

主 論 文 要 旨

2010年 12月 24日

論文題名 低消費電力化に向けた窒化物半導体パワーデバイスにおける
熱的・電気的特性の解析に関する研究

ふりがな ふじしま たつや
学位申請者 藤 嵐 辰也

主論文要旨 本論文は、高耐圧・低オン抵抗・高速スイッチングデバイスとして期待されている窒化ガリウム(GaN)系電子デバイスの熱的、及び電気的特性を理論的に解析した結果得られた成果をまとめたものである。GaN は高い絶縁破壊電界、移動度、飽和ドリフト速度という特長を有しており、省エネルギー化の社会要請に応える次世代パワースイッチングデバイス材料として期待されている。GaN 電子デバイスの実用化に向けての課題として”発熱/放熱”、”ノーマリ・オフ化”、”低オフリーク電流”などが挙げられる。本研究では、高周波デバイスとしての実績があり、パワーデバイスとしても実用化が目前に迫っている AlGaIn/GaN HEMT と、超低オン抵抗次々世代パワーデバイスに期待されているトレンチゲート構造縦型 GaN-MOSFET を採り上げ、GaN 電子デバイスの課題解決に向けた検討を行った。

AlGaIn/GaN HEMT は電流密度が大きいため、発熱密度が高くなる。したがって、放熱設計や信頼性、デバイスを組み込む回路への影響を考えると、発熱分布の把握は非常に重要である。本研究では、解析的 3D 定常熱分布計算を用いた温度分布解析を行い、測定では困難であったデバイス内部の温度分布の把握を可能にした。

また、ノーマリ・オフ化が容易で次々世代パワーデバイスに期待される縦型トレンチゲート構造 GaN-MOSFET の検討を行った。GaN の特長を十分に活かした耐圧構造を有しながら、 $1 \text{ m}\Omega \cdot \text{cm}^2$ 以下のオン抵抗を実現し、さらに 5 V 付近に閾値電圧設定するデバイス構造設計指針を明らかにした。

さらに、理論計算による縦型 GaN-MOSFET の理想状態における室温・高温下でのオフリーク電流解析を実施した。そのリーク電流に伴う p 層の電位変動量を見積もった。その結果、縦型 GaN-MOSFET は Si-MOSFET に比べ、高温環境下でも低リーク電流が実現できる可能性があることが示された。

最後に、世界で初めて作製した GaN 基板上縦型トレンチゲート構造 GaN-MOSFET の特性について述べた。低オン抵抗化に向けた縦型 GaN-MOSFET の課題を抽出し、 $1 \text{ m}\Omega \cdot \text{cm}^2$ クラスの高耐圧・超低オン抵抗デバイスの実現が充分期待できることが明らかになった。

本論文は、GaN 電子デバイスの高性能化・実用化に対して、学術的・産業的知見を大いに与えるものであると考えられる。

主 論 文 要 旨

2010年 12月 24日

論文題名 Study on analysis of thermal and electrical characteristics of GaN power switching devices for low power consumption

ふりがな たつや ふじしま
学位申請者 Tatsuya Fujishima

主論文要旨

This is a doctoral thesis, which is summarized about analysis of thermal and electrical characteristics of GaN power switching devices for low power consumption. GaN based transistors (AlGaN/GaN HEMTs, GaN-MOSFET) are expected for next generation power switching devices because of their excellent material properties. Their transistors have major issues such as “self heating/ heat dissipation”, “off leakage current” and “normally-off operation”. In this doctoral thesis, these issues were investigated.

The self heating/ heat dissipation are critical issues for AlGaN/GaN HEMTs because their high current density. Thus, at first, the investigation of self-heating effects in AlGaN/GaN HEMTs using numerical simulations and micro-Raman spectroscopy was reported. In the simulations, a temperature-dependent thermal conductivity for each constituent material was used. Good agreements between the simulated and measured surface temperature distributions have been obtained, which supports the validity of simulation models. The simulated temperature distribution for HFETs on SiC substrates was found to have a much sharper peak than that on sapphire substrates.

Vertical trench gate GaN-MOSFETs are expected for realizing ultra low R_{on} , high voltage, and normally-off operation.

Secondly, the dc characteristics, such as R_{on} and V_{th} , of GaN-MOSFETs with vertical trench gates have been theoretically derived. The optimized acceptor density and the thickness of p-type layers for n-channels were estimated to be $3 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ and $0.5 \text{ }\mu\text{m}$, respectively, in order to realize R_{on} in the sub- $\text{m}\Omega\text{-cm}^2$ range. On the other hand, this resulted in a high V_{th} of 18 V due to the wide bandgap. To achieve low R_{on} and moderate V_{th} less than 10 V simultaneously, the insertion of an additional p-type or n-type layer with finite thickness between the gate insulator and the p-type layer was suggested.

Thirdly, GaN-MOSFETs with an embedded p-type body layer were theoretically analyzed. The reverse bias current density at the off-state, under applied 600 V at reverse bias region, was negligibly as small as $2.03 \times 10^{-8} \text{ A/cm}^2$, even at the high temperature, 600 K. As a result, the variation in the potential of p-type layer was 0.26–0.52 V in the range of 300–600 K, i.e., negligible compared with the built-in voltage of the pn-junction. It is distinct consequence from cases of Si transistors, where the potential variation and leakage current were significant.

Finally, completely vertical trench gate GaN-MOSFETs had been demonstrated using freestanding n-type GaN substrates for the first time. These MOSFETs exhibited enhancement-mode operation with a threshold voltage of 3.7 V and an on-resistance of $9.3 \text{ m}\Omega\text{-cm}^2$. The channel mobility was estimated to be $131 \text{ cm}^2/(\text{V}\cdot\text{s})$ when all the resistances except for that of the channel are considered. And then, cross-sectional potential distribution in the trench gate GaN-MOSFETs at off- and operating-state had been investigated by using Kelvin-probe force microscopy to clarify the actual operating situation. The potential distribution reflecting the wafer structure, $n^+/p/n/n^+$, was observed. At the off-state (the gate voltage is fixed to 0 V), it is found that the electric field at the internal p/n⁺ interface become strong, on the contrary to that at top n⁺/p interface is almost unchanged by the stepwise increase of the drain bias from 0 to 15 V. From the analysis of results obtained at operating state, we can confirm the situation how the channel forms by increasing the gate voltage. This information is useful for designing devices and improving their characteristics.

Thus, this doctoral thesis provides academic and industrial information for further development of AlGaN/GaN HEMTs and trench gate GaN-MOSFETs.