

Diss. ETH No. 13617

Transport Measurements on InAs/AlSb Quantum Wells

A dissertation submitted to the
SWISS FEDERAL INSTITUTE OF TECHNOLOGY
ZURICH

for the degree of
Doctor of Natural Sciences

presented by

Sebastian Brosig

born May 10th, 1967
in Gelsenkirchen (D)

accepted on the recommendation of

Prof. Dr. Klaus Ensslin, examiner
Prof. Dr. Andreas Wieck, co-examiner

2000

Zusammenfassung

Indiumarsenid/Aluminiumantimonid (InAs/AlSb) Quantentöpfe stellen nach wie vor ein faszinierendes Objekt für die physikalische Forschung dar. Besondere Eigenschaften sind in erster Linie das tiefe Einschlusspotential im Quantentopf und die kleine effektive Masse der Elektronen, beides bedingt durch die kleine Bandlücke in InAs. Mögliche Anwendungen des ein wenig exotischen Materialsystems ergeben sich im Hinblick auf die aufgehobene Spinartung bei $B = 0$. Die durch ein elektrisches Feld abstimmbare Spin-Orbit-Kopplung könnte phasenkohärente Devices für den Quantencomputer möglich machen. Mittels Molekularstrahlepitaxie können InAs/AlSb-Schichten mit sehr guter Raumtemperatur-Beweglichkeit und einer ausreichenden Quanten-Streuzeit für Tieftemperaturexperimente gewachsen werden.

Zunächst werden generelle Eigenschaften von Elektronen in solchen zweidimensionalen Systemen diskutiert. Insbesondere Quantisierungseffekte durch die Beschränkung der Bewegung in der Ebene, und lateral durch weitere Strukturierung der Schichten sowie durch das Anlegen eines magnetischen Feldes spielen hierbei eine Rolle. In diesem Zusammenhang wird auf quantitative Methoden zur Auswertung von Shubnikov-de Haas-Oszillationen besonders eingegangen. Weiter wird speziell für den Fall von InAs/AlSb-Quantentöpfen auf den Einfluss des Gitters auf die Dynamik der Elektronen eingegangen. Der Spin der Elektronen spielt in diesem Material eine große Rolle, da die Zeeman-Aufspaltung in diesem Material besonders hervortritt. Der g -Faktor in Volumen-Indiumarsenid beträgt $g = -14$. Die im Zusammenhang mit der vorliegenden Arbeit wichtigen apparativen Techniken, sowohl was die Experimente selbst wie auch deren Auswertung angeht, werden detailliert beschrieben.

In starken Magnetfeldern kondensiert die Zustandsdichte der Elektronen zu Landau-Niveaus, für die Stärke der Quantisierung ist in erster Linie die Komponente der Feldstärke senkrecht zur Ebene des Quantentopfes bedeutend. Für die Spinaufspaltung jedes dieser Niveaus gibt aber die gesamte Stärke des Magnetfeldes den Ausschlag. Diese Tatsache wird verwendet, um mit dem Winkel zwischen Probenebene und Magnetfeld verschiedene Szenarien der Spinaufspaltung zu realisieren. Im Experiment treten verschiedene Effekte auf, die mit einem einfachen Bild von unabhängigen Landau- und Spinniveaus nicht in Einklang stehen und auf die Nichtparabolizität von InAs und Wechselwirkungseffekte schließen lassen.

Auch ohne ein äußeres Magnetfeld ist die Energie von Elektronen mit unterschiedlichem Spin nicht entartet. Diese Tatsache ist einerseits durch die Inversionsasymmetrie der Kristallstruktur bedingt, andererseits durch das in die Schichtstruktur „eingebaute“ elektrische Feld. In den hier untersuchten Proben gibt es aber Diskrepanzen zu den gängigen Modellen: die gefundene Aufspaltung war entweder überhaupt nicht meßbar oder viel kleiner als vorhergesagt, was anhand der Experimente diskutiert wird.

Da InAs/AlSb-Quantentöpfe nicht ohne weiteres mit einem Metallfilm als Gate versehen werden können, ist man in erster Linie auf andere Methoden zur Variation der Elektronendichte angewiesen. Eine dieser Methoden ist es, mittels starkem hydrostatischem Druck den Gitterabstand der Atome im Kristall direkt zu reduzieren. Hierzu werden Experimente vorgestellt. Eine weitere Technik zum Ändern der Elektronendichte ist mit der kurzzeitigen Beleuchtung der Probe gegeben. Damit ist in einigen Proben eine persistente Reduktion der Elektronendichte verbundenen. Auch diese Trick wurde verwendet und die Ergebnisse vorgestellt.

Im Anhang wird unter anderem auf die experimentelle Praxis mit Druckzellen eingegangen.

Abstract

Indium arsenide/aluminium antimonide (InAs/AlSb) quantum wells continue to be a fascinating object for physical research. Special features are the deep confinement potential and the small effective mass of the electrons, both consequences of the small band gap in InAs. Possible applications of this somewhat exotic material system might exploit the lifted spin-degeneracy at $B = 0$. The spin-orbit coupling can be tuned with an electric field, which could make phase-coherent devices for a quantum computer possible. Using molecular beam epitaxy, InAs/AlSb layers can be grown with very good room temperature mobilities and sufficient quantum scattering times to allow for low temperature experiments.

First, some general properties of electrons in these two-dimensional systems are discussed. Quantization effects due to the confinement in the plane as well as due to further lateral confinement, either from further lateral structuring of the samples or by the application of a perpendicular magnetic field, play an important role here. The quantitative analysis of Shubnikov-de Haas oscillations is discussed in detail. In the particular case of InAs/AlSb quantum wells, effects of the crystal lattice on the dynamics of the electrons are shown. The spin of the electrons plays an important role in InAs because the Zeeman-splitting in this material is large: the bulk InAs g factor is $g = -14$. The techniques employed in this thesis are treated next, the experimental details as well as the methods of data evaluation.

In strong magnetic fields, the electronic density of states condenses into Landau levels, the component of the field perpendicular to the sample plane being most important for the amount of splitting. For the splitting of each of these levels in two, for the two spin directions, the total magnetic field counts. This is employed to realize various scenarios of spin- and Landau splitting, by tuning the angle between the sample normal and the magnetic field. Various effects occur in the experiment that can not be explained by the simple coincidence picture, and that allow to draw conclusions about exchange effects and non-parabolicity of InAs. Even without an external magnetic field, the degeneracy of electrons with opposing spin directions is lifted — on the one hand, by the inversion asymmetry of the crystal structure, on the other hand, due to the “built-in” electric field in the sample. However, in the data from samples featured here, there are discrepancies to the accepted models: the

splitting was either not found or far smaller than predicted, which is discussed with the experiments.

Since InAs quantum wells cannot be tuned easily by the application of an electrostatically biased metal gate, one is dependent on other methods of changing the electron density. One of these methods is the modification of the lattice constant by application of high hydrostatic pressure. Experiments are presented using this technique. Another method of adjusting the electron density is shining a short light pulse onto the sample, which leads to a persistent lowering of the density. This trick was used as well, and results are shown.

In the appendix the know-how concerning pressure cell methods is given a treatment that focuses on the practical side of the technique.