

Diss. ETH No. 14693

**Single Electron Tunneling, Spin- and
Commensurability Effects in Nanostructures on
Parabolic Quantum Wells**

A dissertation submitted to the
SWISS FEDERAL INSTITUTE OF TECHNOLOGY
ZURICH

for the degree of
Doctor of Natural Sciences

presented by

Stefan Bruno Lindemann

Dipl. Phys. ETHZ
born 9. November 1964
citizen of Oberegg (AI)

accepted on the recommendation of

Prof. Dr. Klaus Ensslin, examiner
Prof. Dr. Sergio Ulloa, co-examiner
Dr. Thomas Ihn, co-examiner

2002

Zusammenfassung

Für das fundamentale Verständnis der Eigenschaften zweidimensionaler Elektronengase (2DEGs), ist es wesentlich, den Übergang zu einem dreidimensionalen (3D) System, wo ein weiches Potential die Bewegung der Elektronen in Wachstumsrichtung (z -Richtung) erlaubt, zu studieren. Weil in einem gewissen Sinn der Übergang von einem zwei-dimensionalen (2D) zu einem quasi-3D System mit der Besetzung eines zweiten Subbandes des 2DEGs erfolgt, sind Untersuchungen der Prozesse an diesem Wechsel der Dimensionalität von grosser Wichtigkeit.

Die vorliegende Arbeit erweitert in diesem Sinn vorangegangene Studien wie folgt: Wir untersuchten die elektronischen Transporteigenschaften in Systemen in denen die Quantisierung der Energie in einer Richtung mittels eines parabolischen Quantentopfes (PQW) erfolgt und mit einer zusätzlichen Einschnürung die Bildung eines Quantenpunktes erreicht wird. Die Elektronen, eingeeengt in Quantenpunkt, koppeln über Tunnelbarrieren zu makroskopischen Elektronenreservoirs, welche ein Tunneln in und aus dem Quantenpunkt erlauben. Zusätzliche Elektroden (Gates) auf der Vorder- und Rückseite des PQW werden benutzt um das elektrostatische Potential des Quantenpunktes über die kapazitive Kopplung abzustimmen. Die Bestandteile - parabolischer Quantentopf, Quantenpunkte, Tunnelbarrieren und Kapazitäten - bilden die Basis der Strukturen an denen die Transporteigenschaften mit dieser Doktorarbeit untersucht wurden.

In parabolischen Quantentöpfen kann mehr als ein quantenmechanisches Subband in Wachstumsrichtung besetzt werden. Dies bietet die einzigartige Möglichkeit der Untersuchung des Übergangs eines rein zweidimensionalen zu einem quasi-dreidimensionalen Quantenpunkt. Ein dramatischer Wechsel im zeitabhängigen Verhalten der Leitwertmaxima findet am Übergang von einem 2D zu einem 3D Quantenpunkt statt. Das Tunneln durch den Grundzustand des Quantenpunktes wurde für verschiedenste Tunnelkopplungen und externe Parameter wie Magnetfeld und Gatespannungen untersucht. Der einem Magnetfeld ausgesetzte Grundzustand eines Quantenpunktes unterliegt einer ganzen Serie von Übergängen mit zunehmendem Magnetfeld. Diese Übergänge beeinflussen die physikalischen Eigenschaften des Quantenpunktes wie den Gesamtspin des Grundzustandes und die Reihenfolge der Besetzung orbitaler Zustände. Durch die sukzessive Anwendung eines Magnetfeldes parallel und senkrecht zur Ebene des 2DEGs war die Identifikation von abgepaar-

ten Spins in einem Quantenpunkt mit starker Wechselwirkung möglich. Zusätzlich erweiste sich der Spinfreiheitsgrad als erstaunlich stabil.

Transport durch den Quantenpunkt erfolgt durch quantenmechanisches Tunneln. Die Eigenschaften der am Tunnelprozess involvierten quantenmechanischen Zustände bestimmen einen oder gar mehrere Leitwertmaxima. Eine sorgfältige Analyse der Amplituden und Linienformen der Tunnelresonanzen weist darauf hin, dass das Tunneln durch stark koppelnde Zustände dominiert werden kann und damit mehrere benachbarte Coulombresonanzen beeinflusst.

Zweidimensionaler Elektronengase überlagerte laterale Gitter zeigten interessante Phänomene von Kommensurabilitäten während der letzten Dekade. Wir strukturierten laterale Übergitter auf parabolischen Quantentöpfen, in denen mehr als ein Subband in Wachstumsrichtung besetzt werden konnte. Dies eröffnete uns die Möglichkeit der Untersuchungen der Kommensurabilitätsoszillationen als Funktion der Subbandbesetzung.

Abstract

For the fundamental understanding of the properties of two-dimensional electron gases (2DEGs) it is essential to study the transition to three-dimensional (3D) systems where a weak confinement allows for the motion in the growth (z-direction). Since in some sense the crossover from two-dimensional (2D) to quasi-3D systems occurs when the second subband of a 2DEG becomes populated, the investigation of processes at this dimensionality transition is of great importance.

The present work extends in this sense previous studies in the following way: We investigated the electronic transport properties in systems with an energy quantization in one direction, due to a parabolic quantum well (PQW), and a further lateral confinement, leading to the formation of a quantum dot. The electrons confined in the quantum dot are coupled via tunnel barriers to macroscopic electron reservoirs allowing for tunneling into and out of the confined region. Additional electrodes (gates) on the front and the back side of the PQW are used to tune the electrostatic potential of the quantum dot by capacitive coupling. These ingredients - parabolic quantum wells, quantum dots, tunneling and capacitances - build the basis of the structures on which transport properties are investigated in this thesis.

In parabolic quantum wells more than one quantum mechanical subband in the growth direction can be occupied. This gives us the unique ability to study the transition from a purely two-dimensional quantum dot to a quasi three-dimensional quantum dot. A dramatic change in the time dependent behavior of the conductance peaks is found at the crossover from 2D to 3D quantum dots.

Tunneling through ground states of the quantum dot is observed for varying tunneling couplings and external parameters like magnetic field and different gate voltages. The ground state of a quantum dot exposed to magnetic fields undergoes a series of transitions with increasing magnetic field. These transitions are observed to affect physical properties of the quantum dot such as the total ground state spin and the orbital filling sequences. By the successive application of magnetic fields parallel and perpendicular to the 2DEG plane we were able to identify spin-pairs in a strongly interacting quantum dot. In addition, the spin degree of freedom has proven to be remarkably stable.

Transport through a quantum dot occurs by electron tunneling. The properties of the involved quantum mechanical states may determine one or several conductance peaks. A careful analysis of amplitude and line shape of tunneling resonances in-

licated that tunneling can be dominated by strongly coupling states resulting in remarkable "fingerprints".

Lateral superlattices superimposed on two-dimensional electron gases showed interesting commensurability phenomena over the last decade. We have fabricated superlattices on parabolic quantum wells, where two electrical subbands in growth direction can be occupied. This offered us the possibility to investigate commensurability oscillations as a function of the subband occupation.