

Diss. ETH No. 19582

Graphene Quantum Dots

A dissertation submitted to the
ETH ZURICH

for the degree of
Doctor of Science

presented by

Johannes Güttinger

Dipl. El.-Ing. ETH
born June 24, 1982
citizen of Männedorf (ZH)

accepted on the recommendation of

Prof. Dr. Klaus Ensslin, examiner
Prof. Dr. Francisco Guinea, co-examiner
Prof. Dr. Thomas Ihn, co-examiner

2011

Abstract

In this thesis, transport experiments on graphene quantum dots and narrow graphene constrictions at cryogenic temperatures are presented. In a quantum dot, electrons are confined in all lateral dimensions, offering the possibility for detailed investigation and controlled manipulation of individual quantum systems. The recently isolated two-dimensional carbon allotrope graphene is an interesting host to study quantum phenomena, due to its novel electronic properties and the expected weak interaction of the electron spin with the material.

Graphene quantum dots are fabricated by etching mono-layer flakes into small islands (diameter 60 - 350 nm) with narrow connections to contacts (width 20-75 nm), serving as tunneling barriers for transport spectroscopy.

Electron confinement in graphene quantum dots is observed by measuring Coulomb blockade and transport through excited states, a manifestation of quantum confinement. Measurements in a magnetic field perpendicular to the sample plane allowed to identify the regime with only few charge carriers in the dot (electron-hole transition), and the crossover to the formation of the graphene specific zero-energy Landau level at high fields. After rotation of the sample into parallel magnetic field orientation, Zeeman spin-splitting with a g -factor of $g \approx 2$ is measured. The filling sequence of subsequent spin states is similar to what was found in GaAs and related to the non-negligible influence of exchange interactions among the electrons.

Transport through individual graphene constrictions is characterized by sharp resonances and an extended region of suppressed conductance, larger than expected from a confinement induced band gap. The observed behavior is attributed to the formation of localized electron- and hole puddles around the charge-neutrality point, which are caused by imperfect edges and inhomogeneous doping.

In further experiments, a narrow graphene constriction is placed in close proximity to the quantum dot and used as sensitive charge detector for electrons on the dot. In these experiments, carrier localization in graphene constrictions is directly observed. Due to the close proximity of detector and quantum dot in graphene, time-resolved detection of individual electrons hopping onto and out of the dot is achieved by using high tunneling barriers. By counting single hopping events, the tunneling rate of the barrier is extracted and its non-monotonic gate dependence is studied.

Zusammenfassung

In dieser Doktorarbeit wird der Ladungstransport in Quantenpunkten und schmalen Streifen aus Graphen bei Temperaturen unter 4.2 K untersucht. Ein Quantenpunkt ist eine Box, in der Elektronen in allen drei Raumrichtungen eingesperrt sind und ermöglicht detaillierte Studien oder kontrollierte Manipulation von einzelnen Quantensystemen (zum Beispiel vom Elektronenspin). Graphen, eine zwei-dimensionale atomare Schicht aus Graphit, ist ein faszinierendes neues Material zum Studium von Quantenphänomenen. Das Interesse gründet sich vor allem in den spannenden elektronischen Eigenschaften und den erwarteten schwachen Wechselwirkungen von Elektronenspins mit der Umgebung.

Um Quantenpunkte aus Graphen herzustellen, werden aus Graphenflocken kleine Inseln (Durchmesser 60-350 nm) mit schmalen Verbindungen zu den Kontakten (Breite 20-75 nm) geätzt. Die Verbindungen dienen als Tunnelbarrieren für Spektroskopiemessungen über Ladungstransport.

Die Einsperrung von Elektronen in einem Graphenquantenpunkt kann über die Messung von durch Coulomb-Wechselwirkung blockiertem Stromfluss und Transport über angeregte Zustände verifiziert werden. Angeregte Zustände sind ein klares Indiz für die Quantisierung von Energiezuständen in einem Quantenpunkt. Messungen in einem Magnetfeld senkrecht zur Probe erlauben den Energiebereich mit wenigen Ladungsträgern (Elektron-Loch-Übergang), anhand des graphenspezifischen Landau-Niveaus beim Ladungsneutralitätspunkt zu identifizieren. Nach der Rotation der Probe in ein paralleles Magnetfeld, kann die Zeeman-Spin-Aufspaltung mit einem g -Faktor von $g \approx 2$ gemessen werden. Die Füllsequenz von nacheinanderfolgenden Spinzuständen ist vergleichbar mit jener, die in GaAs basierten Quantenpunkten gefunden wurde und ist ein Ausdruck von nicht vernachlässigbaren Einflüssen der Austauschwechselwirkung unter den Elektronen.

Der Transport durch einzelne Graphenstreifen ist charakterisiert durch scharfe Resonanzen und einen ausgedehnten Energiebereich, in dem der Stromfluss unterdrückt ist. Jener Bereich ist grösser als von einer nur durch die Verengung verursachten Bandlücke zu erwarten wäre. Das beobachtete Verhalten wird der Bildung von lokalisierten Ladungspfüten um den Ladungsneutralitätspunkt aufgrund von nicht perfekten Rändern und ungleichmässiger Dotierung zugeschrieben.

In weiteren Experimenten wird ein zusätzlicher schmaler Graphen-Streifen nahe

beim Quantenpunkt hergestellt, welcher als sensibler Ladungsdetektor für die Elektronen auf dem Quantenpunkt verwendet wird. In diesen Experimenten kann die Lokalisierung von Ladung in Graphen-Verengungen direkt beobachtet werden. Durch die schmale Lücke und die daraus resultierende starke Kopplung zwischen Detektor und Quantenpunkt in Graphene, können bei genug hohen Tunnelbarrieren zeitaufgelöst einzelne Elektronen gemessen werden, die zwischen Quantenpunkt und Kontakt hin und her hüpfen. Durch Zählen einzelner Ereignisse kann die Tunnelrate der Barriere extrahiert und die nicht-monotone Gateabhängigkeit studiert werden.