

DISS. ETH NO. 18560

Mesoscopic Cavity QED
with a
Single Quantum Dot

A dissertation submitted to

ETH ZURICH

for the degree of

Doctor of Sciences

presented by

Martin Winger

Dipl. Phys. ETH
ETH Zürich

born 24th of September 1982

citizen of Austria

accepted on the recommendation of:

Prof. Dr. Ataç Imamoğlu, examiner
Prof. Dr. Vincenzo Savona, co-examiner

2009

Summary

This dissertation investigates phenomena of cavity quantum electrodynamics using a system in which a single self-assembled InAs quantum dot (QD) is coupled to the fundamental mode of a photonic crystal resonator. In contrast to clean atomic-physics realizations of cavity QED, this system is embedded in a complex solid-state environment, which in consequence leads to novel effects.

This thesis demonstrates the coupling of photonic crystal cavities to single quantum dots in a fully deterministic fashion. An atomic force microscope is used to map the position of the QDs on the semiconductor chip. Based on this information, cavities are fabricated around the QDs to ensure maximal overlap of the emitter with the cavity. For the in-situ control of the cavity wavelength a cryogenic gas adsorption technique is implemented. The investigation of the system by photoluminescence spectroscopy reveals that the system obeys the conditions of the strong coupling regime. The QD-cavity system displays the expected quantum anharmonic behavior characteristic of a two-level emitter strongly coupled to a cavity mode.

Studying the strong coupling behavior of various QD transitions in photoluminescence, the excitonic fine structure of the QD states is investigated. It is demonstrated that the interaction with the cavity mode is a useful spectroscopic tool for the investigation of basic QD properties. In particular, the technique reveals a novel coupling mechanism between dark and bright exciton configurations that is mediated by the combined action of nuclear spins and the confined light field.

Cavity modes containing QDs exhibit strong emission in photoluminescence even if the cavity mode is far detuned from any discrete optical transition of the QD. Here, we unambiguously demonstrate that this cavity-feeding effect can be related to the presence of a single QD in the cavity. A full model for off-resonant cavity emission is developed, in which the mesoscopic nature of QD confinement plays a central role in explaining the experiments. Using pump-power dependent photoluminescence spectroscopy and photon-correlation techniques, we explain the origin of cavity feeding: cavity mode excitation arises from QD states containing multiple electron-hole pairs that exhibit strong many-body interactions with the surrounding bulk system. Our model accounts for both the occurrence of off-resonant cavity emission and the surprising photon-correlation signatures found experimentally. Moreover, for small detunings we find that cavity feeding via acoustic phonons plays a key role.

Finally, this work implements a novel resonant spectroscopy technique for more refined optical investigation of our cavity-QED system. In a first experiment, vacuum Rabi splittings for several QD transitions are observed. However, the presence of an uncoupled cavity peak on resonance opens up new questions and hints at new and hitherto unexplored phenomena of solid-state cavity QED.

Zusammenfassung

Diese Dissertation untersucht Effekte der Resonator-Quantenelektrodynamik anhand eines Systems, in welchem ein einzelner selbst-organisierter InAs-Quantenpunkt an die fundamentale Schwingungsmode eines photonischen Kristallresonators koppelt. Im Gegensatz zu sauberen Implementationen in der Atomphysik ist dieses System in eine komplexe Festkörperumgebung eingebettet, wodurch sich neuartige physikalische Effekte ergeben.

Diese Arbeit demonstriert die vollständig deterministische Kopplung photonischer Kristallresonatoren an einzelne Quantenpunkte. Mithilfe eines Rasterkraftmikroskops lassen sich die exakten Positionen der Quantenpunkte auf dem Halbleiterchip bestimmen. Ausgehend von den extrahierten Koordinaten werden die Resonatoren um die Quantenpunkte so positioniert, dass sich ein maximaler Überlapp zwischen dem Resonatorfeld und dem Quantenpunkt ergibt. Um im Experiment die Wellenlänge des Resonatorfeldes an die optischen Übergänge des Quantenpunktes anzupassen, wurde ein Verfahren entwickelt, das auf kryogener Gasadsorption basiert. Die Untersuchung des Quantenpunkt-Resonator-Systems mittels Photolumineszenz-Spektroskopie zeigt, dass das System die Kriterien der starken Emitter-Resonator-Kopplung erfüllt. Darüber hinaus weist das Emitter-Resonator-System das charakteristische anharmonische Verhalten eines Zwei-Niveau Emitters auf, das an einen Resonator koppelt.

Die Untersuchung der Resonator-Emissionsspektren verschiedener Übergänge des Quantenpunktes erlaubt zudem die Untersuchung der Feinstruktur der Exzitonenzustände. Es wird gezeigt, dass die Wechselwirkung mit dem Resonatorfeld ein nützliches spektroskopisches Hilfsmittel zur Untersuchung der Eigenschaften des Quantenpunktes darstellt. Insbesondere erlaubt uns diese Technik, einen neuartigen Kopplungsmechanismus zwischen exzitonischen Hell- und Dunkelzuständen zu identifizieren, welcher durch die gemeinsame Wechselwirkung mit den Kernspins und dem Resonatorfeld zustande kommt.

Hohlraumresonatoren mit integrierten Quantenpunkten weisen starke Emission in Photolumineszenz auf, selbst wenn der Resonator weit von den optischen Übergängen des Quantenpunktes verstimmt ist. In dieser Arbeit wird gezeigt, dass dieser Effekt durch die Präsenz lediglich eines einzelnen Quantenpunktes zustande kommt. Zudem wird ein vollständiges Modell zur Erklärung dieses Effekts entwickelt, in welchem die mesoskopische Struktur des Quantenpunktpotenzials eine wesentliche Rolle spielt. Mithilfe von Photolumineszenz-Spektroskopie in Abhängigkeit der Pumpleistung und Photonen-Korrelations-Messungen, wird das Auftreten der weit verstimmten Resonatorlumineszenz mit Zuständen in Verbindung gebracht, in welchen der Quantenpunkt mehrere Elektron-Loch-Paare enthält, die ihrerseits starken Wechselwirkungen mit dem umgebenden Festkörpersystem unterliegen. Das vorgestellte Modell erklärt sowohl das Auftreten der nicht-resonanten Resonatorlumineszenz als auch die experimentell beobachteten nicht-intuitiven Quantenkorrelationen

der Photonen. Ausserdem zeigt sich, dass für kleine Verstimmungen die Wechselwirkung mit akustischen Gitterschwingungen eine entscheidende Rolle für die nicht-resonante Resonatorlumineszenz spielt.

Schliesslich wird in dieser Arbeit ein neuartiges Verfahren entwickelt, das die resonante Spektroskopie der hier vorgestellten Systeme zum Ziel hat. In einem ersten Experiment wurde das Vakuum-Rabi-Splitting verschiedener Quantenpunkt-Übergänge untersucht. Das unerwartete Auftreten der ungekoppelten Resonatormode wirft neue Fragen auf und zeugt von neuen, bisher unbekanntem Phänomenen in der Festkörper-basierten Resonator-Quantenelektrodynamik.