

		紹介教員氏名	若原 昭浩 教授
申請者氏名	藤原 徹也		

## 論文要旨(博士)

論文題目	ノーマリオフ型非極性 <i>m</i> 面AlGaIn/GaN電界効果トランジスタについての研究
------	--

(要旨 1, 200字程度)

近年、エレクトロニクス製品の高効率化、小型化が著しく、この発展は電子回路を構成するトランジスタの寄与によるところが大きい。現在、これらのトランジスタは、ほぼ全てがシリコン(Si)から構成されているが、材料物性から来る性能の限界が近づきつつある。Siに置き換わる材料として、ワイドバンドギャップかつ高電子移動度を持つ窒化ガリウム(GaN)が注目を浴びている。GaNトランジスタの優れた性能は、窒化アルミニウムガリウム(AlGaIn)/GaN構造の採用により、高電子移動度の2次元電子ガス(2DEG)を利用できる事に尽きる。このおかげで、AlGaIn/GaN電界効果トランジスタ(FET)において、Siの理論値を越える高い絶縁破壊電圧( $V_{BR}$ )かつ低いオン抵抗( $R_{on}$ )を持つデバイスが実現されている。一方、パワーデバイスでは、安全性の問題から+2V以上の閾値電圧( $V_{th}$ )を持つノーマリオフ動作が要求されている。しかし、通常の*c*面AlGaIn/GaN FETでは、分極により自然に発生する2DEGのため、 $V_{th}>+2V$ の実現は困難である。これより、*c*面AlGaIn/GaN FETでは、2DEGを使用すれば高 $V_{th}$ が得られず、2DEGを使用しなければ低 $R_{on}$ が期待できないというトレードオフが存在する。

本研究では、高 $V_{th}$ かつ低 $R_{on}$ を持つノーマリオフ型AlGaIn/GaN FET実現のため、非極性*m*面AlGaIn/GaN構造を用いたFETの検討を行った。本論文では、ノーマリオフ型非極性*m*面AlGaIn/GaN FETの設計、試作、評価について論じる。

第3章では、Schrödinger-Poisson方程式を自己矛盾無しに解くことにより、バンド構造、キャリア分布の理論計算を行った。理論計算により、分極効果の無い*m*面AlGaIn/GaN構造では、*c*面AlGaIn/GaN構造と比較して、 $dP/\epsilon$ 高い $V_{th}$ が得られる事が分かった。ここで、 $d$ はAlGaIn膜厚、 $P$ はAlGaInの分極電荷、 $\epsilon$ はAlGaInの誘電率である。分極を持たない*m*面AlGaIn/GaN構造では、Si不純物ドーピングによりアクセス領域の2DEGを生成した。非極性*m*面AlGaIn/GaN構造を用いたリセス構造金属-絶縁膜-半導体(MIS)型*m*面AlGaIn/GaN FETにより、 $V_{th}=+2V$ 、 $R_{on}=0.33 \Omega \cdot mm$ を持つノーマリオフ型AlGaIn/GaN FETが設計された。

第4章では、*m*面AlGaIn/GaN構造の結晶成長と、ノーマリオン型*m*面AlGaIn/GaN FETの実証について論じた。*m*面AlGaIn/GaN構造は、有機金属気相成長法により[000 $\bar{1}$ ]方向へオフ角1°を持つ*m*面GaN基板上へ結晶成長された。*m*面GaNバッファ層への鉄ドーピングにより高抵抗バッファ層の作製を、*m*面AlGaIn中へのSiの $\delta$ ドーピングにより2DEG生成を行った。結晶成長された*m*面AlGaIn/GaN構造において、移動度( $\mu_{2DEG}$ )=782  $cm^2/V \cdot s$ 、シートキャリア濃度 $n_s=3 \times 10^{12} cm^{-2}$ の2DEG生成を確認した。この*m*面AlGaIn/GaN構造を用いて、チタン/Al/ニッケル(Ni)/金を窒素雰囲気中で870 °C、30 sアニールを行う事で、コンタクト抵抗( $R_c$ )=2.2  $\Omega \cdot mm$ のオーミック電極が得られた。Ni Schottkyゲート電極を用いて作製された*m*面AlGaIn/GaN FETでは、ゲート電圧( $V_{gs}$ )=+1 V印加時 $R_{on}=16.6 \Omega \cdot mm$ 、 $V_{gs}=-1.2$  V印加時最大相互コンダクタンス( $g_{m(max)}$ )=77 mS/mm、 $V_{th}=-2.7$  V、チャネル移動度( $\mu_{ch}$ )=161  $cm^2/V \cdot s$ のノーマリオン動作が実証された。

第5章では、ノンドープ*m*面AlGaIn/GaN構造を用いたノーマリオフ型*m*面AlGaIn/GaN FETの実証について論じた。ノンドープ*m*面AlGaInを用いたMIS構造*m*面AlGaIn/GaN FETにおいて、 $V_{gs}=+5$  V印加時 $R_{on}=21.6 \Omega \cdot mm$ 、 $V_{gs}=+2.5$  V印加時 $g_{m(max)}=38$  mS/mm、 $V_{th}=+1.4$  Vのノーマリオフ動作が得られた。*m*面AlGaIn/GaN構造を用いる事で、同構造の*c*面AlGaIn/GaN FETでは得る事ができないほどの高い $V_{th}$ を持つノーマリオフ型AlGaIn/GaN FETが実現された。また、選択再成長 $n^+$ -GaInコンタクト層を用いる事で、 $R_c$ を $2.2 \Omega \cdot mm$ から $0.25 \Omega \cdot mm$ へと低減できる事が確認された。

第6章では、リセスMIS構造ノーマリオフ型*m*面AlGaIn/GaN FETの実証について論じた。プラズマ気相成長法により成膜されたシリコン窒化膜( $Si_xN_y$ )と、原子層堆積により成膜された酸化アルミニウム( $Al_2O_3$ )をゲート絶縁膜として使い、それぞれのデバイス特性を比較した。 $Al_2O_3$ ゲート絶縁膜を用いたデバイスにおいて、 $V_{th}=2.2$  V、 $\mu_{ch}=61$   $cm^2/V \cdot s$ が得られ $Si_xN_y$ ゲート絶縁膜を用いたデバイスより優れた特性を示した。 $Al_2O_3/m$ 面AlGaIn界面の界面準位( $D_{it}$ )が、 $10^{12} cm^{-2}eV^{-1}$ 台と $Si_xN_y/m$ 面AlGaIn界面の $D_{it}$ より低いためだと考えられる。白金ゲート金属と $Al_2O_3$ ゲート絶縁膜を用いたリセスMIS構造ノーマリオフ型非極性*m*面AlGaIn/GaN FETにおいて、 $V_{th}=+3$  V、 $R_{on}=17 \Omega \cdot mm$ 、 $\mu_{ch}=101$   $cm^2/V \cdot s$ が得られた。第3章で計算により求められた値 $V_{th}=+2$  V、 $R_{on}=0.33 \Omega \cdot mm$ と異なる値であるが、 $Al_2O_3/m$ 面AlGaInの $D_{it}$ が原因となり、ヒステリシスによる $V_{th}$ の違い、および、イオン化不純物散乱による $\mu_{ch}$ 低下のため高 $R_{on}$ が得られたと考えられる。

以上より、非極性*m*面AlGaIn/GaN構造を用いる事で、2DEGを使用しつつ $V_{th}>+2$  Vを持つノーマリオフ型AlGaIn/GaN FETが実現された。*m*面GaInを用いる事は、ノーマリオフ型GaInパワーデバイス実現のため、非常に有効な方法である事が実証された。

year month day  
2013 8 27

Department		Supervisor	Professor Akihiro Wakahara
Name	Tetsuya Fujiwara		

A b s t r a c t

Title	Study of Normally-Off Type Non-Polar <i>m</i> -Plane AlGaN/GaN Field-Effect Transistors
-------	---

(800 words)

In recent years, power electronics have been rapidly progressed owing to the improvement of Silicon (Si)-based switching transistors. Low on-state resistances ( $R_{on}$ ) and high break down voltages ( $V_{BR}$ ) devices contribute to increase power efficiencies in those applications, thereby  $R_{on}$  of Si transistors have been reduced by the fabrication technology. However, nowadays, performances of Si transistors are approaching to its theoretical limits derived from material properties. A gallium nitride (GaN) is remarkable as a new generation material for electron devices because it has advanced material properties such as a wide band gap (3.39 eV) and high electron mobility. Aluminum gallium nitride (AlGaN)/GaN field-effect transistors (FETs) have already demonstrated high  $V_{BR}$  and low  $R_{on}$  compared to values of Si theoretical limits owing to a high electron mobility ( $\sim 1500 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ ) of two-dimensional electron gases (2DEG) at the AlGaN/GaN heterointerface. Generally, a normally-off operation with over +2 V of threshold voltage ( $V_{th}$ ) is required for power switching transistors in order to ensure the safety of systems. Some techniques have been reported to realize normally-off operation on AlGaN/GaN FETs such as employing a thin AlGaN layer, gate-recess process, fluoride-based and oxygen plasma treatment, *pn* junction gate, annealed platinum (Pt)-based gate metal, and a metal-insulator-semiconductor (MIS) gate structure. At most +1 V of  $V_{th}$  has been demonstrated on those AlGaN/GaN-based structures because 2DEG are naturally induced at *c*-plane AlGaN/GaN heterointerfaces by a polarization. While  $V_{th} > +3 \text{ V}$  has been reported on GaN-based MIS structures, low  $R_{on}$  can not be expected on those structures due to its low channel mobility ( $\mu_{ch}$ ) of  $\sim 100 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ . Therefore, there is a trade-off between high  $V_{th}$  and low  $R_{on}$  on typical *c*-plane AlGaN/GaN FETs.

In this thesis, non-polar *m*-plane AlGaN/GaN FETs are studied toward normally-off type AlGaN/GaN FETs with high  $V_{th}$  and low  $R_{on}$ . A device design, crystal growth, device fabrication and device characteristics of *m*-plane AlGaN/GaN FETs are described.

In Chapter 3, band structures and carrier profiles of AlGaN/GaN heterostructures were calculated by a self-consistent Schrödinger-Poisson solver. *m*-plane AlGaN/GaN heterostructures showed  $dP/\epsilon \text{ V}$  higher  $V_{th}$  compared to the value of *c*-plane AlGaN/GaN heterostructures because *m*-plane GaN has no polarization. Here,  $d$ ,  $P$ , and  $\epsilon$  are an AlGaN thickness, polarization charge, and electric permittivity, respectively. 2DEG

at a *m*-plane AlGaIn/GaN heterointerface was induced by an impurity doping to an AlGaIn barrier layer. Recessed-MIS structure normally-off type *m*-plane AlGaIn/GaN FETs with a  $V_{th}=+2$  V and  $R_{on}=0.33 \Omega \cdot \text{mm}$  were designed.

In Chapter 4, a crystal growth of *m*-plane AlGaIn/GaN heterostructures, characteristics of 2DEG, and normally-on type *m*-plane AlGaIn/GaN FETs were discussed. *m*-plane AlGaIn/GaN heterostructures were grown by a metal organic chemical vapor deposition on *m*-plane GaN substrates which have a  $1^\circ$  off-angle toward  $[000\bar{1}]$  direction. An iron-doped GaN layer was used as a semi-insulating layer that isolating a 2DEG channel from a conductive substrate. Si  $\delta$ -doping of an AlGaIn barrier layer was carried out to introduce 2DEG at the AlGaIn/GaN heterointerface. A 2DEG mobility ( $\mu_{2DEG}$ ) of  $782 \text{ cm}^2/\text{V} \cdot \text{s}$  and a carrier concentration of  $3 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$  were obtained on *m*-plane AlGaIn/GaN heterostructures. Some reasons of lower  $\mu_{2DEG}$  are considered as an interface roughness of *m*-plane AlGaIn/GaN, ionized impurity scattering from  $\delta$ -doped and iron-doped layers. Specific ohmic contact resistances ( $R_{on}$ ) of  $2.2 \Omega \cdot \text{mm}$  were obtained by titanium/Al/nickel(Ni)/gold stacks following by an annealing at  $870^\circ \text{C}$  for 30 s in a nitrogen ambient. Normally-on type *m*-plane AlGaIn/GaN FETs with a Ni Schottky gate metal demonstrated a  $R_{on}=16.6 \Omega \cdot \text{mm}$  at a gate-source voltage ( $V_{gs}$ )= $+1$  V, maximum transconductance ( $g_{m(\text{max})}$ )= $77 \text{ mS/mm}$  at  $V_{gs}=-1.2$  V,  $V_{th}=-2.7$  V, and channel mobility ( $\mu_{ch}$ )= $161 \text{ cm}^2/\text{V} \cdot \text{s}$ .

In Chapter 5, normally-off type *m*-plane AlGaIn/GaN FETs were discussed. MIS structure *m*-plane unintentionally-doped AlGaIn/GaN FETs were demonstrated with a normally-off operation of a  $R_{on}=21.6 \Omega \cdot \text{mm}$  at  $V_{gs}=+5$  V,  $g_{m(\text{max})}=38 \text{ mS/mm}$  at  $V_{gs}=+2.5$  V, and  $V_{th}=+1.4$  V. Higher  $V_{th}$  compared to the value of *c*-plane AlGaIn/GaN devices were achieved by using *m*-plane AlGaIn/GaN structures owing to having no polarization.  $R_{on}$  were reduced to  $0.25 \Omega \cdot \text{mm}$  from  $2.2 \Omega \cdot \text{mm}$  by using selective regrown  $n^+$ -GaN contact layers which have  $10^{19} \text{ cm}^{-3}$  of carrier concentrations.

In Chapter 6, recessed-MIS structure normally-off type *m*-plane AlGaIn/GaN FETs were discussed. Gate dielectrics of a silicon nitride ( $\text{Si}_x\text{N}_y$ ) deposited by a plasma-enhanced chemical vapor deposition and aluminum oxide ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) deposited by an atomic layer deposition were compared. Devices with the  $\text{Al}_2\text{O}_3$  gate dielectric showed  $V_{th}=+2.2$  V and  $\mu_{ch}=61 \text{ cm}^2/\text{V} \cdot \text{s}$  which are better values than one of devices with the  $\text{Si}_x\text{N}_y$  gate dielectric. It is presumably attributed to lower interface state density ( $D_{it}$ ) of  $\text{Al}_2\text{O}_3/m$ -plane AlGaIn interface. Devices with a Pt gate metal and  $\text{Al}_2\text{O}_3$  gate dielectric were demonstrated with a  $V_{th}=+3$  V,  $R_{on}=17 \Omega \cdot \text{mm}$ , and  $\mu_{ch}=101 \text{ cm}^2/\text{V} \cdot \text{s}$ . However, those values were degraded from designed values of  $V_{th}=+2$  V and  $R_{on}=0.33 \Omega \cdot \text{mm}$  in the chapter 3. Differences of those values are owing to the hysteresis and lower  $\mu_{ch}$ , caused by  $D_{it}$  of an  $\text{Al}_2\text{O}_3/m$ -plane AlGaIn MIS interface.

In conclusion, normally-off type AlGaIn/GaN FETs with  $V_{th}>+2$  V were demonstrated by using a *m*-plane GaN. The result indicates *m*-plane GaN has the potential for normally-off type GaN-based power switching transistors.