

Title	多端子ホール測定および高周波測定によるオーミック金属 下半導体の特性評価法とその応用
Author(s)	瓜生, 和也
Citation	
Issue Date	2023-03
Type	Thesis or Dissertation
Text version	ETD
URL	<a href="http://hdl.handle.net/10119/18431">http://hdl.handle.net/10119/18431</a>
Rights	
Description	Supervisor:鈴木 寿一, 先端科学技術研究科, 博士

氏名	瓜生 和也		
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 555 号		
学位授与年月日	令和 5 年 3 月 24 日		
論文題目	多端子ホール測定および高周波測定によるオーミック金属下半導体の特性評価法とその応用		
論文審査委員	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

For all kinds of semiconductor devices, formation of Ohmic contacts is a key technological element. In general, electrical properties of semiconductors are modified by formation of Ohmic-metals; the sheet resistance, the carrier concentration, the carrier mobility, and the depletion width under the formed Ohmic-metals differ from those before the formation. In order to clarify mechanisms of Ohmic contacts, it is important to evaluate semiconductor properties under Ohmic-metals. For measurements of the modified electrical properties, the end and floating contact resistance methods have been developed. However, these methods can measure only the sheet resistance; the carrier concentration and mobility cannot be evaluated. For a semiconductor with an Ohmic-metal, since the current is distributed in both the semiconductor and the Ohmic-metal, without knowing the current distribution, Hall measurements cannot determine the carrier concentration and mobility in the semiconductor. By knowing the potential and current distribution in the semiconductor, the carrier concentration and mobility under the Ohmic-metal should be evaluated, but the depletion width cannot be directly measured. The depletion width can be evaluated by measuring the depletion capacitance. However, it is difficult to accurately measure the depletion capacitance for Ohmic contacts by using a MHz-band LCR meter, because the imaginary part of admittance is much less than the parallel real part. By using a GHz-band measurements, where the imaginary part is comparable to the real part, the depletion capacitance should be evaluated.

In this work, in order to evaluate the carrier concentration and mobility under an Ohmic-metal, we proposed a characterization method using multi-probe Hall devices, from which we can know the voltage and current distribution. In addition, we proposed a characterization method to evaluate the depletion width under an Ohmic-metal from high-frequency measurements of floating contact impedance. The usefulness of these methods is exemplified by an application to Ohmic contacts for n-type GaN and AlGaIn/GaN heterostructures.

By multi-probe Hall characterization for n-GaN and AlGa<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub> heterostructures, we find that the sheet electron concentration under the Ohmic-metal is larger than that before the Ohmic-metal formation, indicating that high-doping takes place in the semiconductor. The electron mobility under the Ohmic-metal is also larger than that before the formation. This cannot be explained by donor doping with ionized impurity scattering. Considering polarization doping induced by a strain due to the Ohmic-metal, the increase in the electron mobility can be quantitatively explained based on a theoretical calculation taking into account ionized impurity and polar optical phonon scattering. This suggests that polarization doping is essential to the high-density doping in the semiconductor.

Furthermore, in order to confirm that high-density donors do not exist in the semiconductors under the Ohmic-metals, we investigated the semiconductor electrical properties after the Ohmic-metal removal. Multi-probe Hall characterization shows that the sheet electron concentration after the Ohmic-metal removal return to the value before the Ohmic-metal formation. In addition, we find that the Ni/Au Schottky contacts on the semiconductor before the Ohmic-metal formation and after the Ohmic-metal removal show the almost same characteristics. These results indicate that donors do not exist after the Ohmic-metal removal, suggesting that, although high-density doping takes place, high-density donors are not formed under the Ohmic-metal. Therefore, we conclude that the high-density doping in the semiconductor under the Ohmic-metals is attributed to polarization doping, playing a significant role in Ohmic contact formation.

Characterization methods proposed in this work are useful to obtain insights into Ohmic contact formation in various semiconductors.

**Keywords:** Ohmic contact, multi-probe Hall measurement, transmission line model, n-GaN, Al-GaN/GaN heterostructure

### 論文審査の結果の要旨

本論文は、多端子ホール測定および高周波測定による新しいオーミック金属下半導体特性評価法を提案し、この手法を窒化物半導体に対するオーミックコンタクトへ応用した結果を述べたものである。

半導体デバイスにおいて特性低下や消費電力増加をもたらす半導体-オーミック電極間コンタクト抵抗を低減するためには、オーミックコンタクト形成機構の理解が不可欠である。一般に、半導体表面にオーミック金属電極を形成すると、オーミック金属下半導体の特性はオーミック金属形成前の特性から変化する。この変化した半導体の特性を正確に評価することは、オーミックコンタクト形成機構を理解するうえで極めて重要である。これまで、オーミック金属下半導体の電気特性評価法としてエンドコンタクト抵抗法とフローティングコンタクト抵抗法が進展してきたが、これらの手法では、オーミック金属下半導体のシート抵抗は得られるものの、キャリア密度・移動度、また、空乏層幅を評価することができなかった。

そこで本研究では、オーミック金属下半導体のキャリア密度・移動度を評価する方法として多端子ホール素子を用いた測定を、また、空乏層幅を評価する方法としてフローティングコンタクトインピーダンスの高周波測定を提案し、その原理の詳細を明らかにした。

さらに、提案した手法をワイドギャップ窒化物半導体に対する低温アニールオーミック金属へと応用した。その結果、低温アニールオーミック金属下  $n\text{-GaN}$  において、電子密度の大きな増加とともに電子移動度の向上が生じていることが明らかとなった。この現象は、オーミック金属下で高濃度ドーピングが生じているものの、その主要な起源はドナードーピングではなく、ドナーをとまわらない分極ドーピングであることを示している。また、同様な分極ドーピングが低温アニールオーミック金属下  $\text{AlGaIn/GaN}$  ヘテロ構造においても示された。何れの場合についても、オーミック金属をウエットエッチングで除去した後には高濃度ドーピングが観測されず、オーミック金属の与える歪が分極ドーピングをもたらしていることが確認された。これらは、窒化物半導体に対するオーミックコンタクトにおいて高濃度窒素空孔ドナーが主要な役割を果たしているとする従来の理解を大きく修正するものであり、窒化物半導体デバイス技術に対して重要な知見を与える結果である。

以上のように、本論文は、半導体デバイスにおけるオーミックコンタクトに対する普遍的な評価技術を提案するとともに、窒化物半導体に対するオーミックコンタクトについての重要な知見を与えており、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。