

Abstract

The advanced control of point defects in wide-bandgap semiconductor materials is presented in this work. This includes the method of influencing the chemical potential via thermodynamic growth conditions, as well as the novel defect quasi Fermi level control method by minority carrier injection during crystal growth. An introduction to the formation energy of point defects in different charge state is given and the potential reduction of compensating defect concentrations by above-bandgap illumination is discussed. The experimental methods of measuring III-nitride epitaxial films and the respective defect concentrations are briefly reviewed. Si-doped GaN drift layers with very low doping concentrations were produced for power electronic applications. It was found that Carbon impurities dominate the electrical compensation mechanisms, suggesting that C_N is the main reason for the mobility collapse of n-type GaN films grown by MOCVD. The application of the Ga-supersaturation scheme during epitaxial growth allowed us to control the total C incorporation into the Ga-polar samples over a range of over 4 orders of magnitude. By optimizing the chemical potential, we were able to reduce C defects down to a minimum concentration of around $2 \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ which facilitates extremely low free carrier concentrations and high electron mobilities.

As for the defect quasi Fermi level control scheme, the first light intensity experiment was conducted using n-type GaN layers that were irradiated with above-bandgap light. The electrical and optical measurements on the sample series showed a reduction of compensating defects that was proportional to the light intensity during epitaxy. Furthermore, it was found via SIMS that the total concentration of C impurities did not change with illumination, which indicates a light-induced change of the electronic C defect state by increase of the C_N formation energy through defect quasi Fermi level control. Finally, the same defect control scheme was implemented for the reduction of the Mg memory effect in GaN structures used for electron blocking. It was revealed that above-bandgap illumination decreases the carry-forward of Mg into unintentionally doped GaN layers by up to one order of magnitude, depending on the photon flux density in the illuminated sample area. The dynamics of the Mg migration in GaN were studied and an electrical insulation layer was generated by using the experimental data from previous SIMS and PL measurements.

Deutsche Zusammenfassung

In dieser Arbeit wird die erweiterte Kontrolle von Punktdefekten in Gruppe-III Nitrid-Halbleitermaterialien mit breiter Bandlücke vorgestellt. Dies schließt die Methode der Beeinflussung des chemischen Potentials über die Wachstumsbedingungen sowie die Kontrolle des Fermi-Levels durch Minoritätsladungsträgerinjektion während des Kristallwachstums ein. Zunächst wird die Formierungsenergie von Punktdefekten in unterschiedlichen Ladungszuständen präsentiert, um die potentielle Reduktion der Defektkonzentrationen durch Anregung mit Licht zu diskutieren. Die experimentellen Verfahren zur Erzeugung von III-Nitrid-Kristallfilmen und die Messtechniken der jeweiligen Defektkonzentrationen werden vorgestellt. Ansätze der Punktdefektverringerng werden im Folgenden besprochen, einschließlich der Beleuchtung mit Licht oberhalb der energetischen Bandkante während des epitaktischen Wachstums von dotierten GaN- und AlGaN-Dünnschichten für verschiedene Halbleiterbauelemente. Für leistungselektronische Anwendungen werden Silizium-dotierte GaN Driftschichten mit sehr niedrigen Ladungsträgerkonzentrationen benötigt. Es wird im Rahmen dieser Arbeit festgestellt, dass Kohlenstoffverunreinigungen die elektrischen Kompensationsmechanismen dominieren. Die Anwendung des Ga-Übersättigungsschemas während des epitaktischen Wachstums erlaubt es, den Kohlenstoff-Einbau in die Ga-polaren Proben über einen Konzentrationsbereich von über 4 Größenordnungen zu kontrollieren. Durch Optimierung des chemischen Potentials kann die C-Gesamtkonzentration bis auf einen Minimalwert von ca. $2 \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ reduziert werden, was extrem niedrige Ladungsträgerkonzentrationen und eine hohe Beweglichkeit der freien Elektronen ermöglicht. Dies ist entscheidend für die Entwicklung zukünftiger vertikaler GaN-Leistungselemente.

Für das Fermi-level Kontrollschema wird das erste Lichtintensitäts- Experiment unter Verwendung von n-GaN Schichten vorgestellt, die während des Wachstums mit Licht oberhalb der Bandlücke bestrahlt werden. Die elektrischen und optischen Messungen an der Probenserie zeigen eine Verringerung der Kompensationsdefekte (C_N), die proportional zur Lichtintensität während der Epitaxie ist. Weiterhin wird mit Hilfe von SIMS Messungen festgestellt, dass sich die Gesamtkonzentration von C- Verunreinigungen nicht durch die Bestrahlung verändert, was eine lichtinduzierte Modifizierung des elektronischen C- Defektzustandes anzeigt. Schließlich wird das Fermi-Level Kontrollschema für die Reduktion des Mg- Memory-Effekts in GaN-Strukturen implementiert, welches von besonderer Bedeutung für die Erzeugung isolierender GaN-Bauelementstrukturen ist. Es wird gezeigt, dass der Transfer von Mg in ungewollt dotierte GaN-Schichten abhängig von der Photonenflussdichte im beleuchteten Probenbereich reduziert werden kann. Abschließend wird die Dynamik der Mg-Migration in GaN diskutiert und eine elektrische Elektronen-Isolationsschicht unter Verwendung der experimentellen Daten aus SIMS- und PL-Messungen erzeugt.