

Title	AlTiO絶縁膜を用いたGaN系MISデバイスにおけるノーマリーオフ動作のための界面電荷エンジニアリング
Author(s)	NGUYEN, DAI DUONG
Citation	
Issue Date	2022-03
Type	Thesis or Dissertation
Text version	ETD
URL	http://hdl.handle.net/10119/17767
Rights	
Description	Supervisor:鈴木 寿一, 先端科学技術研究科, 博士

氏名	NGUYEN, Duong Dai		
学位の種類	博士 (マテリアルサイエンス)		
学位記番号	博材第 529 号		
学位授与年月日	令和 4 年 3 月 24 日		
論文題目	Interface charge engineering for normally-off operations in GaN-based metal-insulator-semiconductor (MIS) devices using AlTiO insulators		
論文審査委員	主査	鈴木寿一	北陸先端科学技術大学院大学 教授
		赤堀誠志	同 准教授
		徳光永輔	同 教授
		村田英幸	同 教授
		佐藤威友	北海道大学 准教授

論文の内容の要旨

Wide-gap semiconductor GaN is anticipated for its potential to overcome the trade-off between speed and power in semiconductor devices. In particular, GaN-based metal-insulator-semiconductor heterojunction field-effect transistors (MIS-HFETs) have been investigated extensively owing to the merits of gate leakage reduction and passivation to suppress the current collapse. As a gate insulator of GaN-based MIS-HFETs, various materials such as Al_2O_3 , TiO_2 , TaON, AlN, BN, and so on have been employed and investigated. Although a wide energy gap E_g and a high dielectric constant k_{ins} are preferable for a gate insulator, a trade-off between E_g and k_{ins} generally exists for insulators. Aluminum titanium oxide $\text{Al}_x\text{Ti}_y\text{O}$ (AlTiO), an alloy of Al_2O_3 ($E_g \sim 7$ eV, $k_{\text{ins}} \sim 10$) and TiO_2 ($E_g \sim 3$ eV, $k_{\text{ins}} \sim 60$) is a versatile insulator since its properties can be modified for energy gap engineering (E_g control) and dielectric constant engineering (k_{ins} control) via its composition. Although there still exists a trade-off between E_g and k_{ins} , we can choose an AlTiO composition according to applications, considering the trade-off. On the other hand, at the interface between an oxide gate insulator and a negatively polarized semiconductor surface, such as a Ga-face (Al)GaN surface, a positive fixed charge tends to be generated and to neutralize the negative polarization charge. The positive interface fixed charge has a significant impact on threshold voltages; a high-density positive interface fixed charge shifts the threshold voltage negatively. The technology aiming to control the threshold voltage by controlling the positive interface charge is called “interface charge engineering”.

In this work, we investigated interface charge engineering in AlTiO/AlGaN/GaN MIS devices by evaluating the positive interface fixed charge density depending on the composition of AlTiO obtained by atomic layer deposition. We found a trend that the interface fixed charge density decreases with a decrease in the Al composition ratio, i.e. increase in the Ti composition ratio. Moreover, X-ray photoelectron spectroscopy characterization of AlTiO/AlGaN reveals a relation between the positive interface fixed charge density and the bonding states of Ga: an increase in Ga-N bonding state or a decrease in Ga-O bonding state leads to an increase in the positive interface fixed charge density.

In order to realize normally-off operations with good transport properties in AlTiO/AlGaIn/GaN MIS-FETs, we investigated combining the interface charge engineering and partial gate recess method with a thick remaining AlGaIn layer. For a composition of $x/(x+y) = 0.73$, the positive fixed charge at AlTiO/recessed-AlGaIn is significantly suppressed compared to that at Al₂O₃/recessed-AlGaIn, leading to a positive slope in the relation between the threshold voltage and the AlTiO insulator thickness. As a result, we successfully obtained normally-off operations in partially-gate-recessed AlTiO/AlGaIn/GaN MIS-FETs with a threshold voltage of 1.7 V and good transport properties. For a composition of $x/(x + y) = 0.73$, low-frequency noise characterization of AlTiO/AlGaIn/GaN MIS-FETs with different remaining AlGaIn thickness reveals two trap levels in AlTiO, independent of AlGaIn thickness. Moreover, the noise magnitude increases with a decrease in the remaining AlGaIn thickness, owing a decrease in the channel electron mobility.

In summary, we successfully obtained normally-off operation in GaN-based MIS devices by interface charge engineering using AlTiO insulators and investigated the AlTiO/AlGaIn interface by X-ray photoelectron spectroscopy and low-frequency noise.

Keywords: III-V compound semiconductor, AlGaIn/GaN, AlTiO, interface charge engineering, normally-off operation

論文審査の結果の要旨

本論文は、GaN系ワイドギャップ半導体を用いた金属-絶縁体-半導体(Metal-Insulator-Semiconductor, MIS)デバイスを対象とし、AlTiO (Al₂O₃とTiO₂の混合酸化物)ゲート絶縁体を用いた絶縁体/半導体界面電荷エンジニアリング、それに基づくノーマリーオフ動作リセス構造 AlTiO/AlGaIn/GaN MIS 電界効果トランジスタ(MIS-FET)の設計と作製、さらに、リセス構造 AlTiO/AlGaIn/GaN MIS-FET の低周波ノイズ特性に関して行われた研究を報告している。

高速・高出力特性に優れた GaN系 MIS-FET のいくつかの応用においては、閾値電圧が正であるノーマリーオフ動作が必要である。しかしながら、表面に負の分極電荷を有する GaN系半導体上にゲート絶縁体を形成した場合、絶縁体/半導体界面に正の面固定電荷が発生して分極電荷を打ち消す傾向があり、これがノーマリーオフ動作の妨げとなっていた。本研究では、AlTiO をゲート絶縁体として用いた AlTiO/AlGaIn/GaN MIS デバイスを検討し、AlTiO/AlGaIn 界面の正の固定電荷が Ti 組成増大とともに抑制できることが見出された。このことは、AlTiO がバンドギャップエンジニアリング・誘電率エンジニアリングに加え、界面電荷エンジニアリングにも有用であることを示している。

さらに、この界面電荷エンジニアリングを応用し、ノーマリーオフ動作リセス構造 AlTiO/AlGaIn/GaN MIS-FET の設計と作製が行われた。比較的浅いリセス構造を有する MIS-FET が作製され、高い閾値電圧、高い出力電流、高いチャネル電子移動度、理想値に近いサブスレッショルドスイングが得られた。これにより、界面電荷エンジニアリングは、浅いリセス構造による優れたチャネル輸送特性と高閾値電圧を両立させられることが明らかになった。

また、リセス構造 AlTiO/AlGaIn/GaN MIS-FET の低周波ノイズ特性の評価と解析が行われ、リセス深化とともにノイズが増大することが明らかとなった。このことは、低周波ノイズの観点からも浅いリ

セスが望ましいことを示しており、界面電荷エンジニアリングに基づく浅いリセス構造を有する AlTiO/AlGa_N/Ga_N MIS-FET の優位性を明らかにするものである。

以上のように、本論文では、Ga_N 系 MIS デバイス技術について重要かつ有益な結果が得られており、学術的および産業的な価値が大きい。よって博士(マテリアルサイエンス)の学位論文として充分価値あるものと認めた。