

Dipl. Phys. Alexander Franke

## Zusammenfassung: Licht - Materie - Wechselwirkung in nitridischen Mikrokavitäten

Gegenstand der vorliegenden Dissertation sind Untersuchungen zur fundamentalen Licht-Materie-Wechselwirkung im nitridischen Materialsystem. Vermöge ihrer großen Exzitonенbindungsenergie können in ihnen bevorzugt die Eigenschaften der Ankopplung exzitonischer Lumineszenz an eine elektromagnetische Feldmode über einen großen Temperaturbereich bis Raumtemperatur untersucht werden. Platziert man einen aktiven Emitter (bevorzugt Quantenfilme)

zwischen die Spiegel eines Mikroresonators mit einem gegenseitigen Abstand in der Größenordnung der Lichtwellenlänge, folgen drastische Änderungen der Emissionscharakteristik mit einer gerichteten Abstrahlung bei erhöhter Rekombinationsrate (schwache Ankopplung, PURCELL-Effekt) bis hin zu einer spontanen Emission aus einem Quasi-Bose-Einstein Kondensat (starke Ankopplung). Der Übergang zwischen beiden Grenzfällen erfolgt kontinuierlich bei gesteigerten Reflexionsverlusten durch die Resonatorspiegel bzw. erhöhten Ladungsträgerkonzentrationen (MOTT-Übergang).

Eine eindeutige Unterscheidung gelingt durch Ausmessen der Dispersionskurven zugrunde liegender rekombinierender Ladungsträger in winkelaufgelösten Experimenten. Während bei einer schwachen Licht-Materie-Wechselwirkung eine parabolische Dispersion rekombinierender Exzitonен bzw. Elektronen und Löcher durchschritten wird, erfolgt in starker Kopplung die Emission von Exzitonен-Polaritonен. Sie bilden sich aus der symmetrischen und antisymmetrischen Superposition photonischer und exzitonischer Zustände. Die Ausbildung zweier Polaritonенmoden mit wechselndem photonischen und exzitonischem Einfluss sowie spektral gegenläufigem „anticrossing“-Verhalten lässt sich nach Variieren des Detektionswinkels erwarten. Jedoch führen gerade in nitridischen Mikrokavitäten wachstumsbedingte strukturelle Defekte, Dicken- sowie Konzentrationsfluktuationen ternärer aktiver Quantenfilmemitter zu einer großen inhomogenen Linienbreite exzitonischer Lumineszenz, verbunden mit einer unterdrückten Ausbildung starker Kopplung. Die vorliegende Arbeit behandelt in einem ersten Teil gezielt, auf

das nitridische Materialsystem angepasste, Nachweismethoden zur Identifizierung starker Licht-Materie-Wechselwirkung und geht in einem zweiten Abschnitt direkt auf die Anforderungen zur Herstellung resonanter, nitridischer Mikrokavitäten ein. Zur Analyse der Dispersion polaritonischer Emission wurde ein neuartiges Nachweisverfahren der winkelaufgelösten Kathodolumineszenz erfolgreich etabliert. Nach einer Elektronenstrahlanregung kann die Emissionscharakteristik der Mikrokavitäten über einem Viertel des vollen  $4\pi$ -Polar-Azimut-Raumwinkels detektiert werden. Die zusätzliche Möglichkeit eines Temperaturdetunings im Intervall zwischen  $5\text{ K} \leq T \leq 315\text{ K}$  erlaubt ein gezieltes Einstellen der Resonanzbedingung starker Licht-Materie-Kopplung. Erst die Reduzierung des Anregungsvolumens innerhalb des aktiven Mediums der nitridischen Mikrokavitäten in der Kathodolumineszenz erlaubt den Nachweis der lokalen Kopplungseigenschaften. So konnte eine um den Faktor fünf gesteigerte Kopplungskonstante (entsprechende Exzitonен-Polaritonен-Aufspaltung:  $\Omega = 75\text{ meV}$ ) der Licht-Materie-Wechselwirkung in einer InGaN-Mikrokavität gegenüber sonst etablierten integralen Photolumineszenzmessungen erhalten werden.

Strukturelle und optische Einflussfaktoren auf die starke Licht-Materie-Kopplung wurden an Hand einer InGaN-Mikrokavität systematisch analysiert und zur Optimierung einer hybriden UV-Mikrokavität angewendet. Durch den Übergang zu binären GaN bzw. InGaN-Quantenfilmen mit minimalen Indium-Konzentrationen ließ sich die exzitonische Linienbreite halbieren. Nach Erfüllen einer „spektralen“ (BRAGG-Energie = Emissionsenergie Quantenfilme) sowie „geometrischen“ Resonanzbedingung (angepasste Kavitätsdicke) wurde das Regime starker Kopplung erreicht. Winkelaufgelöste Tieftemperaturexperimente belegen eine parabolische Dispersion einer Emission aus der unteren Polaritonенmode bei einer Exzitonен-Polaritonен-Aufspaltung von  $\Omega = 15\text{ meV}$ .

Dipl. Phys. Alexander Franke

## Abstract: Licht - Materie - Wechselwirkung in nitridischen Mikroavitäten

Fundamentals of light matter coupling was investigated in group III-nitride semiconductor microcavities. Drastically changes in output characteristic are achieved by surrounding an active emitter by the two mirrors of a FABRY-PEROT-resonator. At weak coupling of quantum well excitons with a cavity mode of the resonator results in an enhancement of spontaneous emission rate (Purcell-Effect) and directional emission at the resonance energy of both modes. In contrast two admixed polaritonic emission modes showing an anticrossing angle dispersion behaviour arise in strong coupling regime. Because of their bosonic nature and strongly reduced effective masse ( $10^{-5}$  of electron mass) fundamental properties like BOSE-EINSTEIN-condensation as well as polaritonic devices such as polariton lasers without need of population inversion and very low threshold are achievable at remarkable high temperatures.

Especially III-nitride alloys offer an increased coupling strength of the light matter interaction. Furthermore, they provide stable polaritons above room temperature, thanks to their high exciton binding energy exceeding  $k_B \cdot 295 \text{ K} = 25,4 \text{ meV}$ .

Nevertheless dominant alloy fluctuations in ternary InGaN-quantum well microcavities as well as structural inhomogeneities (thickness fluctuations, defects) causes characteristic inhomogeneous broadening of emission lines. As a result strong coupling is suppressed.

The proof of strong coupling regime reduces to small regions with minor influence of inhomogeneous broadening. They could be effectively probed by use of a drastically important reduced excitation volume in cathodoluminescence microscopy (CL). A novel angle resolved CL setup optimized for investigation of nitride microcavities was built up. It allows measurement of cavity-polariton dispersion over a huge angular region of one quarter of the full  $4\pi$ -solid angle. Additionally systematic variation of the sample temperature in the range of  $5 \text{ K} \leq T \leq 315 \text{ K}$  allows further detuning into resonance by direct changing the emission energy of the active layer. By local angle resolved CL investigations strong coupling could be verified at a hybrid InGaN microcavity. Two polaritonic emission peaks showing an anticrossing dispersion are observed. The minimum exciton polariton splitting reaches  $75 \text{ meV}$ . In contrast a five times smaller splitting was measured in usually used integral angle resolved photoluminescence (PL) study due to larger excitonic linewidth at an increased excitation volume.

In a second part of the thesis conditions for achieving strong coupling are deduced by correlation of structural and optical investigations on a InGaN microcavity emitting in visible spectral range. They are used for optimization of an InGaN/AlGaN-based UV microcavity. Starting from the „semi“ microcavity, consisting of an epitaxially grown bottom DBR and a cavity layer including five quantum wells as active medium, resonant conditions could to be verified by spatially resolved reflectivity and photoluminescence scans across the full wafer. After adjustment of the cavity thickness a full resonant structure is achieved by depositing a dielectric top BRAGG-mirror. Spatial, temperature and angle resolved CL and PL investigations were applied to distinguish between strong and weak coupling regime.

While the InGaN microcavity in the visual spectral range provides only one narrowed emission line at the resonance energy in weak coupling regime, polaritonic emission of the lower polariton branch is found for the UV microcavity. The estimated exciton-polariton splitting reaches  $15 \text{ meV}$ . Strong light matter coupling is preferred in the UV microcavity due to strongly reduced inhomogeneous broadening and enhanced alignment of the quantum well with respect to the maximum of the standing wave pattern inside the cavity.