

ヨシダ タカヒロ

氏 名 吉田 貴広

学位の種類 博士（工学）

学位記番号 博第1147号

学位授与の日付 平成31年3月27日

学位授与の条件 学位規則第4条第1項該当 課程博士

学位論文題目 窒化物半導体へのAuフリーオーミック電極の形成とSi基板上GaN HEMTへの応用に関する研究  
(Study on Au-free ohmic electrodes on nitride semiconductor and application for GaN HEMT on Si substrate)

論文審査委員 主査 教授 江川 孝志  
教授 三好 実人  
教授 Niraula Madan

## 論文内容の要旨

### はじめに

GaN HEMT は窒化物半導体ヘテロ接合に誘起した 2 次元電子面をチャネルとした高移動度、高耐圧、低オン抵抗を特徴とするパワーデバイスであり、既存の Si デバイスを凌駕する性能が期待される。しかし、実用化に向けた課題として、オーミック電極の Au フリー化およびアニール温度の低減が求められている。本研究ではこれらの課題を解決したオーミック電極を開発し、オーミック界面の形成メカニズムや電子伝導メカニズムを解明するとともに、それを用いた HEMT の特性評価を行った。

### 実験方法と結果1（第3章）

AlGaIn/GaN on Si ウェハ上の Ti/Al/W オーミック電極において成膜厚さ、アニール条件を変えて特性評価を行った結果、以下のことが分かった。

- ・Ti が薄いほど、必要なアニール温度が下がるとともに固有接触抵抗が下がる
- ・Al と W の厚さは、ある程度以上になると固有接触抵抗に影響しない
- ・最も低い固有接触抵抗は Ti 厚さが 2.7nm、アニール条件 500℃、10 分のときに得られ、その値は  $2.54E-6\Omega\cdot\text{cm}^2$  である

今回得られたアニール温度および固有接触抵抗は、これまで報告された Ti/Al/W 電極に関する

論文の中で最も低い値である。本研究で得られた電極は従来の Au 含有電極と比べて、次の利点がある。

- ・従来のアニール温度 850℃より大幅に低い 500℃でオーミック特性が得られる
- ・AlGaIn に深く拡散しないため、シート抵抗を悪化させない
- ・表面の平坦性が良く、パターンのリニアリティに優れる
- ・ゲートファーストプロセスが可能となる

また、電極の組成、構造分析を行い各金属の役割とオーミック界面形成メカニズムを明らかにした。

#### 実験方法と結果 2 (第 4 章)

InAlN/AlN/GaN on Si ウェハ上の Ti/Al/W オーミック電極の特性評価を行った結果、以下のことが分かった。

- ・最も低い固有接触抵抗は Ti 厚さが 15nm、アニール条件 525℃、1 分のときに得られ、その値は  $1.29\text{E}\cdot 5\Omega\cdot\text{cm}^2$  である
- ・上記のアニール条件であれば、シート抵抗の劣化は起きない。

また、リセスオーミック構造の特性評価を行った結果、以下のことが分かった。

- ・5.58nm 削ったハーフリセス構造にて最も低い固有接触抵抗が得られる
- ・固有接触抵抗の温度特性は TFE モデルで良いフィッティングが得られる
- ・熱拡散とトンネリングの両方が電子伝導に関わっており、比較的トンネリングの寄与率が高いが、リセスが進行するにつれて、熱拡散の寄与率が上昇する

リセス深さを 3 つの領域に分けることで電子伝導メカニズムの変動を説明した。

#### 実験方法と結果 3 (第 5 章)

本研究で得られた Ti/Al/W オーミック電極を活用し、低温プロセスにてノーマリーオン MIS-HEMT を試作し、高温アニールが必要な従来の Au 含有 HEMT との特性比較を行った結果、以下のことが分かった。

- ・ $R_{on}$  は Au フリー-HEMT の方が低く、その理由はシート抵抗が低いためと考えられる

また、ゲートリセスを追加したノーマリーオフ MIS-HEMT にて、Au フリー-HEMT と Au 含有 HEMT の特性を比較した結果、以下のことが分かった。

- ・リセスによる  $V_{th}$  の変動幅は、アニール温度が低いほど大きい
- ・ $V_{th}$  対  $R_{on}$  および  $V_{th}$  対  $I_{dmax}$  のトレンドはアニール温度で変わらない

#### まとめ

本研究では、GaN-HEMT の量産化に向けた大きな課題である Au フリー化に取り組み、既存の Si デバイス製造ラインでも製造可能なオーミック電極を開発した。また、アニール温度を従来の 850℃より大幅に低い 500℃に低下することができた。

## 論文審査結果の要旨

GaN HEMT は窒化物半導体ヘテロ接合に誘起した 2 次元電子面をチャネルとした高移動度、高耐圧、低オン抵抗を特徴とするパワーデバイスであり、既存の Si デバイスを凌駕する性能が期待される。しかし、実用化に向けた課題として、オーミック電極の Au フリー化およびアニール温度の低減が求められている。本論文は Au フリーオーミック電極の開発を行うとともに、それを用いた HEMT の特性評価を行い、その結果をまとめたものである。

第一章では、本研究の背景、課題、目的と論文の構成について述べている。

第二章では、窒化物半導体へのオーミック接触に関する理論及びその応用技術について述べている。

第三章では、AlGaIn/GaN on Si ウェハ上の Ti/Al/W オーミック電極において成膜厚さ、アニール条件を変えて特性評価を行った結果、以下のことが分かった。

- ・ Ti が薄いほど、必要なアニール温度が下がると同時に固有接触抵抗が下がる。
- ・ Al と W の厚さは、ある程度以上になると固有接触抵抗に影響しない。
- ・ 最も低い固有接触抵抗は Ti 厚さが 2.7nm、アニール条件 500°C、10 分のときに得られ、その値は  $2.54 \times 10^{-6} \Omega \cdot \text{cm}^2$  である。

本研究で得られた Ti/Al/W 電極は従来の Au 含有電極と比べて、次の利点がある。

- ・ 従来のアニール温度 850°C より大幅に低い 500°C でオーミック特性が得られる。
- ・ AlGaIn に深く拡散しないため、シート抵抗を悪化させない。
- ・ 表面の平坦性が良く、パターンのリニアリティに優れる。
- ・ ゲートファーストプロセスが可能となる。

また、Ti/Al/W 電極の組成、構造分析を行い各金属の役割とオーミック界面形成メカニズムを明らかにした。

第四章では、InAlIn/AlN/GaN on Si ウェハ上の Ti/Al/W オーミック電極の特性評価を行った結果、以下のことが明らかになった。

- ・ 最も低い固有接触抵抗は Ti 厚さが 15nm、アニール条件 525°C、1 分のときに得られ、その値は  $1.29 \times 10^{-5} \Omega \cdot \text{cm}^2$  である。
- ・ 上記のアニール条件であれば、シート抵抗の劣化は起きない。

また、リセスオーミック構造の特性評価を行った結果、以下のことが分かった。

- ・ 5.58nm 削ったハープリセス構造にて最も低い固有接触抵抗が得られる。
- ・ 固有接触抵抗の温度特性は TFE モデルで良いフィッティングが得られる。
- ・ 熱拡散とトンネリングの両方が電子伝導に関わっており、比較的トンネリングの寄与率が高いが、リセスが進行するにつれて、熱拡散の寄与率が上昇する。

リセス深さを 3 つの領域に分けることでフィッティングパラメータの変動をモデル化した。

第五章では、本研究で得られた Ti/Al/W オーミック電極を活用し、低温プロセスにてノーマリーオン MIS-HEMT を試作し、高温アニールが必要な従来の Au 含有 HEMT との特性比較を行った結果、以下のことが分かった。

- ・  $R_{on}$  は Au フリー HEMT の方が低く、その理由はシート抵抗が低いためと考えられる。

また、ゲートリセスを追加したノーマリーオフ MIS-HEMT にて、Au フリー HEMT と Au 含有 HEMT の特性を比較した結果、以下のことが分かった。

- ・ リセスによる  $V_{th}$  の変動幅は、アニール温度が低いほど大きい。
- ・  $V_{th}$  対  $R_{on}$  および  $V_{th}$  対  $I_{dmax}$  のトレンドはアニール温度で変わらない。

第六章では本論文の総括及び実用化に向けた課題・展望について述べている。

以上の研究成果は、3 編の学術論文として発表されており、Si 基板上 AlGaIn/GaN HEMT における Au フリーオーミック電極の開発を行うとともに、それに関する重要な知見を与えている。従って、本論文は本学の博士（工学）論文として十分な価値を有するものと認められる。