

Abstract

Self-assembled InAs quantum dots (QDs) with a few 10 nanometer (nm) size and atomic-like zero-dimensional electron states have prospective applications in semiconductor opto-electronic devices. Structural features in such system are essential and highly influence the opto-electronic properties of the dots. In the present work, we focus on methods for structural characterization to evaluate structure properties of InAs QDs, such as ordering, shape, composition and strain status.

Quantitative x-ray diffraction and atomic force microscopy (AFM) experiments have been performed on self-assembled InAs QDs grown by molecular-beam epitaxy (MBE). *In situ* RHEED was utilized to control the InAs coverage. We find InAs deposited for homogeneous InAs QD growth is limited to be 2.3 ML, beyond which saturation effects of the dot number density are observed by AFM.

From grazing incidence small angle x-ray scattering (GISAXS) we find pronounced non-specular diffuse scattering satellite peaks, indicating a lateral ordering in InAs QD distribution. Mean dot-dot distances and correlation lengths of the dot lateral distribution are found to be anisotropic. We determine the most pronounced ordering of dot distribution in [110] direction. Moreover, we observe additional broad intensity peaks induced by the truncation rod intensity of InAs QD facets that enable us to reveal the QD shape as a truncated octagonal-based pyramid.

The grazing incidence x-ray diffraction (GIXRD) technique allows determination of strain status inside the InAs QDs. Strain as a driving force for InAs QD formation, is revealed experimentally to be elastic with different components in all measured samples. Furthermore, a small volume fraction of relaxed $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ is found in samples with relative low As-flux.

In addition, the atomic structure at the interface of buried InAs ultra-thin films is a dominant element for opto-electronic properties of InAs quantum wells fabricated by

hetero-epitaxy of MBE growth. We structurally characterize the interface by using the combination of grazing incidence x-ray reflectivity (GIXR), crystal truncation rod (CTR) and x-ray standing wave (XSW) techniques. GIXR and CTR experiments were utilized to determine the average layer thickness, interface roughness, and the stoichiometry of the InAs layer. XSW experiments determine the In lattice site and vertical distribution at the interface.

Inhaltsangabe

Selbstorganisierte InAs Quantenpunkte (QDs) mit Abmessungen von wenigen 10 Nanometern (nm) und mit Atom-ähnlichen null-dimensionalen Elektronenzuständen haben potentielle Anwendungen in Bauelementen der Halbleiter-Optoelektronik. Die strukturellen Eigenschaften solcher Systeme sind von wesentlicher Bedeutung und beeinflussen entscheidend die opto-elektronischen Eigenschaften der Quantenpunkte. In der vorliegenden Arbeit liegt das Hauptaugenmerk auf Methoden zur strukturellen Charakterisierung, mit denen die strukturellen Eigenschaften von InAs QDs, wie Anordnung, Form, Komposition und Verspannung ermittelt werden können.

Quantitative Röntgendiffraktion und Rasterkraftmikroskopie (Atomic Force Microscopy, AFM) wurden an selbstorganisierten InAs QDs durchgeführt, die durch Molekular-Strahl-Epitaxie (MBE) gewachsen wurden. Es wurde Elektronenbeugung (RHEED) verwendet, um das Wachstum und die Dicke der InAs-Schichten zu kontrollieren. Wir finden, daß die InAs-Schichtdicke für ein homogenes InAs QD Wachstum auf 2.3 ML begrenzt ist, und daß bei höheren Bedeckungen Sättigungseffekte der Dichte der QD mittels AFM beobachtet werden können.

Mit Röntgenstreuexperimenten bei streifendem Einfall (grazing incidence small angle x-ray scattering GISAXS) wurde deutliche, nicht spekulare Satellitenpeaks beobachtet, die auf eine laterale Ordnung der InAs Quantenpunkte hinweisen. Der mittlere Abstand zwischen den QD und die Korrelationslängen der lateralen Verteilung sind anisotrop. Wir stellen fest, daß die Verteilung der QD in Richtung $[110]$ am regelmäßigsten ist.

Außerdem beobachten wir zusätzliche breite Peaks in der Streuintensität bei größeren Winkeln, die durch reziproke Gitterstäbe senkrecht in den InAs QD Facetten induziert werden. Das ermöglicht uns, die QD-Form als abgeflachte Pyramide mit oktagonaler Basis zu bestimmen.

Die Technik der Röntgenstreuung (Grazing incidence x-ray diffracting, GIXRD) bei streif-

endem Einfall erlaubt die Bestimmung des Verspannungszustandes innerhalb der InAs QDs. Die Verspannung als treibende Kraft für die Bildung von InAs QD zeigt sich experimentell in allen gemessenen Proben als elastisch mit unterschiedlichen Komponenten. Außerdem findet sich ein kleiner Volumenanteil von relaxiertem $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ in Proben mit niedrigem Arsenfluß.

Zusätzlich ist die atomare Struktur an der Grenzfläche eines vergrabenen ultradünnen InAs Films ein wichtiges Element für die opto-elektronischen Eigenschaften der durch heteroepitaktisches MBE-Wachstum hergestellten InAs Quantenwells. Wir charakterisieren die Struktur der Grenzfläche mit einer Kombination aus Techniken der Röntgenuntersuchungen, wie Reflexion unter streifen-dem Einfall (grazing incidence x-ray reflectivity, GIXR), Crystal Truncation Rod (CTR) und x-ray standing wave (XSW). Mit GIXR und CTR-Experimenten wurde die durchschnittliche Schichtdicke, die Rauigkeit der Grenzfläche und die Stöchiometrie der InAs-Schichten bestimmt. XSW-Experimente bestimmen die Position der In-Atome im Gitter sowie die vertikale Verteilung an der Grenzfläche.