN FET の特性

〈4・1〉 DC 特性 Fig.6 に逆導通 GaN FET、及び比較としてアノード電極を有さない通常のノーマリオフ型 AlGaN/GaN FET (以下、通常型 GaN FET) の DC 特性を示す。測定した素子のチップサイズは 1.8mm $\times$ 4.2mm² であり、ゲート幅はそれぞれ、104 μ m、162 μ m である。通常型 GaN FET においてゲート電圧が負電圧の時に逆導通状態 (第 3 象限) の電圧降下が大きくなる。一方、逆導通 GaN FET においてはゲート電圧に依存しない良好な逆導通動作が確認された。しかしながら飽和電流が少なく、オン抵抗が高い。これはゲート電極幅が狭いだけでなく、アノード電極を設置したことによりドレイン・ソース間距離が長く、ドリフト部以外の寄生抵抗成分が多くなるためである。

どちらの FET も先述したゲート構造によりノーマリオフ動作を実現し、閾値電圧は約 0.8V であった。また破壊電圧は 800V 以上であった。

Fig.7 に 2 次元デバイスシミュレーションにより算出した DC 特性結果を示す。実デバイスの測定結果と同様、逆導通状態 (第 3 象限) にてゲート電圧に依存しない良好な逆導通動作が確認された。

〈4・2〉 静電容量特性 逆導通 GaN FET 及び通常型 GaN FET の静電容量 (入力容量: C_{iss} , 出力容量: C_{oss} , 帰還容量: C_{rss}) の電圧依存性を測定した。その結果を Fig.8

Fig. 8. Comparison of measured capacitance characteristics

Fig. 9. Comparison of calculated capacitance characteristics

に示す。また 2 次元デバイスシミュレーションにより算出した結果を Fig.9 に示す。逆導通 GaN FET の出力容量 C_{oss} および帰還容量 Cr_{ss} が低電圧領域で大きく変化する様子が測定値、シミュレーションによる計算値で良く一致している。出力容量 C_{oss} の低電圧側での増大は、アノード電極と電極直下の 2 次元電子ガス層が平行平板コンデンサのように振舞うことで現れる特性である。すなわち容量が大きく変化する電圧 ($V_{ds} \approx 4V$) はアノード電極直下の 2 次元電子ガス層が空乏化する電圧である。

逆導通 GaN FET の帰還容量 Cr_{ss} は通常型 GaN FET と比べ、高電圧領域で極めて小さい値を示した。この理由については後述する。

〈4・3〉 ゲートチャージ特性 通常ゲートチャージ特性の評価は MOSFET などの絶縁ゲートに一定電流を流し、ゲート・ソース間の充電の様子を観測する。しかしながら逆導通 GaN FET のゲート・ソース間 I_{gs} - V_{gs} 特性は立ち上がり電圧が約 +2.5V のダイオード特性を示す⁽⁵⁾。そこで、特性評価する際の測定条件としてゲートへの一定電流を 10mA、 V_{gs} を 2V 以下とした。この条件下ではゲート・ソース間の充電が優勢であると考えられる。また、オフ時のドレイン電圧は 300V、オン時のドレイン電流は 6A に設定した。

Fig.10 に逆導通 GaN FET のゲートチャージ特性を示す。ゲート電圧が閾値電圧に到達し、ドレイン電流 I_{ds} が流れ始めるまで (off state) の電荷量 Q_{gs} が約 0.2nC と極めて小さい。これは逆導通 GaN FET の閾値電圧が約 0.8V でありゲ

Fig. 10. Gate charge characteristics

Table 1. Comparison of R_{on} , Q_{gd} , Q_{gs} and $R_{on} \times Q_{gd}$

	Q_{gs} [nC]	Q_{gd} [nC]	R_{on} [Ω]	$R_{on} \times Q_{gd}$ [$\Omega \cdot nC$]
Conventional GaN FET	0.2	9.0	0.09	0.81
Reverse conduction GaN FET	0.2	3.2	0.18	0.58
Si SJ MOSFET	2.0	11.0	0.68	7.50

Fig. 11. Equivalent circuit of reverse conduction GaN FET

ト・ソース間容量 C_{gs} が小さいことによる。さらにゲート電荷量を増すと FET はターンオンし、ミラー効果のため等価入力容量が増大する。入力容量増大によりゲート電圧 V_{gs} の増加傾向が抑制される期間、すなわち FET がオフ状態から完全なオン状態に移行するまで (transition state) の電荷量 Q_{gd} は 3.2nC であった。

パワーデバイスの損失に対する性能指標であるオン抵抗とゲート・ドレイン間電荷量の積、 $R_{on} \times Q_{gd}$ を通常型 GaN FET 及び SJ 型 Si-MOSFET (定格電圧 600V) の結果も併せて Table 1 に示す。逆導通 GaN FET はオン抵抗が高いものの、 Q_{gd} が低いため性能指数は 0.58 と低い値となり、MOSFET と比べると約 1/10 以下の値となった。これは逆導通 GaN FET がパワースイッチング素子として優れていることを示す結果である。

Fig.11 に逆導通 GaN FET の等価回路を示す。ゲート・アノード間で分割すると、ソース接地されたノーマリオフ型 FET とゲート接地されたノーマリオン型 FET のカスコード接続⁽¹⁰⁾⁽¹¹⁾と等価な構成となっている。そのためアノード・ドレイン電極間容量電荷の充放電がゲート電極を介さないことからゲート・ソース電極間容量が等価的に増大するミ

ラー効果を抑制できる。逆導通 GaN FET の Qgd が少ないのはこのためであり、帰還容量 Crss が小さいことも同様の理由によるものである。

5. おわりに

電源機器への搭載を想定した AlGaIn/GaN FET において必要とされるノーマリオフ動作、リーク電流抑制技術を紹介した。これらの技術を取り入れた逆導通機能を有する 1 チップ GaN FET を試作し特性を評価した結果、良好な FET 動作と逆導通動作が同時に得られる事を確認した。また、試作したデバイスはミラー効果が抑制され、パワースウィッチング素子として優れた特性を示すことを確認した。電源へ搭載した際の省エネルギー効果が期待できる。また、今回 2 次元デバイスシミュレーションによる計算値が、測定値の傾向を精度良く再現できることも確認出来た。シミュレーションの利用により効率的な開発が期待できる。

(平成 21 年 9 月 24 日受付, 平成 22 年 2 月 16 日再受付)

文 献

- (1) 吉田清輝:「GaN を用いた電子デバイス」, 応用物理, Vol.68, No.7, pp.787-792 (1998-7)
- (2) S. Iwakami, M. Yanagihara, O. Machida, E. Chino, N. Kaneko, H. Goto, and K. Ohtsuka: “AlGaIn/GaN Heterostructure Field-Effect Transistors (HFETs) on Si Substrates for Large-Current Operation”, Jpn. J. Appl. Phys., Vol.43, No.7, pp.L831-L833 (2004)
- (3) S. Iwakami, O. Machida, Y. Izawa, R. baba, M. Yanagihara, T. Ehara, N. Kaneko, H. Goto, and A. Iwabuchi: “Evaluation of AlGaIn/GaN Heterostructure Field-Effect Transistors on Si Substrate in Power Factor Correction Circuit”, Jpn. J. Appl. Phys., Vol.46, No.29, pp.L721-L723 (2007)
- (4) 大塚康二:「Si 基板上への窒化物半導体のエピタキシャル成長技術とインパクト」, 応用物理, Vol.76, No.5, pp.489-494 (2007)
- (5) 金子信男・町田 修:「ノーマリオフ型 GaN FET の開発」, サンケン技報, Vol.40, pp.19-22 (2008-12)
- (6) 酒井亮輔・西田猛利・塩島謙次・葛原正明:「多段及び傾斜フィールドプレートを有する AlGaIn/GaN HEMT の理論検討」, 信学技報, Vol.107, No.251, pp.47-52 (2007-10)
- (7) 小谷淳二・金子昌充・橋詰 保:「Al 薄膜を用いた表面プロセスによる AlGaIn ショットキー界面のリーク電流制御」, 信学技報, Vol.106, No.47, pp.91-94 (2006-5)
- (8) S. Karmalkar, N. Satyan, and D. M. Sathaiya: “On the Resolution of the Mechanism for Reverse Gate Leakage in AlGaIn/GaN HEMTs”, IEEE Electron Device Letters, Vol.27, No.2, pp.87-89 (2006-2)
- (9) W. Saito, Y. Takada, M. Kuraguchi, K. Tsuda, and I. Omura: “Recessed-Gate Structure Approach Toward Normally Off High-Voltage AlGaIn/GaN HEMT for Power Electronics Applications”, IEEE Trans. Electron Devices, Vol.53, No.2, pp.356-362 (2006-2)
- (10) S. Iwakami, O. Machida, Y. Izawa, R. Baba, M. Yanagihara, T. Ehara, N. Kaneko, H. Goto, and A. Iwabuchi: “Evaluation of AlGaIn/GaN Heterostructure Field-Effect Transistors on Si Substrate in Power Factor Correction Circuit”, Jpn. J. Appl. Phys., Vol.46, No.24, pp.L721-L723 (2007)
- (11) 猪澤道能・町田 修:「高耐圧 GaN デバイスのスイッチング電源への搭載」, サンケン技報, Vol.39, pp.43-46 (2007-12)

馬 場 良 平

(非会員) 1978 年 5 月生。2002 年 3 月, 東京理科大学大学院材料工学科修士課程修了。同年 4 月, サンケン電気 (株) 入社。主として窒化ガリウム系電子デバイスの開発に従事。

町 田 修

(非会員) 1968 年 7 月生。1993 年 3 月, 長岡技術科学大学院電子機器工学専攻修了。同年サンケン電気 (株) 入社。主として化合物半導体高周波増幅器の開発をへて, GaN on Si 電子デバイスの研究開発に従事。

金 子 信 男

(非会員) 1969 年 3 月生。1994 年 3 月, 九州大学大学院総合理工学研究科修士課程修了。同年サンケン電気 (株) 入社。主として高周波増幅器, 高周波・高耐圧デバイスの開発をへて, GaN on Si 電子デバイスの開発に従事。

岩 瀬 昭 夫

(非会員) 1958 年生。1982 年 3 月, 東京電機大学応用理化学科卒業。同年サンケン電気 (株) 入社。主としてディスクリットデバイス及びパワー IC プロセスデバイスの開発に従事。現在, 先行技術開発統括部長。

矢 野 浩 司

(正員) 1964 年 7 月生。1988 年 3 月, 静岡大学電子工学科卒業。93 年 3 月同大学博士課程修了。同年山梨大学工学部助手。1999 年~2000 年カナダ・トロント大学客員研究員。2006 年より助教授を経て現在准教授。Si および化合物半導体電力用半導体素子の設計およびプロセスに関する研究に従事。工学博士。

松 本 俊

(非会員) 1946 年 11 月生。1969 年 3 月, 東京大学電子工学科卒業, 74 年 3 月同電子工学専攻博士課程修了。同年山梨大学電子工学科講師, 助教授を経て現在教授。化合物半導体の結晶成長と電子光物性の研究に従事。元応用物理学会理事, 分科会・研究会幹事長。工学博士。