ETH zürich

ETH Library

Charge tunable quantum dots embedded in photonic crystal cavities

Doctoral Thesis

Author(s):
Pinotsi, Dorothea

Publication date:
2011

Permanent link:
https://doi.org/https://doi.org/10.3929/ethz-a-006725595

Rights / license:
In Copyright - Non-Commercial Use Permitted

This page was generated automatically upon download from the ETH Zurich Research Collection.
For more information, please consult the Terms of use.

DISS. ETH NO. 19984

Charge Tunable Quantum Dots

Embedded in

Photonic Crystal Cavities

A dissertation submitted to

ETH ZURICH

for the degree of

Doctor of Sciences

presented by

DOROTHEA PINOTSI

Dipl. El. Eng.
National Technical University of Athens, Greece

born 11th of May 1983

citizen of Greece

Accepted on the recommendation of:

Prof. Dr. Ataç Imamoğlu, examiner
Prof. Dr. Jérôme Faist, co-examiner

2011

Summary

Electron spins in Quantum Dots (QDs) have emerged as potential candidates for qubits in quantum information processing systems. During the last years there has been a fast growth of research activity aimed at studying spin dynamics as well as the spin interaction with the solid state environment. Photonic crystal (PhC) slab cavities are considered very promising systems for cavity quantum electrodynamics (cavity QED) applications and spin manipulation in single QDs. Coupling a QD to a nanocavity mode enhances the interaction between photons and the electron spin in the QD, allowing for more efficient information exchange between the two. Additionally, embedding the QD inside a photonic crystal structure strongly modifies the dot's emission dynamics but also results in an enhancement of light extraction from the QD. These are the main topics of this dissertation; the system developed and studied involves a precise excitonic state of a QD coupled to a cavity mode, or located inside a photonic bandgap.

To implement this, electrically gated structures that allow for QD charge control as well as high quality (Q) factor cavity modes are fabricated. The samples studied include InGaAs QDs that are embedded in the intrinsic region of a *p*-*i*-*n* diode structure. By contacting the heavily doped n and p GaAs layers separately, voltage control of the QD charging state is achieved. As a first step, the properties of the system are studied via photoluminescence measurements at cryogenic temperatures. In order to achieve QD-cavity coupling, spatial and spectral matching is required. For spectral matching between the QD and the cavity mode we actively tune the cavity mode or the QD transition frequency. To this end, several strategies are employed, among which the quantum confined Stark effect is used in order to tune reversibly the QD-cavity coupling simply by varying the applied voltage. Purcell enhancement of the radiative decay rate in a charge controlled QD coupled to a single PhC nanocavity mode is demonstrated by means of lifetime measurements of single QD excitonic lines. Futher, via simulations we explore different photonic crystal designs in order to achieve far field emission profiles that match better the incident Gaussian laser beam and thus lead to high collection efficiency of photons through the microscope objective.

The effect of the photonic bandgap alone on the QD emission dynamics and the extraction of photons lies at the heart of the second part of our experiments. To this end, we perform resonant spectroscopy on QDs embedded in the photonic crystal cavities. High resolution Differential Reflection and Resonance Fluorescence measurements reveal the beneficial role of the photonic structure in terms of the collection efficiency of photons. Furthermore, the implemented system allows us to address a single electron spin state inside a PhC cavity.

Finally, in the theoretical part of this work the interaction between the light and the quantum emitter without the presence of the cavity is explored via use of the Quantum Cascaded systems approach.

The findings of this thesis contribute to gaining new insights into the combination of cavity quantum electrodynamics with QD resonant spectroscopy towards a spin measurement but also raises several new questions.

Zusammenfassung

Elektronenspins in Quantenpunkten (QP) haben sich als Kandidaten für Qubits zur Quanteninformationsverarbeitung etabliert. Daher wurde die Forschung über Spindynamik und Wechselwirkung zwischen Spins und deren Umgebung in Festkörpern in den letzten Jahren stark intensiviert. Kavitäten in photonischen Kristallen gelten in diesem Zusammenhang als vielversprechende Systeme fur Anwendungen in Kavitäten-Quantenelektrodynamik und zur Manipulation von Spins in einzelnen QP, weil das Koppeln von QP zu einer Nanokävitaten-Mode die Wechselwirkung zwischen Photonen und dem Elektronenspin im QP erhöht. Dies ermöglicht einen effizienteren Informationsaustausch zwischen den Beiden. Zusätzlich verändert das Einbetten von einem QP in eine photonische Kristallstruktur die Emissionsdynamik des QP stark und führt zu einer Erhöhung der Lichtextraktion aus dem QP. Dies sind die Hauptthemen dieser Dissertation; das entwickelte und untersuchte System beinhaltet einen exzitonischen Zustand eines QP der an eine Kavitäten-Mode gekoppelt ist oder in der photonischen Bandlücke liegt.

Um dies zu erreichen wurden elektrisch einstellbare Strukturen fabriziert, welche Kontrolle uber die Ladung im QP und hohe Qualität der Kavitäten-Mode ermöglichen. Untersucht wurden InGaAs QP, die in die intrinsische Region einer *p-i-n* Diodenstruktur eingebettet worden sind. Durch separate elektrische Kontakte zu den stark dotierten *n* und *p* GaAs-Lagen kann man die Ladung des QP kontrollieren. In einem ersten Schritt wurden die Eigenschaften dieser Systeme via Photolumineszenz-Messungen bei kryogenischen Temperaturen untersucht. Das Koppeln von QP zu einer Kavitat erfördert räumliche und spektrale Anpassung. Letztere erreichen wir durch aktives Abstimmen der Kavitäten-Mode oder der optischen übergangsfrequenz des QP. Dazu wurden verschiedene Methoden angewandt - unter Anderem wurde der Quanten Stark-Effekt zur reversiblen QP-Kavität-Kopplung benutzt indem eine Gatterspannung an den QP angelegt wurde. Wir demonstrieren Purcell-Verstärkung der Strahlungszerfallsrate in einem Ladungs-kontrollierten QP, der zu einer einzelnen Mode einer photonischen Kristall-Nanokavität gekoppelt ist, mittels Lebzeit-Messungen exzitonischer Linien einzelner QP. Zusätzlich untersuchen wir verschiedene Designs von photonischen Kristallen via Simulationen, um die Fernfeld-Emissionsprofile besser an den einfallenden Gauss'schen Laserstrahl anzupassen, was zu einer höheren Kollektor-Effizienz von Photonen durch das Mikroskop führt.

Der Effekt der photonischen Bandlücke auf die QP Emission Dynamik und die Extraktion von Photonen von den QP ist der zentrale Bestandteil des zweiten Teils unserer Experimente. Dazu führen wir resonante Spektroskopie an QP in photonischen Kristall-Kavitäten durch. Hoch-aufgelöste differentielle Reflektions- und Resonanzfluoreszenz-Messungen zeigen eine Erhohung der Zahl der eingefangenen Photonen dank der photonischen Struktur. Zudem ermöglicht uns das benutzte System, einzelne Spinzustände in der PhK-Kavität zu adressieren.

Schlussendlich erkunden wir im theoretischen Teil dieser Arbeit die Wechselwirkung zwischen Licht und einem Quanten-Emitter ohne Kavität mittels der Quantenkaskaden-Methode.

Die Ergebnisse dieser Dissertation tragen zu neuen Erkenntnissen über die Kombination von Kavitäts-Quantenelektrodynamik mit resonanter Spektroskopie an Quantenpunkten bei, was uns dem Ziel näher bringt einzelne Elektronenspins zu messen, aber eröffnen auch neue Frage.