

Diss. ETH No. 12976

# Electronic Properties of Tailored Semiconductor Nanostructures with Tunable Dimensionality

A dissertation submitted to the  
SWISS FEDERAL INSTITUTE OF TECHNOLOGY  
ZURICH

for the degree of  
Doctor of Natural Sciences

presented by

**Gian Salis**

born 26. December 1970  
citizen of Vicosoprano and Soglio (GR)

accepted on the recommendation of

Prof. Dr. Klaus Ensslin, examiner  
Prof. Dr. Gianni Blatter, co-examiner

1999

# Abstract

The operation of conventional semiconductor devices can be understood within a semiclassical theory of conduction. Where the dimensions of the considered structures are comparable to the Fermi wave length, quantum effects become important. The finite size of such structures constrains the electron motion, and the energy gets quantized. With the ongoing miniaturization of computer chips this limit will be reached soon. For further size-reduction it is of fundamental importance to know how conduction in such quantum structures is described. With the technological progress it has become possible to fabricate well-defined structures in the nanometer range, where the atomic composition is controlled within monolayers. In principle, such “nanostructures” are the experimental realization of standard text-book examples of a particle in a quantum well. However, the nanostructure is neither an abstract quantum well nor an isolated atom, but still consists of millions of atoms and electrons. This thesis is aimed to investigate how far transport in nanostructures can be described by single-particle quantum mechanics, and where more refined models have to be considered. For this purpose, we have fabricated a semiconductor model system where a parabolic potential profile is realized along one spatial direction in the conduction band of a semiconductor heterostructure. This parabolic quantum well was grown by molecular beam epitaxy of  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  by varying  $x$  appropriately. Carriers in the well are provided by modulation-doping.

The magnetoresistance and Hall resistance of the electron gas confined in the well has been measured at temperatures down to 40 mK and magnetic fields up to 13 T. The energy of the 76 nm wide well was found to be quantized, leading to the formation of subbands. With gate electrodes on both sides of the well, the electron density in the quantum well has been varied and up to three subbands could be occupied. The electron sheet density could be tuned between 1 and  $6 \cdot 10^{15} \text{ m}^{-2}$ . By measuring Shubnikov-de Haas oscillations in the magnetoresistance, the individual subband densities have been determined.

With appropriate voltages applied to the gate electrodes, the electron gas could be displaced across the quantum well by  $\pm 15 \text{ nm}$ , while the sheet density was kept constant. By growing a narrow potential spike of well-defined strength in the center of the parabolic quantum well, we have probed the difference in the squared wavefunction modulus between the two lowest subbands. The results agree with single-particle envelope wave functions calculated in the Hartree approximation.

Individual subband scattering times have been obtained from low-field magnetoresistance measurements. The scattering time of the subband lowest in energy depends mainly on the distance of the electron gas to the dopant layer, whereas the scattering

time of the upper subband is influenced by density-dependent screening effects. As suggested by a calculation of the intra- and intersubband scattering times, the electron mobility is limited by Coulomb scattering from ionized dopants on both sides of the well. The dependence of the scattering times on the position of the electron gas indicates a segregation of dopants on the substrate side towards the quantum well during sample growth.

The transition from one to two occupied subbands is of special interest, as a cross-over from two- to three-dimensional behavior is expected. From universal conductance fluctuations and the weak-localization correction to the magnetoresistance, the phase-coherence length can be extracted. Both, universal conductance fluctuations and weak-localization, indicate a change in the phase-coherence length at the dimensional cross-over.

The electron confinement due to a magnetic field oriented along arbitrary directions has been studied. For magnetic fields oriented in the plane of the electron gas, the electron densities of the upper subbands decrease with the magnetic field, and the subbands are successively depopulated. It has been found that the diamagnetic shift of the subband energy is not solely responsible for the electron redistribution. It is rather the change of the in-plane dispersion relation which leads to a subband-dependent change in the density of states and to a strong carrier redistribution. This effect has been calculated in second-order perturbation theory and quantitatively accounts for the measured effect.

The two-dimensional electron gas has been electrically confined in one lateral direction by lithographically fabricated split-gate electrodes. This forms a quantum point contact, where transverse modes in both directions can be occupied. We have found the conductance to be quantized, indicating ballistic transport through the quantum-point contact. A measurement of the conductance plateaus allows for spectroscopy of single-particle energy levels. A suppression of certain conductance plateaus has been observed, which we explain by degeneracies in the 1D subband energy structure. By applying a magnetic field in the direction of current flow, a coupling of the 1D subbands has been observed, which is described by a generalized Darwin-Fock spectrum. Level anticrossings have been explained by the non-parabolic confinement of the quantum point contact.

# Zusammenfassung

Die Funktionsweise konventioneller Halbleiterbauteile kann mit Hilfe eines semiklassischen Modells des Elektronentransports verstanden werden. Für kleinere Strukturen mit Abmessungen vergleichbar der Fermiwellenlänge werden Quanteneffekte wichtig. Aufgrund der eingeschränkten Elektronenbewegung nehmen die Energien hier quantisierte Werte an. Mit der zunehmenden Miniaturisierung der Computerchips wird diese Grenze bald erreicht sein. Es ist deshalb von Interesse, wie man Elektronentransport in solchen Quantenstrukturen beschreiben kann. Mit modernen technologischen Verfahren ist es heute möglich, nanometergrosse Strukturen herzustellen, die auf atomare Monolagen genau zugeschnitten sind. Im Prinzip ist in solchen Strukturen das Lehrbuchbeispiel eines Teilchens in einem Quantentopf experimentell realisiert, nur dass wir es hier nicht mit einem abstrakten Quantentopf oder einem Atom zu tun haben, sondern immer noch mit Millionen von Atomen und Elektronen. In der vorliegenden Arbeit soll untersucht werden, inwiefern man solche Nanostrukturen dennoch als einfache Quantensysteme begreifen kann und wo erst kompliziertere Modelle ihre Funktionsweise erhellen können. Um dieses Ziel zu erreichen, wurde ein Modellsystem hergestellt, in welchem entlang einer Raumrichtung ein parabolförmiges Potential realisiert ist. Dieser parabolische Quantentopf wurde mittels Molekularstrahlepitaxie von  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  gewachsen, wobei der Aluminiumgehalt  $x$  von Schicht zu Schicht entsprechend geändert wurde.

Das Elektronengas, das sich im modulationsdotierten Quantentopf aufhält, wurde elektrisch kontaktiert und dessen Widerstand sowie Hallwiderstand für Magnetfelder bis 13 T und Temperaturen bis 40 mK gemessen. Die Quantisierung der Energie im 76 nm breiten parabolförmigen Quantentopf führt zur Bildung von Subbändern. Mittels Elektroden, die auf beiden Seiten des Topfes angebracht wurden, konnte die Elektronendichte zwischen  $1$  und  $6 \cdot 10^{15} \text{ m}^{-2}$  geändert werden. Durch Messungen von Shubnikov-de Haas Oszillationen des Magnetowiderstandes wurden die einzelnen Subbanddichten aufgelöst.

Indem geeignete Spannungen an die Elektroden angelegt wurden, konnte die Elektronenverteilung im Quantentopf bei konstanter Dichte um 15 nm hin- und hergeschoben werden. Mit Hilfe einer eingewachsenen Potentialspitze konnten wir die Differenz von Wellenfunktionsbetragsquadraten zweier Subbänder bestimmen. Die erhaltenen Messwerte stimmen gut mit berechneten Werten überein, welche wir mit der Hartree-Näherung erhalten haben.

Die Streuzeiten der einzelnen Subbänder wurden mittels Messung des Magnetowiderstandes bei kleinen Magnetfeldern bestimmt. Während die Streuzeit des energetisch tieferliegenden Subbandes hauptsächlich vom Abstand der Elektronenverteilung von

den Störstellen abhängt, ist die Streuzzeit des höherliegenden Subbandes bestimmt durch Abschirmung, die mit der Subbanddichte zunimmt. Eine Berechnung zeigt, dass die Streuzzeiten durch Coulomb-Steuerung an ionisierten Donatoren limitiert sind. Die spezielle Abhängigkeit der Streuzzeiten von der Position des Elektronengases im Quantentopf deutet darauf hin, dass während des Wachstums der Probe auf der Substratseite Donatoren in Richtung des Quantentopfes diffundiert sein könnten.

Der Übergang von einem zu zwei besetzten Subbändern ist besonders interessant, da er den Bereich zwischen einem zwei- und dreidimensionalen System kennzeichnet. Die Phasenkohärenzlänge kann in diesem Bereich durch Messungen universeller Leitwertfluktuationen und der Widerstandskorrektur aufgrund der Schwachen Lokalisierung studiert werden. Beide Grössen deuten auf einen Wechsel der Phasenkohärenzlänge am Übergang hin.

Das durch ein entlang einer beliebigen Richtung angelegte Magnetfeld erzeugte magnetoelektrische Potential wurde untersucht. Für Magnetfelder in der Ebene des Elektronengases beobachteten wir mit zunehmendem Magnetfeld eine Abnahme der Elektronendichte der höheren Subbänder. Diese Abnahme ist viel stärker, als aufgrund der diamagnetischen Verschiebung der Subbandenergien vermutet werden könnte. Es ist vielmehr die zusätzlich vom Magnetfeld bewirkte Änderung der Dispersionsbeziehung in der Ebene, die zu der starken Umverteilung der Ladungsträger zwischen den Subbändern führt. Dieser in Störungstheorie zweiter Ordnung berechnete Effekt erklärt die gemessenen Daten quantitativ.

Das Elektronengas wurde zusätzlich zum parabolförmigen Quantentopf in einer weiteren Raumrichtung eingeschnürt. Dies wurde mittels einer geteilten Elektrode bewerkstelligt. Der so entstandene Quantenpunktkontakt leitet transversale Moden beider Richtungen. Die gemessenen Leitwerte sind quantisiert, was auf ballistischen Transport im Punktkontakt hinweist. Das Ausmessen der Leitwertsplateaus ermöglicht die Spektroskopie der Einteilchenenergien im Punktkontakt. Gewisse Leitwertsplateaus sind unterdrückt, was wir mit einer Entartung von Modenenergien erklären. Wird ein Magnetfeld in Richtung des Stromes angelegt, beobachten wir eine Modenkopplung, welche in einem erweiterten Darwin-Fock-Modell erklärt werden kann. Nicht alle Modenenergien kreuzen sich mit zunehmendem Magnetfeld. Dass sich einige abstossen, wurde auf ein nichtparabolisches Einschlusspotential zurückgeführt.