

戦略的創造研究推進事業(ALCA)
「ALCA 実用技術化プロジェクト(発展型 ALCA)」
「省エネデバイス用 8 インチ超大口径 GaN ウエハ」

終了報告書

研究開発期間 平成24年10月～令和2年3月

研究開発代表者: 森 勇介
(大阪大学大学院工学研究科 教授)

○報告書要約（和文）

研究開発代表研究者：大阪大学 教授 森 勇介

研究開発課題名：省エネデバイス用 8 インチ超大口径 GaN ウエハ

1. 研究開発の目的

GaN 系窒化物半導体は、半導体材料の中では最も優れた光・電子特性を有しているものの、結晶育成技術が未 completion ため、青色発光デバイスとして実用化されるにとどまっており、GaN 系窒化物半導体材料の優れた潜在能力をほとんど引き出せずにいる。本研究では、これまで実現不可能であった大口径・高品質 GaN バルク結晶・ウエハ作製技術の研究開発を目指す。

本研究成果である大口径・高品質 GaN ウエハ上に作製した次世代光・高周波・パワーデバイスを用いると、ハイブリッドエンジンやエアコン等の電気機器、通信システム、照明、ディスプレイ、植物工場などの省エネルギー化や太陽電池の高効率化が GaN 系窒化物半導体物性から期待される性能指数通り達成され、炭酸ガス排出を極限まで抑えた低炭素社会を構築できる。これらの効果を総合すると、経済産業省の試算では、2030 年には電力換算で 2,600 億 kWh 以上の省エネルギー効果、約 15,000 万トンの CO₂ 削減効果が期待されている。

2. 研究開発の概要

(1) 内容:

大阪大学グループにおいては 4 インチ口径以上、かつ低転位密度の GaN 結晶作製を目指したことに加え、触媒基準エッチング (CARE) 法による表面処理技術の確立に取り組んだ。加えて、転位伝播モルフォロジーと電流リークの関係性についても調査を行った。兵庫県立大学グループにおいては放射光利用明視野 X 線トポグラフィを用い、GaN 基板中の転位を可視化した。また、転位のバーガースベクトルを決定し、GaN 基板中に残存する転位の特性を明らかにした。豊田中央研究所グループにおいては、Na フラックス法 GaN 基板上に縦型ダイオードを作製し、その電流－電圧特性を評価した。さらに、反射 X 線トポグラフにより、試作ダイオードの電極下における転位分布を評価した。

(2) 成果:

大阪大学グループではポイントシード法により 4 インチ口径の GaN 結晶作製に成功した。多光子フォトルミネッセンスにより転位密度を評価した結果、 $10^3 \sim 10^5 \text{ cm}^{-2}$ 台と市販の GaN 基板に比べ高品質であることが分かった。当該技術を移管した豊田合成社においては 8 インチ口径の GaN ウエハを得ることに成功した。多波回折明視野 X 線トポグラフィを用いても GaN 基板中の転位観察に成功した。GaN 基板は電子密度が高いため X 線の透過度が低く、これまで結晶内転位を可視化することは困難であった。今回基板厚さを 100 μm まで薄くし、転位の可視化に成功し、広いエリアでの欠陥評価が可能になった。Na フラックス法 GaN 基板上に試作した PN ダイオード (直径 520 μm) において、逆方向リーク電流は 1000V 印加時で 100pA (47nA/cm²) 程度であり、市販 GaN 基板上 PN ダイオードより低いことを確認した。さらに、反射 X 線トポグラフにより、試作 PND の電極下における転位分布の評価に成功し、リーク電流が低い PN ダイオードにおいても 10～20 個の転位が含まれていることが分かった。このことから、転位は必ずしもリーク電流を発生させる要因ではないことが示唆された。

(3) 今後の展開:

本プロジェクトで得られた GaN 結晶を種結晶として GaN インゴットを作製し、世の中に GaN ウエハを安定的かつ多量に供給可能な技術を開発する。当該 GaN ウエハ上に PND だけでなく MOS トランジスタといったより幅広く用いられる電子デバイスを作製する。デバイス性能を劣化させるキラ－欠陥 (不純物偏析、積層欠陥、点欠陥など) を同定する。

○Report summary (English)

Principal investigator: Yusuke Mori, Professor of Osaka University

R & D title: 8 inch ultra large diameter GaN wafer for energy saving devices

1. Purpose of R & D

Although GaN-based nitride semiconductors have the best optical and electronic properties among semiconductor materials, they have only been put to practical use as blue light-emitting devices because the crystal growth technology has not been established. It barely exploits the excellent potential of nitride semiconductor materials. In this research, we aim to develop large-diameter, high-quality GaN bulk crystals and wafer fabrication technology that has been impossible to achieve so far. By using the next-generation optical, high-frequency, and power devices fabricated on large-diameter, high-quality GaN wafers, which are the results of this research, energy saving in electrical equipment such as hybrid engines and air conditioners can be achieved. High efficiency solar cells and solar cells also can be achieved according to the figure of merit expected from the physical properties of GaN-based nitride semiconductors, and it is possible to build a low-carbon society that minimizes carbon dioxide emissions. Summing up these effects, the Ministry of Economy, Trade and Industry estimates that in 2030, an energy saving effect of more than 260 billion kWh and a CO₂ reduction effect of about 150 million tons are expected.

2. Outline of R & D

(1) Contents:

The Osaka University group produced a GaN crystal with a diameter of 4 inches or more and a low dislocation density, and also worked on the establishment of surface treatment technology by the catalyst-based etching (CARE) method. In addition, we investigated the relationship between dislocation propagation morphology and current leakage. In the Hyogo Prefectural University group, dislocations in the GaN substrate were visualized using bright-field X-ray topography using synchrotron radiation. At the Toyota Central Research Institute group, vertical diodes were fabricated on a Na flux GaN substrate and their current-voltage characteristics were evaluated. Furthermore, the distribution of dislocations under the electrodes of the prototype diode was evaluated by reflection X-ray topography.

(2) Achievements:

The Osaka University group succeeded in producing a 4-inch GaN crystal by the point seed method. As a result of evaluating the dislocation density by multiphoton photoluminescence, it was found that the dislocation density was 10^3 to 10^5 cm⁻², which was higher than that of a commercially available GaN substrate. Toyoda Gosei Co., Ltd., which transferred this technology, also succeeded in obtaining an 8-inch GaN wafer. We also succeeded in observing dislocations in the GaN substrate using multi-wave diffraction bright-field X-ray topography. Since the GaN substrate has a high electron density, it has a low X-ray transmittance, and it has been difficult to visualize dislocations in crystals so far. This time, we reduced the substrate thickness to 100 μm, succeeded in visualizing dislocations, and made it possible to evaluate defects in a wide area. It was confirmed that the reverse leakage current was about 100 pA (47 nA/cm²) when 1000V was applied in the PN diode prototyped on the Na-flux method GaN substrate (diameter: 520 μm), which was lower than the PN diode on the commercially available GaN substrate. Furthermore, we succeeded in evaluating the dislocation distribution under the electrodes of the prototype PND by the reflected X-ray topography, and found that even a PN diode with a low leakage current contained 10 to 20 dislocations. From this, it was suggested that dislocations are not always a factor that causes a leak current.

(3) Future developments:

We try to produce a GaN ingot using the GaN crystal obtained in this project as a seed crystal, and a technology that enables stable and large-volume supply of GaN wafers will be developed. Clarify the defects which cause degradations in vertical GaN diodes.