

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 5 月 21 日現在

機関番号：11301

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2012～2014

課題番号：24560392

研究課題名(和文) GaN系HEMTにおける電子速度の詳細評価の研究

研究課題名(英文) Detail evaluation of electron velocity in GaN HEMTs

研究代表者

末光 哲也 (Suemitsu, Tetsuya)

東北大学・電気通信研究所・准教授

研究者番号：90447186

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,100,000円

研究成果の概要(和文)：窒化ガリウム(GaN)系高電子移動度トランジスタ(HEMT)において、そのミリ波・サブミリ波素子としてのポテンシャルを予測する上で貴重な情報である、ドレイン端における電子速度を評価した。異なる形状のゲート・フィールドプレート電極を持つゲート長180nmのHEMTについてゲート電極直下の電子走行時間を求め、ドレイン側への空乏領域の広がり分の補正を確認すると共に、電子速度を $1.21 \sim 1.27 \times 10^7$ cm/s と評価した。

研究成果の概要(英文)：The electron velocity in gallium nitride (GaN) high electron mobility transistors (HEMTs), which is one of important parameters to estimate the high-frequency characteristics of the transistors, is evaluated by means of the gate delay time analysis in the samples with different gate/field plate structures. The drain depletion region is clearly separated from the gate depletion region through the gate delay time analysis of these samples. The result suggests an electron velocity of $1.21\text{-}1.27 \times 10^7$ cm/s in 180-nm-gate GaN HEMTs.

研究分野：電子デバイス工学

キーワード：窒化物半導体 電界効果トランジスタ マイクロ波・ミリ波

1. 研究開始当初の背景

窒化物半導体 GaN が高周波用電子デバイスの材料として注目されるようになった理由の一つが、高電界において GaAs や InGaAs と比較しても高い電子飽和速度を示すところにあったが、現実に作製された GaN 系 HEMT では期待されたほどの電子速度が実現できていないのが現状である。GaN における電子輸送現象をデバイスシミュレーションによって解析した報告はあるが、デバイス特性に直結する議論は乏しく、デバイス特性から見積もられる電子速度が微視的に見た電子の輸送におけるどの速度に対応するのか明確な理論は確立されていない。

2. 研究の目的

GaN 系 HEMT において、そのミリ波・サブミリ波素子としてのポテンシャルを予測する上で貴重な情報である、ドレイン端における電子速度を見積もる。

3. 研究の方法

ソース側とドレイン側で異なった構造のゲート電極をもつ GaN 系 HEMT を作成し、高周波測定の結果よりゲート遅延時間解析を行い、電子が走行するゲート空乏領域長とその領域で生じるキャリア走行遅延時間を正確に見積もる。得られた結果より、電子速度を評価する。

4. 研究成果

本研究の基礎となる、GaN 系高電子移動度トランジスタ (HEMT) の基本作製技術を確立した。具体的には、まずサファイア基板に標準的な AlGaIn/GaN ヘテロ構造を持つ試料を適当な大きさに切り出し、誘導結合型プラズマエッチング技術を用いて AlGaIn/GaN ヘテロ構造をエッチングし、素子間分離をする工程を確立した。次に、AlGaIn/GaN ヘテロ構造表面にオーミック電極を形成するために、電極金属の構成およびアニール温度・時間等の条件を最適化し、オーミック接合を実現する工程を確立した。更に AlGaIn 表面へのショットキー接合により、ゲート電極を形成する工程を確立し、HEMT 作製のプロセスを完成させた。続いて、AlGaIn/GaN HEMT のパイロット試作を実施し、完成した素子の電気特性を評価することにより典型的なトランジスタ特性が得られることを確認した。更に、表面パッシベーション膜としてプラズマ化学気相成膜法により堆積した SiCN を適用することによって、GaN 系材料で問題となる電流コラプス現象を低減出来ることを確認した。この SiCN 膜を GaN 系 HEMT のパッシベーションに応用してその効果を確認したのは本研究が初めてであり、その成果を論文化した。以上の技術を用いて、ゲート長 0.3 ミクロンの AlGaIn/GaN HEMT を作製し、電子速度の評価に不可欠な高周波 S パラメータ評価の実施まで

到達した。

正確なゲート遅延時間解析を可能にするためには、試作した HEMT に発現する電流コラプス現象を解消する必要がある。電流コラプス現象は、ゲート電極端への電界集中によって電子が AlGaIn バリア層表面の深い準位に捕獲されることによって生じる。これを解消するため、フィールドプレート構造を導入した GaN 系 HEMT を検討した (図 1)。中でも特に電界集中緩和効果の高い傾斜型フィールドプレート構造を SiCN 誘電体膜を用いて作成する手法を確立し、電流コラプス現象を解消することに成功した。

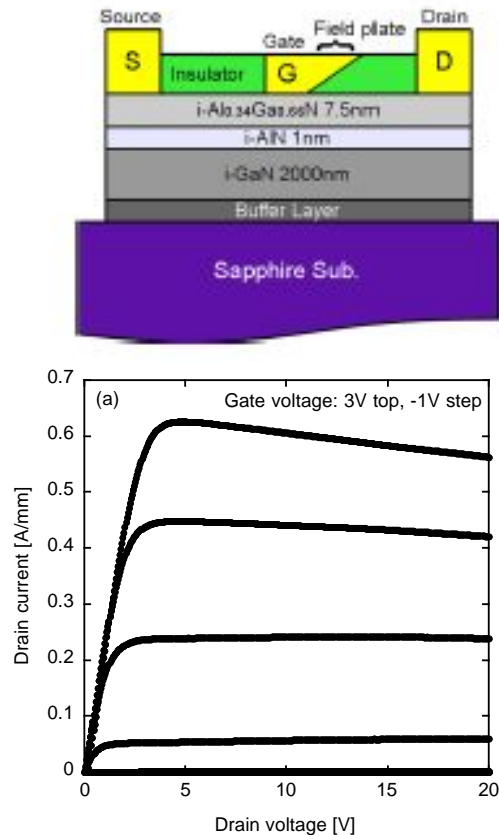


図 1. 傾斜型フィールドプレートを持つ GaN 系 HEMT の断面図および電流-電圧特性

この傾斜型フィールドプレート構造を利用して、異なるゲート・フィールドプレート構造を持つ GaN 系 HEMT についてゲート遅延時間解析を実施し、キャリア空乏領域のドレイン側への広がり考慮した実効ゲート長を見積り、電子速度を評価した。

比較に用いた素子は、傾斜型フィールドプレート構造を持つ HEMT に加えて、それぞれ 3 段、4 段のフィールドプレートを持つ HEMT である。電気特性を比較すると、3 段、4 段フィールドプレート構造では僅かながら電流コラプスが確認されたが、傾斜型フィールドプレートでは電流コラプスは観測されなかった。また、ドレイン耐圧は、3 段、4 段、傾斜型の順番で高くなり、傾斜型フィールドプレートによって 66% の耐圧向上が確認できた (図 2)。これらの効果は、フィールドプ

レート形状によってより効果的にゲート端への電界集中が抑えられたことを示唆している。

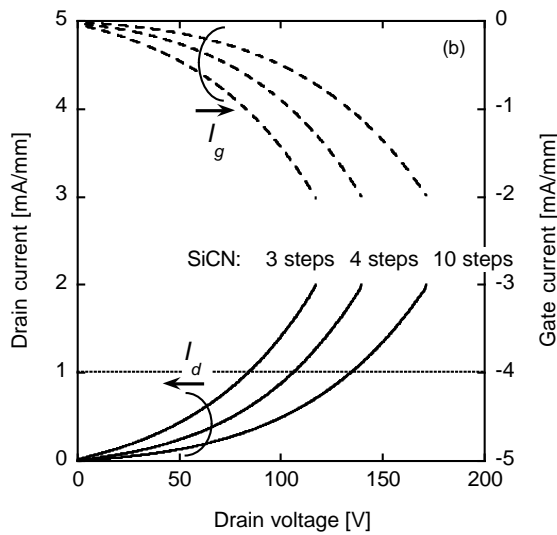


図 2. 3 段、4 段、傾斜型フィールドプレートを持つ HEMT のピンチオフ時のドレイン電流及びゲート電流

HEMT における電子速度は、ゲート下のキャリア空乏領域の長さを真性ゲート遅延時間で割ることによって求められる。キャリア空乏領域の長さは、ドレイン電圧の影響でゲート端からドレイン側へ広がる空乏領域を考慮する必要がある。先に紹介したフィールドプレート形状が耐圧に影響したことは、電界分布の違いによってドレイン側への空乏領域の広がり方に差が生じたことを示唆している。この差に着目して、ゲート電極直下におけるキャリア電子の走行時間をそれぞれの素子について求め、キャリア速度を見積もった。3 段、および傾斜型フィールドプレートを持つゲート長 180nm の HEMT についてゲート電極直下の電子走行時間を求めると、3 段型で 1.49ps、傾斜型で 1.42ps とほぼ等しい値を得られ(図 3) ドレイン側への空乏領域の広がり分の補正を確認した。この走行時間とゲート長から、電子速度は、 $1.21 \sim 1.27 \times 10^7 \text{cm/s}$ と評価した。

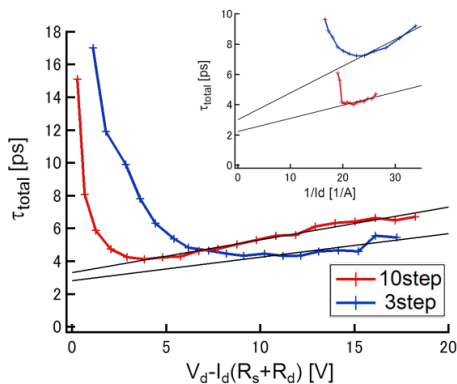


図 3. 3 段および傾斜型フィールドプレートを持つ HEMT の遅延時間解析

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 3 件)

1. K. Kobayashi, S. Hatakeyama, T. Yoshida, D. Piedra, T. Palacios, T. Otsuji, and T. Suemitsu, "Current collapse suppression in AlGaIn/GaN HEMTs by means of slant field plates fabricated by multi-layer SiCN," Solid-State Electron., vol. 101, pp. 63-69, 2014 (peer reviewed).
2. K. Kobayashi, S. Hatakeyama, T. Yoshida, Y. Yabe, D. Piedra, T. Palacios, T. Otsuji, and T. Suemitsu, "Improved breakdown voltage and RF characteristics in AlGaIn/GaN high-electron-mobility transistors achieved by slant field plates," Appl. Phys. Express, vol. 7, pp. 096501-1-4, 2014 (peer reviewed).
3. K. Kobayashi, M. Kano, T. Yoshida, R. Katayama, T. Matsuoka, T. Otsuji, T. Suemitsu, "AlGaIn/GaN MIS-gate HEMTs with SiCN gate stacks," Physica Status Solidi (c), vol. 10, pp. 790-793, 2013 (peer reviewed).

[学会発表](計 11 件)

1. N. Yasukawa, S. Hatakeyama, T. Yoshida, T. Kimura, T. Matsuoka, T. Otsuji, and T. Suemitsu, "Drain depletion length in InAlN/GaN MIS-HEMTs with slant field plates," will be presented at 42nd International Symposium on Compound Semiconductors, Santa Barbara, CA, USA, Jun. 28-Jul. 2, 2015.
2. T. Suemitsu, K. Kobayashi, S. Hatakeyama, N. Yasukawa, T. Yoshida, T. Otsuji, D. Piedra, and T. Palacios, "A new process approach for slant field plates in GaN-based HEMTs," 7th International Symposium on Advanced Plasma Science and its Applications for Nitride and Nanomaterials (ISPlasma), Nagoya, Japan, MAR 26-31, 2015, pp. B2-1-02 (Invited talk).
3. 安川奈那, 畠山信也, 吉田智洋, 尾辻泰一, 末光哲也, "InAlN/GaN HEMTs における傾斜型フィールドプレートによるドレイン空乏領域長への影響," 第 62 回応用物理学会春季学術講演会, 東海大学, 平塚, MAR 11-14, 2015.
4. 畠山信也, 小林健悟, 吉田智洋, 尾辻泰一, 末光哲也, "傾斜型フィールドプレートを用いた AlGaIn/GaN HEMT の RF 特性," 第 75 回応用物理学会秋季学術

- 講演会, 北海道大学, SEP 16-20, 2014.
5. S. Hatakeyama, K. Kobayashi, T. Yoshida, T. Otsuji, and T. Suemitsu, "RF characteristics of AlGa_N/Ga_N HEMTs with slant field plates," 41st International Symposium on Compound Semiconductors (ISCS), Montpellier, France, MAY 11-15, 2014, pp. Th-C1-6.
 6. 小林健悟, 畠山信也, 吉田智洋, 矢部裕平, D. Piedra, T. Palacios, 尾辻泰一, 末光哲也, "多層 SiCN を用いて作製した傾斜型フィールドプレートによる AlGa_N/Ga_N HEMT における電流コラプスの抑制," 第 61 回応用物理学会春季学術講演会, 青山学院大学, 相模原, MAR 17-20, 2014.
 7. 畠山信也, 小林健悟, 吉田智洋, 尾辻泰一, 末光哲也, "InAlN/Ga_N HEMTs と AlGa_N/Ga_N HEMTs における相互コンダクタンスの周波数分散," 第 61 回応用物理学会春季学術講演会, 青山学院大学, 相模原, MAR 17-20, 2014.
 8. K. Kobayashi, S. Hatakeyama, T. Yoshida, D. Piedra, T. Palacios, T. Otsuji, and T. Suemitsu, "Current collapse suppression in AlGa_N/Ga_N HEMTs by means of slant field plates fabricated by multi-layer SiCN," International Semiconductor Device Research Symposium (ISDRS), Bethesda, MD, USA, DEC 11-13, 2013, pp. WP2-03.
 9. S. Hatakeyama, K. Kobayashi, T. Yoshida, T. Otsuji, and T. Suemitsu, "Fabrication of slant field plates for AlGa_N/Ga_N HEMTs by multi-layer SiCN," 10th Topical Workshop on Heterostructure Microelectronics (TWHM), Hakodate, Japan, SEP 2-5, 2013, pp. 129-130.
 10. 小林健悟, 吉田智洋, 畠山信也, 尾辻泰一, 末光哲也, "多層 SiCN 絶縁膜による AlGa_N/Ga_N HEMT 用傾斜フィールドプレートの形成," 電子情報通信学会総合大会, 岐阜, MAR 19-22, 2013.
 11. 小林健悟, 吉田智洋, 尾辻泰一, 片山竜二, 松岡隆志, 末光哲也, "SiCN ゲート絶縁膜を用いた AlGa_N/Ga_N MIS ゲート HEMT," 電子情報通信学会電子デバイス研究会, 東京, JAN 18, 2013.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

末光 哲也 (SUEMITSU, Tetsuya)
東北大学・電気通信研究所・准教授
研究者番号: 90447186