

機関番号：13903

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2011～2013

課題番号：23360154

研究課題名(和文) シリコン基板上の選択再成長による窒化ガリウム系ノーマリオフ型デバイスに関する研究

研究課題名(英文) Study on GaN-based normally-off device on Si substrate using selective area growth

研究代表者

江川 孝志 (Egawa, Takashi)

名古屋工業大学・工学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：00232934

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 15,000,000円、(間接経費) 4,500,000円

研究成果の概要(和文)：有機金属気相成長(MOCVD)法を用いてシリコン基板上AlGa<sub>N</sub>(5nm)/Ga<sub>N</sub>ヘテロエピタキシャル層上に、選択的にAlGa<sub>N</sub>層(15nm)を再成長し、ノーマリオフ特性(しきい値電圧が正)を目的にしたエビ構造を作製した。選択再成長のマスクはSiO<sub>2</sub>を用い、リソグフィーとパッファードフッ酸によるエッチングを行うことで再成長領域を形成した。MOCVDにより、AlGa<sub>N</sub>層(15nm)を再成長し、アクセス領域への2DEGの形成を行った。選択再成長技術を用いて作製したトランジスタは、最大ドレイン電流160 mA/mm、しきい値電圧+0.4 Vのノーマリオフ特性を示した。

研究成果の概要(英文)：GaN-based HEMTs have attractive for high power switching applications. Normally-off operation was one of major requirements for AlGa<sub>N</sub>/GaN HEMTs. However, realization of normally-off operation with high drain current is difficult due to the existence of two-dimensional electron gas in heterointerface induced piezo and spontaneous polarization charges. Selective area growth (SAG) technique is one of solutions for normally-off operation.

In this study, I report normally-off AlGa<sub>N</sub>/GaN HEMTs with SAG of an AlGa<sub>N</sub> layer and deposition of an Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> film on an AlGa<sub>N</sub>/GaN heterostructure designed to be completely depleted. Adopting AlGa<sub>N</sub> regrowth in a selective area and Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> film deposition for the access region of the HEMT, the normally-off operation of AlGa<sub>N</sub>/GaN HEMT was demonstrated. The device showed the drain current density of 160 mA/mm and the threshold voltage of 0.4 V.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：電気電子工学・電子デバイス・電子機器

キーワード：有機金属気相成長法 Ga<sub>N</sub> 選択再成長 ノーマリオフ HEMT

## 1. 研究開始当初の背景

地球温暖化問題が注目され、その主要因とされる CO<sub>2</sub> の排出削減のために種々の分野で省エネルギー化が取り上げられている。このため、電気エネルギーの高効率利用が重要な課題になってきており、電気の変換や制御を行う Si パワーデバイスの一層の高性能化が要求されている。しかし、MOSFET や IGBT 等の Si デバイスに見られるように、Si の物性限界に直面し大幅な性能向上はもはや困難な状況にある。この Si の物性限界を大幅に打破できる半導体材料として、シリコンカーバイド(SiC)、窒化ガリウム(GaN)やダイヤモンド等の新しいワイドバンドギャップ半導体に大きな期待が寄せられ、国内外で活発な研究開発が進められている。特に、GaN 系材料は、結晶成長技術が進展し、青色や緑色の発光ダイオードが実用化され、発振波長 400 nm 台のレーザーダイオードが開発されている。AlGaIn/GaN HEMT は、高周波・高出力素子としてのポテンシャルが高いことが期待され、サファイア及び SiC 基板上に作製されている。しかし、AlGaIn/GaN HEMT 構造では、ピエゾ電荷によりヘテロ界面に大きな二次元電子ガスが形成されるため、ノーマリオフ型のデバイスが作製しにくいという欠点がある。最近では、チャンネル層の薄膜化や歪の制御により、この問題を解決しようとしているが十分ではない。スイッチング等のパワーデバイスへの応用を考慮すると、ノーマリオフ型が必要不可欠である。

また、GaN を用いた従来のデバイスはサファイア及び SiC 基板上に作製されてきた。放熱特性、加工性、サイズ、コスト及びエアコン用インバータ等への応用を考慮すると大口径 Si 基板上のノーマリオフ型 HEMT の実現が強く望まれている。名古屋工業大学では、従来の二段階成長法とは異なり、高温成長した AlN 中間層を用いて大口径(4インチ) Si 基板上に高品質の AlGaIn/GaN HEMT 構造を成長させるヘテロエピタキシャル成長技術を確立してきた。

## 2. 研究の目的

地球温暖化問題の主要因とされる CO<sub>2</sub> の排出削減のために種々の分野で省エネルギー化が取り上げられている。従来の Si を用いた MOSFET や IGBT 等の Si デバイスでは、Si

の物性限界に直面し大幅な性能向上はもはや困難な状況にある。本研究では、コスト、サイズ、放熱性、生産性・量産性を考慮して選択再成長技術を用いて大口径 Si 基板上にノーマリオフ型 AlGaIn/GaN HEMT を実現し、低炭素社会実現のための先導的な研究開発を行うことである。

## 3. 研究の方法

### (1) 選択再成長技術の確立及び再成長界面の評価

SiO<sub>2</sub> マスクの形状を変化させて選択再成長を行い、選択再成長領域(面積、形状)と結晶品質の関係を明らかにする。また、SiO<sub>2</sub> をマスクとした選択再成長では、マスク上には再成長せず、マスクの無い領域に選択的に再成長させる必要がある。これはマスク上での原料ガスのマイグレーションと密接な関係があるので、成長圧力を最適化する必要がある。

### (2) ノーマリオフ型 HEMT の試作

選択再成長技術を用いて Si 基板上に AlGaIn/GaN HEMT 構造を成長し、プロセス加工を行いデバイスの一次試作を行う。平成 24 年度以降の本格的なノーマリオフ型デバイス作製に向けて、デバイスの特性評価からエピ構造の問題点を明らかにする。

## 4. 研究成果

### (1) 選択再成長技術の確立及び再成長界面の評価

有機金属気相成長(MOCVD)法を用いてサファイア基板上に成長した GaN(2.0 μm)を用いて、選択再成長した時の成長速度及び表面平坦性の成長圧力(100 torr、300 torr、500 torr、760 torr)依存性を調べた。選択再成長用にマスクとしては、SiO<sub>2</sub> を用いた。また、カソードルミネッセンス(CL)法を用いて暗点欠陥の数を測定することにより、暗点欠陥密度の選択再成長面積依存性を調べた。

設計値の成長膜厚を 100 nm とした場合の選択再成長領域の端部及び中心部での膜厚は、100 torr では 263 nm、159 nm、300 torr では 511 nm、228 nm、500 torr では 407 nm、152 nm、760 torr では 346 nm、148 nm とな

った。選択再成長領域の端部において、成長膜厚が大きくなっていることから、成長速度が大きい結果が得られた。これが、マスクとして使用した  $\text{SiO}_2$  上を Ga がマイグレーションし選択再成長領域の端部に到達したためと考えられる。また、100 torr の成長圧力では、成長速度の場所依存性が小さかった。また、原子間力顕微鏡を用いた中心部の表面平坦性の測定(RMS)では、100 torr では 0.138 nm、300 torr では 0.124 nm、500 torr では 0.094 nm、760 torr では 0.165 nm となり、大きな依存性は見られなかった。

EBIC 法を用いた暗点欠陥密度の選択再成長面積依存性では、選択再成長させる面積が小さいほど、暗点欠陥密度が減少する傾向にあった。

## (2) ノーマリオフ型 HEMT の試作

有機金属気相成長(MOCVD)法を用いてシリコン基板上  $\text{AlGaN}$  (5nm) /  $\text{GaN}$  ヘテロエピタキシャル層上に、選択的に  $\text{AlGaN}$  層(15nm)を再成長し、ノーマリオフを目的にしたエピ構造を作製した。

選択再成長のマスクは  $\text{SiO}_2$  を用い、リソグラフィとバッファドフッ酸によるエッチングを行うことで再成長領域を形成した。MOCVD により、 $\text{AlGaN}$  層(15nm)を再成長し、アクセス領域への 2DEG の形成を行った。

図 1 に作製したノーマリオフ  $\text{AlGaN}/\text{GaN}$  HEMT の断面構造を示す。再成長後の  $\text{AlGaN}$  の Al 組成は 20%、膜厚は 15 nm である。ゲート幅は  $2.5 \mu\text{m}$  で、ゲートソース間・ゲートドレイン間は  $3.0 \mu\text{m}$  である。エピ上に  $\text{SiO}_2$  膜が形成されている再成長  $\text{AlGaN}$  層とゲート電極間のギャップは  $1.0 \mu\text{m}$  である。

図 2、3 に作製した HEMT の静特性と伝達特性をそれぞれ示す。 $V_g = 1.5 \text{ V}$  におけるドレイン電流は  $160 \text{ mA/mm}$  でオン抵抗は  $8.9 \Omega \cdot \text{mm}$  であった。ドレイン電流の外掃から求めたしきい値電圧  $0.4 \text{ V}$  で、ノーマリオフ特性を確認した。さらに、 $V_g = 4 \text{ V}$  において最大相互コンダクタンス  $120 \text{ mS/mm}$  を得た。空乏化した  $\text{AlGaN}/\text{GaN}$  ヘテロ構造に  $\text{AlGaN}$  を再成長させることで 2 次元電子ガス層の形成を確認した。この構造を適応したトランジスタ

を作製し、最大ドレイン電流  $160 \text{ mA/mm}$ 、しきい値電圧  $0.4 \text{ V}$  のノーマリオフ特性を確認した。

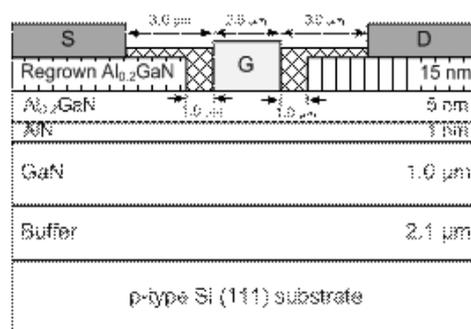


図 1 . 断面構造

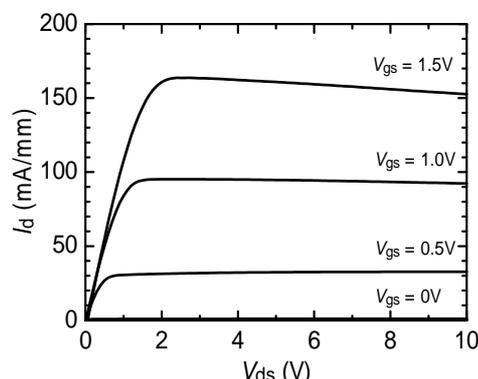


図 2 . 静特性

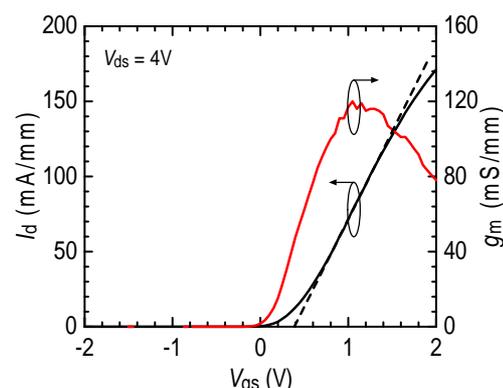


図 3 . 伝達特性

## 5 . 主な発表論文等

[雑誌論文](計 8 件)

J. J. Freedman, T. Kubo, T. Egawa, High Drain Current Density E-Mode  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{AlGaIn}/\text{GaN}$  MOS-HEMT on Si With Enhanced Power Device Figure-of-Merit ( $4 \times 10^8 \text{ V}^2 \text{ cm}^{-2}$ ), IEEE Transactions on Electron Devices, Vol. 60, No. 10, pp. 3079-3083, 2013、審査有

A. F. Wilson, A. Wakejima, T. Egawa, Origin and Appearance of Defective Pits in the Gate-Drain Region during Reliability Measurements of AlGaIn/GaN High-Electron-Mobility Transistors on Si, Appl. Phys. Express, Vol. 6, pp. 116601-1-116601-3, 2013、審査有

A. F. Wilson, A. Wakejima, T. Egawa, Influence of GaN Stress on Threshold Voltage Shift in AlGaIn/GaN High-Electron-Mobility Transistors on Si under Off-State Electrical Bias, Appl. Phys. Express, Vol. 6, pp. 086504-1-086504-4, 2013、審査有

A. F. Wilson, A. Wakejima, T. Egawa, Step-Stress Reliability Studies on AlGaIn/GaN High Electron Mobility Transistors on Silicon with Buffer Thickness Dependence, Appl. Phys. Express, Vol. 6, pp. 056501-1-056601-3, 2013、審査有

S. L. Selvaraj, A. Watanabe, A. Wakejima, T. Egawa, 1.4-kV Breakdown Voltage for AlGaIn/GaN High-Electron-Mobility Transistors on Silicon Substrate, IEEE Electron Device Letters, Vol. 33, No. 10, pp. 1375-1377, 2012、審査有

J. J. Freedman, T. Kubo, T. Egawa, Analyses of hetero-interface trapping properties in AlGaIn/GaN high electron mobility transistor heterostructures grown on silicon with thick buffer layers, Appl. Phys. Lett., Vol. 101, pp. 013506-1-013506-4, 2012、審査有

I. B. Rowena, S. L. Selvaraj, T. Egawa, Buffer Thickness Contribution to Suppress Vertical Leakage Current With High Breakdown Field (2.3 MV/cm) for GaN on Si, IEEE Electron Device Lett., Vol. 32, No. 11, pp. 1534-1536, 2011、審査有

S. L. Selvaraj, A. Watanabe, T. Egawa, Influence of deep-pits on the device characteristics of metal-organic chemical vapor deposition grown AlGaIn/GaN high-electron mobility transistors on silicon substrate, Appl. Phys. Lett., Vol. 98, pp. 252105-1-252105-3, 2011、審査有

[学会発表](計 11件)

T. Egawa, Heteroepitaxial Growth and Power Devices Using AlGaIn/GaN HEMT on 200mm Si (111) Substrate, 35<sup>th</sup> IEEE Compound Semiconductor IC (CSIC) Symposium, 2013年10月14日(モントレール、招待講演)

J. J. Freedman, T. Egawa, GaN Based

MIS-Type HEMT Devices Grown by MOCVD on Si, International Conference on Thin Films & Applications, 2013年9月13日(インド、招待講演)

T. Narita, Y. Fujimoto, A. Wakejima, T. Egawa, Electroluminescence under the gate region using AlGaIn/GaN HEMT with a transparent gate electrode, 2013 International Conference on Solid State Devices and Materials (SSDM2013), 2013年9月27日(ヒルトン福岡シーホーク、口頭発表)

J. J. Freedman, T. Kubo, T. Egawa, Demonstration of Enhancement-mode Operation in AlGaIn/GaN MOS-HEMT on Si by utilizing ALD Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> layer, 2013 International Conference on Solid State Devices and Materials (SSDM2013), 2013年9月25日(ヒルトン福岡シーホーク、口頭発表)

S. L. Selvaraj, A. Watanabe, A. Wakejima, T. Egawa, 1.4 kV Breakdown Voltage for MOCVD grown AlGaIn/GaN HEMTs on Si Substrate, Device research conference, 2012年6月18日(ペンシルベニア州立大学、ポスター)

W. A. Frank, A. Wakejima, T. Egawa, Effect of Buffer Thickness on Degradation of AlGaIn/GaN HEMTs on Si, 2012 International Conference on Solid State Devices and Materials, 2012年9月27日(京都、口頭発表)

J. J. Freedman, T. Kubo, T. Egawa, Investigation of trapping properties in AlGaIn/GaN HEMT heterostructures grown on silicon with thick buffer layers, 2012 International Conference on Solid State Devices and Materials, 2012年9月26日(京都、ポスター)

T. Egawa, Heteroepitaxial growth and power electronics using AlGaIn/GaN HEMT on Si, 2012 IEEE International Electron Devices Meeting, 2012年12月12日(サンフランシスコ、招待講演)

S. L. Selvaraj, A. Watanabe, T. Egawa, Enhanced mobility for MOCVD grown AlGaIn/GaN HEMTs on Si substrate, Device research conference, 2011年6月21日(カリフォルニア州・サンタバーバラ、口頭発表)

S. L. Selvaraj, T. Egawa, MOCVD grown AlGaIn/GaN transistors on Si substrate for High Breakdown Applications, HeteroSiC-WASMPE 2011 (HeteroSiC-Workshop on Advanced Semiconductor Materials and devices

for Power Electronics applications  
2011), 2011年6月29日 (Toursフランス、  
口頭発表、招待講演)

S. L. Selvaraj, A. Watanabe, T. Egawa,  
Deep Pits and Their Influence on the  
Device Performance for MOCVD Grown  
AlGaIn/GaN HEMTs on Si Substrate, 9th  
International Conference on Nitride  
Semiconductors ( ICNS-9 ), 2011年7月  
13日 (イギリス、グラスゴー、口頭発表)

〔図書〕(計1件)

江川孝志他、技術情報協会、技術シーズを活  
用した研究開発テーマの発掘、2013、854  
(213-222)

〔産業財産権〕

出願状況 (計4件)

名称: ドレイン電流密度・相互コンダクタン  
スを大幅に改善したリセス構造のMIS型  
ノーマリオフHEMT素子

発明者: 江川孝志

権利者: 名古屋工業大学 高橋 実

種類: 特許

番号: 特願 2014-067737

出願年月日: 平成 26 年 3 月 28 日

国内外の別: 国内

名称: 半導体積層構造およびこれを用いた半  
導体素子

発明者: 江川孝志

権利者: 名古屋工業大学 高橋 実

種類: 特許

番号: 特願 2012 - 162720

出願年月日: 平成 24 年 7 月 23 日

国内外の別: 国内

名称: 半導体積層構造およびこれを用いた半  
導体素子

発明者: 江川孝志

権利者: 名古屋工業大学 高橋 実

種類: 特許

番号: 特願 2012 - 135627

出願年月日: 平成 24 年 6 月 15 日

国内外の別: 国内

名称: 半導体素子およびその製造方法

発明者: 江川孝志、小田 修

権利者: 名古屋工業大学 高橋 実

種類: 特許

番号: 特願 2012 - 052987

出願年月日: 平成 24 年 3 月 9 日

国内外の別: 国内

取得状況 (計0件)

なし

〔その他〕

ホームページ等

[http://www.nitech.ac.jp/gene\\_inf/g60/g60\\_050/RENDES.html](http://www.nitech.ac.jp/gene_inf/g60/g60_050/RENDES.html)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

江川 孝志 (EGAWA TAKASHI)

名古屋工業大学・工学研究科・教授

研究者番号: 00232934

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし