

Diss. ETH No. 19455

# **Electron-Phonon Interactions in Coupled Quantum Nanostructures**

A dissertation submitted to the  
ETH ZURICH

for the degree of  
Doctor of Sciences (Dr. sc. ETH Zürich)

presented by

**Urszula Anna Gasser**

Master of Physics Jagiellonian University, Cracow  
born January 30, 1982 in Cracow, Poland  
citizen of Poland

accepted on the recommendation of:

Prof. Dr. Klaus Ensslin, examiner  
Prof. Dr. Danilo Pescia, co-examiner  
Prof. Dr. Thomas Ihn, co-examiner

Zürich, 2011

# Abstract

In this thesis we report on electron transport measurements at low temperatures on coupled quantum nanostructures fabricated by local anodic oxidation using atomic force microscopy.

In the first part, we explore in-depth the fabrication technique, focusing on double-layer lithography on a two-dimensional electron gas confined in  $n$ -type GaAs/AlGaAs heterostructures. We present a selection of several devices and demonstrate their functionality.

In the second part, we experimentally investigate the influence of the metallic top-gate on a single quantum dot. We find that the top-gate efficiently screens the electrostatic interactions between different elements of the structure. Due to screening, the charging energy of a quantum dot and the average single-level spacing decrease.

In the third part, we explore the regime where the electrostatic coupling between the double quantum dot and the quantum point contacts is suppressed and electron-phonon interactions can play a dominant role. Indirect coupling of the quantum point contact to the double quantum dot is mediated by phonons in the host crystal. The phonon bath is heated up by the current flow through the quantum point contact. The difference between electronic and phononic temperature provides the necessary energy to overcome the energy gap between the bonding and antibonding states and drives the current through the double quantum dot. This phonon mediated back-action of the quantum point contact is significant and the system acts as a thermoelectric engine. The double dot is tuned to an asymmetric regime, where one dot is strongly coupled to the source lead, whereas the second dot is more weakly coupled to the drain lead. Two independent QPCs can be simultaneously used for driving the transitions in the DQD. We observe a non-additive effect of both QPCs accompanied by the saturation of the current across the double quantum dot for large QPC currents. We explain the measured data in the framework of the interaction of electrons with acoustic phonons. We relate the power emitted by the QPC to the temperature of the phononic bath. The experiment excludes the possibility of shot-noise being the source of inter-dot transitions.

# Zusammenfassung

In dieser Arbeit berichten wir über Transportmessungen in gekoppelten Quanten-nanostrukturen bei tiefen Temperaturen. Die Strukturen wurden mit Hilfe eines Rasterkraftmikroskops und lokaler anodischer Oxidation erstellt.

Im ersten Teil erkunden wir ausführlich die Fabrikationstechnik, wobei wir uns auf Lithographie an zwei Ebenen auf einem zweidimensionalen Elektronengas konzentrieren. Dieses bildet sich an einer  $n$ -dotierten GaAs/AlGaAs-Heterostruktur aus. Wir präsentieren eine Auswahl verschiedener Strukturen und demonstrieren ihre Funktionalität.

Im zweiten Teil untersuchen wir experimentell, welchen Einfluss ein metallisches Top-gate auf einen einzelnen Quantenpunkt hat. Unsere Messungen zeigen, dass das Oberflächengatter die Wechselwirkung zwischen verschiedenen Elementen der Struktur effizient abschirmt. Aufgrund dieser Abschirmung nimmt sowohl die Ladeenergie als auch die quantenmechanische Einteilchenenergie ab.

Im dritten Teil dieser Arbeit erforschen wir das Regime, wo die elektrostatische Kopplung zwischen einem Doppelquantenpunkt und einem Quantenpunktkontakt unterdrückt ist. Elektron-Phonon-Kopplung kann dann eine dominante Rolle spielen. Eine indirekte Kopplung des Quantenpunktkontakts zum Doppelquantenpunkt wird durch Phononen im Kristall der Heterostruktur übertragen. Das Phononenbad wird durch den Stromfluss im Quantenpunktkontakt erhitzt. Der Temperaturunterschied zwischen der Elektronen- und der Phonontemperatur stellt die notwendige Energie bereit, um die Energielücke zwischen dem bindenden und dem antibindenden Zustand des Doppelquantenpunkts zu überbrücken, und treibt damit einen Strom durch den Doppelquantenpunkt. Dieser Rückwirkungseffekt, der durch Phononen übertragen wird, ist bedeutsam, denn das System wirkt damit wie eine thermoelektrische Maschine. Der Doppelquantenpunkt wird auf ein asymmetrisches Regime eingestellt. Dabei koppelt ein Quantenpunkt stark an die eine Zuleitung, während der andere Quantenpunkt schwächer an die andere Zuleitung koppelt. Zwei unabhängige Quantenpunktkontakte können gleichzeitig benutzt werden, um Übergänge im Doppelquantenpunkt zu erzeugen. Wir beobachten daraufhin einen nicht-additiven Effekt, der von beiden Quantenpunktkontakten hervorgerufen wird und der von einer Sättigung des Stroms durch den Doppelquantenpunkt bei grossen Quantenpunktkontaktströmen begleitet wird. Wir erklären die Messresultate im Rahmen einer Wechselwirkung von Elektronen mit akustischen Phononen. Die

emittierte Leistung des Quantenpunktkontakts wird dabei in Bezug mit der Temperatur des Phononenbads gesetzt. Unser Experiment schliesst die Möglichkeit von Schrotrauschen als Erzeuger der Übergänge zwischen den beiden Quantenpunkten aus.