

# 低ゲートリーク電流Siイオン注入 GaN/AlGaN/GaN HEMTの研究

田島, 卓 / 野本, 一貴 / Satoh, Masataka / 中村, 徹 /  
Nakamura, Tohru / Mishima, Tomoyoshi / 三島, 友義 /  
Tajima, Taku / 佐藤, 政孝 / Nomoto, Kazuki

---

(出版者 / Publisher)

電子情報通信学会

(雑誌名 / Journal or Publication Title)

電子情報通信学会技術研究報告. ED, 電子デバイス / 電子情報通信学会技術研究  
報告. ED, 電子デバイス

(号 / Number)

95

(開始ページ / Start Page)

71

(終了ページ / End Page)

74

(発行年 / Year)

2007-06-08

# 低ゲートリーク電流 Si イオン注入 GaN/AlGaIn/GaN HEMT の研究

野本 一貴<sup>†</sup> 田島 卓<sup>†</sup> 三島 友義<sup>‡</sup> 佐藤 政孝<sup>†</sup> 中村 徹<sup>†</sup>

<sup>†</sup>法政大学マイクロ・ナノテクノロジー研究センター 〒184-0003 東京都小金井市緑町 3-11-15

<sup>‡</sup>日立電線株式会社 〒300-0026 茨城県土浦市木田余町 3550

E-mail: <sup>†</sup> nomo@gs-eng.hosei.ac.jp, <sup>‡</sup> mishima.tomoyoshi@hitachi-cable.co.jp

あらまし 本研究では低ゲートリーク電流Siイオン注入GaN/AlGaIn/GaN HEMTの作成を行った。アンドープ GaN/AlGaIn/GaNのソース・ドレイン電極下に選択的に高濃度イオン注入を行いオン抵抗の低減を図った。また同時に、直流特性の評価も行った。注入エネルギー80 keV、実効注入量  $1.0 \times 10^{15}/\text{cm}^2$  のときイオン注入を行っていないものと比べて、オン抵抗は 26.2 から 4.2  $\Omega \cdot \text{mm}$  と減少した。このとき、最大飽和電流、相互コンダクタンスはそれぞれ 284 から 723 mA/mm、48 から 147 mS/mmへと増加した。

キーワード 窒化ガリウム, イオン注入, 高電子移動度トランジスタ

## Ion-Implanted GaN/AlGaIn/GaN HEMTs with Extremely Low Gate Leakage Current

Kazuki NOMOTO<sup>†</sup> Taku TAJIMA<sup>†</sup> Tomoyoshi MISHIMA<sup>‡</sup>

Masataka SATOH<sup>†</sup> and Tohru NAKAMURA<sup>†</sup>

<sup>†</sup>Department of EECE and Research Center for Micro-Nano Technology, Hosei University 3-11-15 Midori-cho, Koganei, Tokyo, 184-0003 Japan

<sup>‡</sup>R&D Group, Hitachi Cable Ltd. Kidamari-cho, Tsuchiura, Ibaraki 300-0026 Japan

E-mail: <sup>†</sup> nomo@gs-eng.hosei.ac.jp, <sup>‡</sup> mishima.tomoyoshi@hitachi-cable.co.jp

**Abstract** We were demonstrated the realization of compatibility of extremely low gate leakage current and low source resistance with Si ion-implanted GaN/AlGaIn/GaN surface-stabilized high-electron mobility transistor (HEMT) without any recess etching process. The source/drain regions were formed using Si ion implantation into undoped GaN/AlGaIn/GaN on sapphire substrate. Using ion implantation into source/drain regions with energy of 80 keV, the performances were significantly improved. On-resistance reduced from 26.2 to 4.2  $\Omega \cdot \text{mm}$ . Saturation drain current and maximum transconductance increased from 284 to 723 mA/mm and from 48 to 147 mS/mm.

**Keyword** GaN/AlGaIn/GaN, Ion Implantation, HEMT

### 1. はじめに

ワイドバンドギャップ半導体はSiやGaAsなどに比べて禁制帯幅が大きいだけでなく、絶縁破壊電界、電子の飽和ドリフト速度、熱伝導度が大きいなどの優れた物性値を有している。これらの特徴は電子デバイス特性に大いに有効であり、ハイパワー動作、高速、低損失、高温下での動作、また、放射線照射下などの過酷環境下での動作が可能となっている。本研究で用いている窒化物半導体GaNはGaAs等の他のIII-V族化合物半導体と同様、高移動度の二次元電子ガスなどのヘテロ接合特性が利用可能である。このことから、窒化物半導体トランジスタは高電圧で動作する高周波パワーデバイスとしての応用が期待されている<sup>(1)</sup>  
<sup>(2)</sup>。

また、GaNはSiやGaAsと比較して約10倍高い絶縁破壊電界強度  $3.0 \times 10^6 \text{ V/cm}$  と  $2.0 \times 10^7 \text{ cm/s}$  を超える高電界ドリフト速度を有するため、従来の電界効果トランジスタで見られた動作電圧と遮断周波数のトレードオフを大きく改善する。さらに、AlGaIn/GaNヘテロ接合界面には窒化物半導体材料系の特徴である分極効果によって、 $10^{13} \text{ cm}^{-2}$  以上の高いキャリアが形成される。これら高周波・高出力密度動作の特徴は、同相動作可能な素子寸法が小さくなる高周波領域で特に有効となる。しかし、これらの優れた特性がもたらす窒化物高周波パワーデバイスの高電圧・高出力動作による課題も少なくない。高出力故の自己発熱と電流コラプスの改善が大きな課題としてあげられる。電流コラプスの主な原因としてAlGaIn、GaN結晶中の深い準位とAlGaIn表面の準位の存在があげられる。この改善策に

SiN膜をAlGaIn表面保護膜として用いることで電流コラプスが大幅に低減することは明らかとなっている<sup>(3)</sup>。しかし、SiN保護膜を用いた場合、電流コラプスは大幅に抑制できるが、窒化物半導体の特徴である耐圧が大きく低下してしまう。現状ではこのトレードオフの関係を解決する手法に、電界集中を緩和するための電極構造を工夫したフィールドプレート電極構造<sup>(4)</sup>と窒化物半導体結晶構造を工夫したGaInキャップ構造<sup>(5)</sup>があげられる。本研究では、電流コラプスだけでなくゲートリーク電流の低減、イオン注入によるソースおよびドレイン領域の直列抵抗の低減<sup>(6-7)</sup>にも有効であるアンドープGaInキャップ構造を用いた。

この構造をデバイスに用いるには電極形成の際に非常に精度の高いドライエッチング技術が必要となる。また、形成時のプラズマによるダメージの導入は新たな準位を形成するなど問題も多くなってくる。そこで私たちは、Si集積回路で広く用いられているイオン注入技術を応用することによりソース及びドレイン領域に高濃度層を選択的に形成し、オン抵抗の低減を行った。本報告では、Ion-Implanted (I/I) GaN/AlGaIn/GaN HEMTを作成し、その電気特性について検討した結果について述べる。

## 2. デバイス構造

試料は(0001)サファイア基板上に有機金属気相成長法(MOVPE法)でアンドープGaNを2  $\mu\text{m}$ 、 $\text{Al}_{0.25}\text{Ga}_{0.75}\text{N}$ を25 nm及び、最表面にショットキー層となるアンドープGaNを5 nm成長させた基板を用いた(図1参照)。イオン注入時の表面結晶欠陥の導入、表面汚染を防ぐため、注入時の表面保護膜としてPECVDを用いてSiNxを25 nm堆積させた。イオン注入はSiNx膜を通して注入を行った。ソース、ドレイン電極下の高濃度領域形成にはSiイオンを $1.6 \times 10^{15}/\text{cm}^2$ 、 $1.0 \times 10^{15}/\text{cm}^2$ 注入し、注入エネルギーはそれぞれ、30 keV、80 keVとした。イオン注入時にSiNx層を通して行っているため、実効注入量が $1.0 \times 10^{15}/\text{cm}^2$ となるように注入プロファイルを設定した(図2参照)。注入後の活性化熱処理は窒素雰囲気中にて1200°C、2分間行った。オーミック電極にはTi/Al=30/200 nm堆積させ、その後、窒素雰囲気中において550°C、1分間の熱処理を行った。このときのコンタクト抵抗はそれぞれ0.08  $\Omega \cdot \text{mm}$ 、0.1  $\Omega \cdot \text{mm}$ となった。ゲート電極形成には、Ni/Al=50/200 nmを用い、電極間保護膜はPECVDを用いてSiNxを50 nm堆積した。今回特性評価に用いたデバイス寸法は、ゲート長1  $\mu\text{m}$ 、ゲート幅100  $\mu\text{m}$ ゲート・ソース、ゲート・ドレイン間距離はそれぞれ1  $\mu\text{m}$ 、3  $\mu\text{m}$ である。

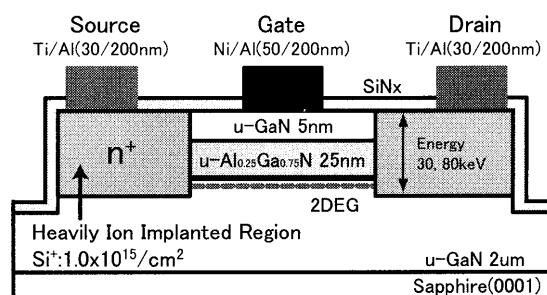


図1 I/I GaN/AlGaIn/GaN HEMTの断面図

Fig. 1. Schematic diagram of I/I GaN/AlGaIn/GaN HEMTs

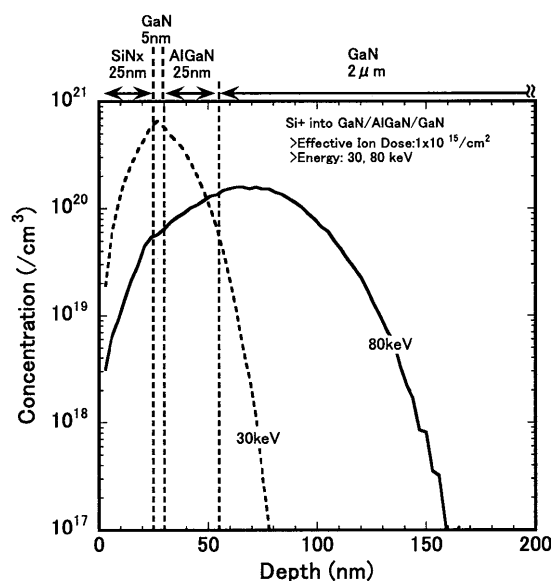


図2 SRIM シミュレーションイオン注入プロファイル

Fig. 2. Simulated impurity profiles of Si ion implanted source/drain regions.

## 3. 実験結果

アンドープ GaIn を最表面層に成長させた構造を用いて電気特性の効果を明確にするため、ソース、ドレイン領域をイオン注入で形成した I/I AlGaIn/GaN HEMT、I/I GaN/AlGaIn/GaN HEMT の作成を行った。最上層にアンドープ GaIn を形成することで、通常の AlGaIn/GaN HEMT よりもコンタクト抵抗が0.13  $\Omega \cdot \text{mm}$  から0.1  $\Omega \cdot \text{mm}$ へと低減でき、さらに逆方向ゲートリーク電流が0.1 mA/mmのときの逆方向電圧が40 V から280 Vへとリーク電流の低減が得られた(表1参照)。

次に、GaN/AlGaIn/GaNにSiイオンをそれぞれ注入エネルギー30 keV、80 keV、実効注入量 $1.0 \times 10^{15}/\text{cm}^2$ で注入し、TLM法を用いて電気特性の評価を行った。80 keVのシート抵抗は525  $\Omega/\square$ から164  $\Omega/\square$ と減少したが、30 keVの時のシート抵抗は542  $\Omega/\square$ と増加した。しかし、注入エネルギーが30 keVの

表 1 AlGaIn と GaN/AlGaIn/GaN 基板の電気特性評価

Table. 1. Comparison of DC characteristics of AlGaIn/GaN and GaN/AlGaIn/GaN

| Material         | Sheet Resistance $\rho_s$<br>[ $\Omega/\square$ ] |            | Specific<br>Contact Resistance<br>$\rho_c$ [ $\Omega\cdot\text{cm}^2$ ] | Contact<br>Resistance<br>$R_c$ [ $\Omega\cdot\text{mm}$ ] | Gate<br>Leakage<br>$V_l$ [V]* |
|------------------|---------------------------------------------------|------------|-------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------|-------------------------------|
|                  | 2DEG                                              | I/I Region |                                                                         |                                                           |                               |
| u-AlGaIn/GaN     | 520                                               | 199        | $1.3 \times 10^{-6}$                                                    | 0.13                                                      | 40                            |
| u-GaN/AlGaIn/GaN | 525                                               | 164        | $5.7 \times 10^{-7}$                                                    | 0.10                                                      | >280                          |

\*Ion Implantation:  $\text{Si}^+ 1.0 \times 10^{15} / \text{cm}^2$  at 80keVGate leakage  $V_l$  [V] is defined at gate leakage current of 1  $\mu\text{A}$ 

ときのコンタクト抵抗は  $0.08 \Omega\cdot\text{mm}$  となり、80 keV よりも減少した。この原因として、シート抵抗においてはイオン注入深さが浅い場合、試料表面近傍の不純物イオン注入量が大幅に増加し、高温熱処理による結晶回復が図れなかったことに起因すると考えられる。このときの活性化率は 5 % 程度と非常に低くなっている。しかし、注入エネルギーが 30 keV とときは 80 keV ときに比べて電極進入長  $L_T$  が  $0.6 \mu\text{m}$  から  $0.15 \mu\text{m}$  と減少するため、これに応じてコンタクト抵抗も減少する。また、イオン注入エネルギーを 80keV、活性化熱処理を  $1200^\circ\text{C}$ 、 $\text{N}_2$  雰囲気中で行い、注入層のシート抵抗及びシートキャリア濃度の実効注入量依存性を評価した。実効注入量の増加に伴いシート抵抗は低減し、シートキャリア濃度は増加する。しかし、活性化率はイオン注入量の増加に伴い増加したが、 $1.0 \times 10^{15} / \text{cm}^2$  以降で減少した。これは注入時に導入された結晶欠陥を回復させるのに熱処置温度  $1200^\circ\text{C}$  では低く、回復しきれなかったと考えられる。

アンドープ GaN/AlGaIn/GaN の移動度は  $1500 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$  となっており、 $1200^\circ\text{C}$  の高温熱処理のみ行った試料では  $1400 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$  となるため、高温熱処理による 2DEG 層への影響は非常に少ないと言える。イオン注入を行った結果、少ない注入量であっても注入層の移動度が未注入の場合に比べ桁以上減少する。しかし、本研究に用いたデバイス構造では、選択的に高濃度のイオン注入を行うことで、ゲート電極下の未注入チャンネル層は高移動度を維持させたまま、ソース、ドレイン領域の高濃度層を形成できるため、オン抵抗が減少でき、デバイスの大幅な向上が実現できる。

以上の結果について、寄生ソース抵抗大部分はヘテロ界面のエネルギー障壁によるものと考えられる。本研究では、注入エネルギー 80 keV の場合がヘテロ界面に Si 濃度のピークがあるため、高温アニールによって鋭いヘテロ界面を乱し、エネルギー障壁を下げると思われる。また、イオン注入によって高濃度化することで、不純物ドーピングで形成された高濃度層よりもコンタクト抵抗が低くなることが予測される。

最後に I/I GaN/AlGaIn/GaN HEMT と従来のイオン注入を用いていないデバイスで DC 特性の比較を行った。注入エネルギー 80 keV の時の飽和ドレイン電流はゲート電圧  $V_g = +1 \text{ V}$  で  $723 \text{ mA/mm}$  および最大相互コンダクタンスは  $147 \text{ mS/mm}$  となった (図 3, 4 参照)。

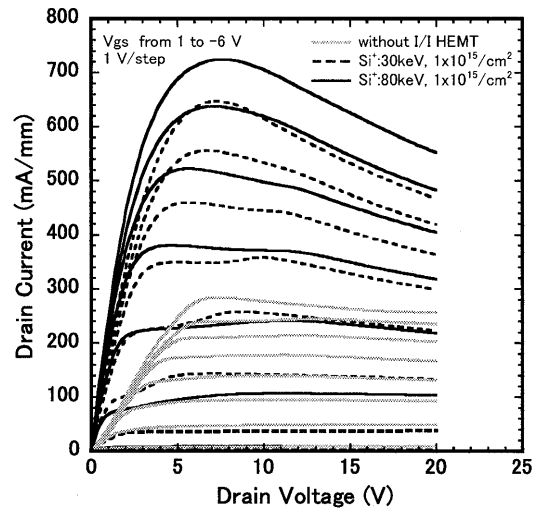


図 3 電流－電圧特性

Fig. 3. Id-Vd characteristics of GaN/AlGaIn/GaN HEMTs with and without ion implantation.

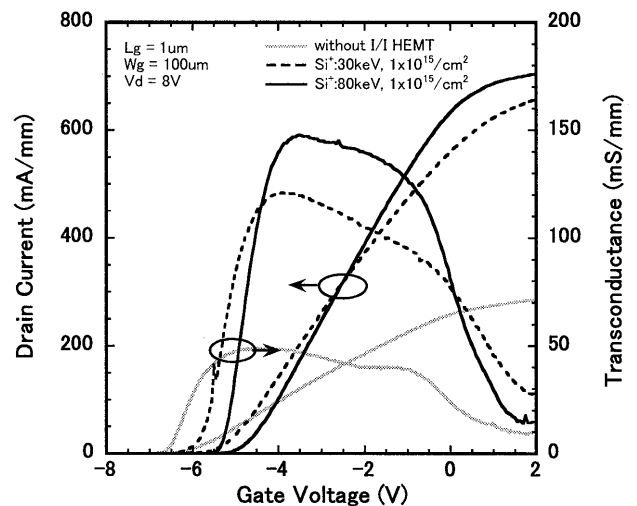


図 4 相互コンダクタンス

Fig. 4. transconductance of GaN/AlGaIn/GaN HEMTs with and without ion implantation.

イオン注入を行っていないときの特性と比較して大幅な特性の向上がそれぞれに見られた。また、オン抵抗は  $26.2 \Omega \cdot \text{mm}$  から  $4.2 \Omega \cdot \text{mm}$  と減少した。以上のことからイオン注入を用いたことによって寄生ソース抵抗が低減され、デバイス特性の向上に繋がったといえる。

さらに、オン抵抗を成分分離することでよりイオン注入の効果を明確にした(図5参照)。イオン注入エネルギーが大きいとシート抵抗が減少することからそれに比例してイオン注入領域の抵抗( $R_{\text{imp}}$ )が減少した。また、ソース抵抗、ドレイン抵抗の減少も顕著であった。

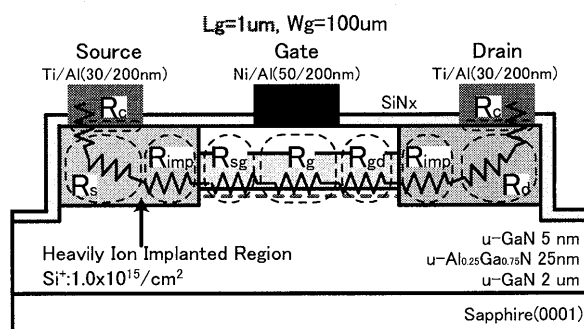


図5 I/I GaN/AlGaIn/GaN HEMT のオン抵抗成分分離

Figure 5. Components of on-resistance of I/I GaN/AlGaIn/GaN HEMTs.

#### 4. 結論

本研究において我々は、I/I GaN/AlGaIn/GaN HEMT を作成した。デバイス特性の向上を図り、最表面層にアンドープ GaN を成長させることでコンタクト抵抗の低減、飽和ドレイン電流・相互コンダクタンスの増加、さらには、ゲートリーク電流の低減を実現した。このことより、イオン注入技術をデバイスへ応用することで、高性能なデバイスが実現できる。

#### 文 献

- [1] T. Kikkawa, M. Nagahara, N. Adachi, S. Yokokawa, S. Kato, M. Yokoyama, M. Kanamura, Y. Yamaguchi, N. Hara, and K. Joshin : "T High-power and high-efficiency AlGaIn/GaN HEMT operated at 50 V drain bias voltage", *Radio Frequency Integrated Circuits (RFIC) Symposium*, pp.167-170, 2003.
- [2] Takashi Inoue, Yuji Ando, Hironobu Miyamoto, Tatsuo Nakayama, Yasuhiro Okamoto, Kohji Hataya, and Masaaki Kuzuhara : "30GHz-band 5.8W high-power AlGaIn/GaN heterojunction-FET", *Microwave Symposium Digest, 2004 IEEE MTT-S International*, vol. 3, No.6-11, pp.1649-1652, 2004.
- [3] Y. Kamo, T. Kunii, H. Takeuchi, Y. Yamamoto, M. Totsuka, T. Shiga, H. Minami, T. Kitano, S. Miyakuni, T. Oka, A. Inoue, T. Nanjo, H. Chiba, M. Suita, T. Oishi, Y. Abe, Y. Tsuyama, R. Shirahana, H. Ohtsuka, K. Iyomasa, K. Yamanaka, M. Hieda, M. Nakayama, T. Ishikawa, T. Takagi, K. Marumoto and Y. Matsuda : "AC-Band AlGaIn/GaN HEMT with Cat-CVD SiN Passivation Developed for an Over 100 W Operation", *Microwave Symposium Digest, 2005 IEEE MTT-S International*.
- [4] A. Koudymov, V. Adivarahan, J. Yang, G. Simin and M. Asif Khan : "Mechanism of Current Collapse Removal in Field-Plated Nitride HFETs", *IEEE Electron Device Letters*, vol. 26, No.10, pp.704-706, 2005.
- [5] T. Kikkawa, M. Nagahara, N. Okamoto, Y. Tatenno, Y. Yamaguchi, N. Hara, K. Joshin, and P. M. Asbeck : "Surface-Charge Controlled AlGaIn/GaN-Power HFET without Current Collapse and Gm Dispersion", *Electron Devices Meeting, 2001. IEDM Technical Digest. International*, pp.25.4.1-25.4.4, 2001.
- [6] Felix Recht, L. McCarthy, S. Rajan, A. Chakraborty, C. Poblentz, A. Corrion, J. S. Speck, and U. K. Mishra, "Nonalloyed Ohmic Contacts in AlGaIn/GaN HEMTs by Ion Implantation With Reduced Activation Annealing Temperature," *IEEE Electron Device Letters*, vol. 27, No.4, pp.205-207, 2006.
- [7] K. Nomoto, T. Tajima, T. Mishima, M. Satoh, T. Nakamura, "DOUBLE-ION-IMPLANTED GaN MESFETs WITH EXTREMELY LOW SOURCE/DRAIN RESISTANCE," *Materials Research Society 2005 Fall Meeting*, 0892-FF13-06, 2005.