



Doctoral Thesis

AFM-defined cavities and antidot arrays from classical chaos to quantum percolation

Author(s):

Dorn, August

Publication Date:

2004

Permanent Link:

<https://doi.org/10.3929/ethz-a-004741972> →

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. 15439

**AFM-defined Cavities and
Antidot Arrays**
from Classical Chaos to Quantum Percolation

Dissertation submitted to the
Swiss Federal Institute of Technology Zurich

for the degree of
Doctor of Natural Sciences

presented by
August Dorn

February 2004

accepted on the recommendation of:
Prof. Dr. K. Ensslin, examiner
Prof. Dr. C. Schönenberger, co-examiner

Summary

In this thesis the electronic transport properties of semiconductor nanostructures are investigated. In particular we focus on square and rectangular cavities and antidot superlattices, that were fabricated by local anodic oxidation with an atomic force microscope (AFM). GaAs/AlGaAs heterostructures with a high mobility two-dimensional electron system (2DES) 34 nm below the surface, served as the starting material. The wafers were grown by molecular beam epitaxy at the University of California at Santa Barbara by Danny Driscoll and Art Gossard.

Resistance measurements were performed on the square and rectangular cavities with different current and voltage probe configurations in the presence of a perpendicular magnetic field at 1.7 K. Oscillations in the magnetoresistance were observed and explained by commensurability effects of orbits skipping along the sides of the cavities. The good quantitative agreement with calculations based on the Landauer–Büttiker formalism and a classical billiards simulation demonstrates the high quality of AFM-defined nanostructures.

The antidot lattices under study consist of square 20×20 antidot arrays enclosed by cavities with openings in the corners for current and voltage probes. In low temperature magnetotransport measurements, commensurability peaks, Aharonov–Bohm-type oscillations, and $h/2e$ oscillation were detected in samples with lattice constants of 150 nm and 300 nm. From this we conclude, that the electronic properties of AFM-defined antidot lattices are comparable to the best arrays fabricated by other techniques. In addition the special top- and backgate tunability of the $a=150$ nm sample allowed us to do the first investigations of these effects as a function of background mobility and wavefunction symmetry in z -direction at constant electron sheet densities.

The transition from the conducting to the insulating phase towards low electron densities was studied in an array with a lattice constant of $a=120$ nm at 90 mK. In the open regime, the behavior of the conductivity is well modeled by a classical random resistor network with superimposed quantum fluctuations, while in the tunneling regime, clear Coulomb resonances appeared with on average increasing charging energies towards lower electron sheet densities. These findings were analyzed in the framework of the ‘links, nodes and blobs model’ for percolation proposed by Stanley and Coniglio. The extracted critical exponents are in good agreement with numerical calculations. A strong negative average magnetoresistance in the Coulomb blockade regime was found to be in good quantitative agreement with a theoretical model by Raikh and Glazman based on magnetic field dependent tunneling between individual quantum dots. This type of system could be of interest in the field of quantum information processing, especially if it is pos-

sible to address and tune individual sites of the lattice. The observed microscopic transport phenomena can also be compared with measurements on macroscopic samples of granular materials like metallic or semiconductor nanocrystals.

The observability of an artificial bandstructure is discussed in the weak potential modulation, the tight-binding and the antidot regime.

In addition, layers of ErAs islands were characterized with respect to their insulating and charging properties. The samples consisted of GaAs/AlGaAs heterostructures with a two-dimensional electron system 34 nm below the surface and a conducting layer, the so-called backgate, 1.3 μm below the surface. Twenty layers of ErAs islands with a separation of 25 nm are sandwiched between these two conducting planes and insulate them with respect to each other. This is a consequence of overlapping Schottky barriers surrounding the ErAs islands, and breakdown voltages above $\pm 7\text{ V}$ could be achieved at 1.7 K. From thermal activation measurements an *effective* Schottky barrier height of 0.6 eV *across* the island system was determined. From persistent charging effects a Schottky barrier height of 0.58-1.0 eV *onto* the islands was extracted. In addition persistent photoconductivity was present in one of the two wafers as a consequence of electrons being excited off the islands. Layers of ErAs islands are an alternative to low temperature grown GaAs for insulating two-dimensional electron systems from backgates and could find a number of applications, especially if local charging is feasible, e.g. by nanostructured electrodes.

Zusammenfassung

In der vorliegenden Arbeit werden die elektronischen Transporteigenschaften von Halbleiternanostrukturen experimentell untersucht. Insbesondere handelt es sich hierbei um quadratische und rechteckige Kavitäten und Antidotübergitter, die durch lokale Oxidation mit einem Rasterkraftmikroskop (AFM) hergestellt wurden. Als Ausgangsmaterial dienten GaAs/AlGaAs Heterostrukturen mit einem hochbeweglichen zweidimensionalen Elektronensystem 34 nm unter der Oberfläche, die mit Molekularstrahlepitaxie gewachsen wurden.

Widerstandsmessungen an der quadratischen und rechteckigen Kavität wurden in verschiedenen Konfigurationen bei senkrecht angelegtem Magnetfeld und bei Temperaturen von 1.7 K durchgeführt. Es konnten magnetfeldabhängige Oszillationen der Leitfähigkeit beobachtet werden, die mit Kommensurabilitätseffekten der an den Banden reflektierten Elektronentrajektorien erklärt werden können. Die gute quantitative Übereinstimmung der Messungen mit Berechnungen basierend auf dem Landauer Büttiker Formalismus und einer klassischen Billardsimulation, sprechen für die hohe elektronische Qualität AFM-definierter Nanostrukturen.

Die untersuchten Antidotgitter bestehen aus quadratischen Arrays mit 20×20 Oxidpunkten, die in Kavitäten mit Öffnungen in den Ecken eingefasst sind. In Magnetotransportmessungen an Arrays mit Gitterkonstanten von 150 nm und 300 nm konnten klare Kommensurabilitätspeaks, sowie Aharonov–Bohm-artige und $h/2e$ -Oszillationen detektiert werden. Dies demonstriert, dass die elektronischen Eigenschaften von AFM-definierten Antidotgittern vergleichbar sind mit denen der besten Gitter, die mit anderen Methoden hergestellt werden können. Zudem erlaubte uns die besondere Top- und Backgateabstimmbarkeit der 150 nm Probe die ersten Untersuchungen dieser Phänomene als Funktion der Hintergrundmobilität und Wellenfunktionssymmetrie in z -Richtung bei konstanter Elektronendichte.

Der Übergang von der leitenden zur isolierenden Phase bei niedrigen Elektronendichten wurde in einem Gitter mit $a=120$ nm bei 90 mK untersucht. Oberhalb des Tunnelregimes kann das beobachtete Verhalten mit einem klassischen perkolierenden Widerstandsnetzwerk mit überlagerten quantenmechanischen Fluktuationen beschrieben werden. Im Tunnelregime wurden Coulombresonanzen gemessen, deren Ladeenergien zu kleineren Elektronendichten hin zunahmen. Dies wurde im Rahmen des ‘Links Nodes und Blobs Modells’ von Stanley und Coniglio analysiert. Die gefundenen kritischen Exponenten sind in guter Übereinstimmung mit theoretischen Berechnungen. Ein stark negativer Magnetowiderstand im Coulombblockaderegime ist in sehr guter quantitativer Übereinstimmung mit einem Modell von Raikh und Glazman, das magnetfeldabhängiges Tunneln zwischen einzelnen Quantenpunkten beschreibt. Diese Art von System könnte von Interesse in der

Quanteninformationsverarbeitung sein, wenn es gelingt individuelle Zellen kontrolliert abzustimmen. Zudem können die beobachteten mikroskopischen Transportprozesse mit dem makroskopischen Transportverhalten einer Reihe von granularen Materialien bestehend aus Metall- oder Halbleiterkolloiden verglichen werden.

Anschliessend werden Proben mit verschiedenen Parametern hinsichtlich der Beobachtbarkeit einer künstlichen Bandstruktur diskutiert.

Zusätzlich wurden Schichten von ErAs Inseln hinsichtlich ihrer Isolationseigenschaften und Ladungszustände charakterisiert. Die hierzu verwändeten Proben bestehen aus GaAs/AlGaAs Heterostrukturen mit einem zweidimensionalen Elektronensystem 34 nm unter der Oberfläche und einer leitfähigen Schicht, dem sogenannten Backgate, 1,3 μm unter der Oberfläche. Zwischen diesen beiden leitfähigen Ebenen sind 20 Schichten mit ErAs Inseln mit einem Abstand von 25 nm eingewachsen, die das zweidimensionale Elektronensystem von dem Backgate isolieren. Dies geschieht aufgrund von überlappenden Schottkybarrieren, die sich um die in das GaAs eingebetteten ErAs Inseln herum bilden. Bei Temperaturen unter 1.7 K konnten Durchbruchspannungen von über $\pm 7\text{V}$ erzielt werden. Aus Messungen des thermisch aktivierten Transports wurde eine *effektive* Schottkybarrierenhöhe von etwa 0.6 meV für das Inselsystem ermittelt. Durch statisches Aufladen der ErAs Inseln konnte eine Barrierenhöhe von 0.58-1.0 meV *auf* die ErAs Inseln bestimmt werden. In einem der beiden Wafer konnte zusätzlich persistente Photoleitfähigkeit beobachtet werden, die auf eine Verringerung der Elektronenzahl auf den Inseln zurückzuführen ist. Neben ihren Isolationseigenschaften, könnten ErAs Inseln von grossem Interesse sein, falls lokale Ladevorgänge, z.B. durch nanostrukturierte Elektroden, möglich sind.