

## Transmission electron microscopy studies of thermal degradation of InGaN/GaN quantum wells

mgr inż. Artur Lachowski

### STRESZCZENIE

Wykorzystanie struktur opartych o azotek galu (GaN) pozwoliło na opracowanie wydajnych źródeł światła niebieskiego i zielonego. Azotkowe diody elektroluminescencyjne (LED) i laserowe są obecnie powszechnie wykorzystywane w wielu dziedzinach techniki. Jednak pomimo wysokiego stopnia zaawansowania jakie osiągnęły te emitery światła na przestrzeni ostatnich lat, pewne problemy technologiczne związane z ich produkcją pozostają nierozwiązane. Jedną z takich trudności, jest termiczna degradacja obszaru aktywnego w postaci studni kwantowych  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$  podczas wzrostu epitaksjalnego, co przekłada się na obniżenie wydajności urządzeń optoelektronicznych.

W ramach niniejszej pracy skupiono się na zbadaniu, jak przebiega proces degradacji termicznej oraz czy możliwa jest poprawa stabilności termicznej warstw  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ . Uzyskane wyniki pozwoliły na opracowanie nowego modelu degradacji studni kwantowych. Pokazano, że proces degradacji jest inicjowany przez dyfuzję wakansów metalicznych do studni kwantowych, z warstw położonych pod obszarem aktywnym. W studniach dochodzi do aglomeracji wakansów i powstawania nanometrycznych pustek. Atomy indu dyfundują preferencyjnie do pustki, tworząc przy niej wydzielena bogate w ind. W ten sposób w obrębie studni powstają rozciągnięte defekty, w których nie zachodzi rekombinacja promienista.

Zrozumienie mechanizmu odpowiadającego za degradację studni kwantowych umożliwiło zaproponowanie rozwiązania poprawiającego ich stabilność termiczną. Zademonstrowano, że wprowadzenie atomów domieszek (Si lub Mg) w bezpośrednie otoczenie studni kwantowych wpływa zarówno na koncentrację wakansów metalicznych, jak i ich dyfuzyjność. Poprzez dobór odpowiedniego domieszkowania, możliwe jest więc ograniczenie aglomerowania się wakansów i tym samym degradacji studni kwantowych. Szczególnie korzystne okazało się zastosowanie domieszkowania krzemem barier GaN oddzielających od siebie studnie kwantowe. Dzięki temu uzyskano pełną stabilność termiczną studni kwantowych w  $960^\circ\text{C}$ , co stanowiło poprawę o  $60^\circ\text{C}$  w porównaniu do typowych struktur bez dodatkowego domieszkowania.

*Artur Lachowski*

# Transmission electron microscopy studies of thermal degradation of InGaN/GaN quantum wells

Artur Lachowski, MSc

## ABSTRACT

Gallium nitride (GaN) made it possible to develop solid-state sources of blue and green light. Nitride light-emitting diodes (LEDs) and lasers are now widely used in many fields of technology. However, despite the great progress these emitters have made in recent years, some technological issues related to their epitaxial growth remain unresolved. Thermal degradation of the active region consisting of  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$  quantum wells (QWs) during the epitaxial growth of a complete device is one of such difficulty.

The present work focuses on investigating the mechanisms behind the degradation of  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$  QWs and answering the question of whether their thermal stability at elevated temperatures can be improved. The results obtained allowed the development of a new model for the degradation process of QWs. It was shown that the degradation process is initiated by the diffusion of metal vacancies from the layers located below the active region into the quantum wells. In the QWs, the vacancies agglomerate and form nanometric voids. Indium atoms diffuse preferentially to the voids, forming an In-rich phase. In this way, extended defects consisting of a void and an In-rich inclusion are formed. Within the defects, radiative recombination does not occur, which negatively affects the efficiency of light emitters.

Understanding the mechanism responsible for the degradation of QWs allowed to propose a solution to improve their thermal stability. It has been shown that the presence of dopant atoms (Si or Mg) in the vicinity of the QWs affects both the concentrations and the diffusivities of metallic vacancies. By tailoring the doping, it was therefore possible to reduce the clustering of vacancies and thus the degradation of the QWs. The use of silicon doping in the barrier layers separating the QWs proved to be particularly beneficial. Full thermal stability of the QWs at  $960^\circ\text{C}$  was achieved with a Si doping level in the barriers of  $1 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ , which was a  $60^\circ\text{C}$  improvement over typical undoped structures.

*Artur Lachowski*