
MOVPE Wachstum und Eigenschaften von AlIn(Ga)N Schichten und Schichtsystemen

In vorliegender Arbeit werden Gruppe-III-Nitrid Schichten und Schichtstrukturen untersucht, wobei der Fokus auf dem ternären Aluminiumindiumnitrid (AlInN) und dem quaternären Aluminiumindiumgalliumnitrid (AlInGaN) liegt. Diese Materialien eröffnen in Bezug auf Bandlücke, Polarisation, Gitterkonstante und optischen Eigenschaften für das Design von elektronischen und optoelektronischen Bauelementen neue Freiheitsgrade. Die Verbindungshalbleiter wurden mittels der metallorganischen Gasphasenepitaxie (MOVPE) gezüchtet, welche eine sehr vielseitige Technik für die Herstellung von Gruppe-III-Nitriden ist, aber aufgrund des großen Prozessparameterraums als anspruchsvoll gilt. Die Züchtung von ternären und quaternären AlIn(Ga)N-Schichten ist zusätzlich herausfordernd, da die binären Gruppe-III-Nitride sehr unterschiedliche Wachstumstemperaturen und Partialdrücke haben, was zu einer ausgeprägten spinodalen Mischungslücke führt. Um durch Verspannung entstehende Kristallfehler zu minimieren, wurde bisher meist $Al_{1-x}In_xN$ mit $x = 0.174$ erzeugt, welches gitterangepasst zu GaN ist und damit die Herstellung verspannungsfreier Heterostrukturen ermöglicht.

Wie hier gezeigt und diskutiert wird, können durch pseudomorphes Wachstum auf GaN-Pseudosubstraten AlIn(Ga)-Schichten in einem breiten Mischungsbereich erzeugt werden ohne das dabei Phasenseparation auftritt. Die Prozessparameter sind dabei so zu wählen, dass bei einem hohen V-III-Verhältnis die Wachstumstemperatur größer als 740°C ist. Sind diese Bedingungen erfüllt, so kann der Indiumanteil über die Temperatur und die Wachstumsgeschwindigkeit über das Aluminiumangebot im Reaktor gesteuert werden.

Untersuchungen der kristallographischen Eigenschaften der Schichten zeigen, dass durch die Optimierung der Prozessparameter für das Wachstum von AlIn(Ga)N, epi-Schichten in einer bisher unerreichten kristallinen Qualität hergestellt werden können. Wichtige physikalische Eigenschaften, wie die Bandlücke, konnten deshalb genauer bestimmt werden.

Das Potential von AlInN und AlInGaN Verbindungen für elektronische und optoelektronische Bauteile wurde für zwei zukünftige Anwendungen überprüft:

- Um eine CMOS-ähnliche Logik für hohe Betriebstemperaturen auf Basis der Gruppe-III-Nitride zu realisieren, sind Feldeffekttransistoren (FET) mit Löcherleitung ideal geeignet. Ein solches Bauelement sollte sich mit einer $Al_{1-x}In_xN/GaN$ -Heterostruktur mit einem Indiumgehalt, der größer als 30% ist, herstellen lassen, da sich an der Grenzfläche ein durch Polarisationsfelder induziertes 2d-Löchergas bildet. Die Realisierbarkeit eines solchen Bauelements wurde sowohl experimentell wie auch theoretisch untersucht.
- Da die elektrischen Felder an den Grenzflächen die Effizienz und thermische Stabilität der Lumineszenz von Gruppe-III-Nitrid Lichtemittern limitieren, sind neue Ansätze notwendig, um diese Felder in zukünftigen Bauelementen zu vermeiden oder zu reduzieren. In dieser Arbeit konnte gezeigt werden, dass mit AlInGaN als Barrierenmaterial eine deutliche Polarisationsreduktion erreicht werden kann.

MOVPE growth and properties of AlIn(Ga)N epilayers and heterostructures

This work presents investigations on group-III-nitrides semiconductor epilayers and heterostructures, focusing on ternary Aluminium Indium Nitride (AlInN) and quaternary Aluminium Indium Gallium Nitride (AlInGaN). Such materials structures provide an additional degree of freedom with respect of band gap engineering, polarization and lattice adjustment and optoelectronic confinement for the design of electronic and optoelectronic group-III-nitride device structures. The growth of these compound semiconductor alloys was accomplished by metalorganic vapor phase epitaxy (MOVPE), which is a very versatile growth technique to fabricate group III-nitride epilayers, but at the same time deemed to be extremely challenging due to the large processing parameter space. The formation of ternary and quaternary AlIn(Ga)N epilayers is further challenged due to the growth temperature gaps and vastly different partial pressures between the group III-nitride binaries, which lead to a spinodal decomposition in a wide composition range. To reduce lattice strain induced defects, previous investigations have shown that $Al_{1-x}In_xN$ alloys with $x = 0.174$ can be grown lattice matched to GaN, which enables the creation of strain-free heterostructures.

As described and discussed here, the pseudomorphic growth on GaN templates allows the growth of AlIn(Ga)N epilayers in a wide compositional range without detectable phase separations. The established processing window shows that growth temperatures above 740°C and an elevated V-III-ratio are required to maintain single-phase alloys. Under these conditions the indium concentration in the AlInGaN can be tailored by controlling the growth temperature, while the growth rate can be controlled by the aluminium precursor supply in the reaction zone.

As shown in this work, by optimizing the process parameter space for the growth of AlIn(Ga)N epilayers, an unmatched layer quality has been accomplished as indicated in the characterization results of the crystallographic layers properties. The fundamental physical properties such as the optical band gap are determined with high precision as function of alloy composition. The potential of AlInN and AlInGaN alloys and heterostructures for electronic and optoelectronic device structures has been reviewed for two prospective applications:

- To realize a group-III-nitride CMOS-like logic element that can operate at high working temperatures a field effect transistor (FET) with a hole conductivity would be an ideal candidate. Such a structure can be realized for AlInN/GaN heterostructures with indium concentration higher than 30% due the polarization fields induce a 2d hole gas at the interface. The viability of such a device has been investigated both experimentally and theoretically.
- Since interfacial electric fields limit the luminescence efficiency and thermal stability of group III-nitride based light emitters, new approaches are needed that reduce or avoid such fields in potential device structures. This work verified the substantial polarization reduction ability of AlInGaN epilayers as barrier material for emerging light emitting device structures.