



Doctoral Thesis

Quantum interference and single electron detection in InAs nanowires

Author(s):

Choi, Theodore

Publication Date:

2013

Permanent Link:

<https://doi.org/10.3929/ethz-a-010129052> →

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. 21607

Quantum Interference and Single Electron Detection in InAs Nanowires

A thesis submitted to attain the degree of
DOCTOR OF SCIENCES of ETH ZURICH

(Dr. sc. ETH Zurich)

presented by

Theodore Choi

Dipl. Phys. ETH

born July 1, 1984

citizen of Lucerne (LU) and
the United States of America

accepted on the recommendation of:

Prof. Dr. Klaus Ensslin, examiner

Prof. Dr. Anna Fontcuberta i Morral, co-examiner

Prof. Dr. Thomas Ihn, co-examiner

2013

Abstract

In this thesis, we investigate quantum interference effects and single electron transport in epitaxially grown InAs nanowires. The nanowires are grown by metal-organic vapour phase epitaxy using gold nanoparticles as catalysts. The resulting nanowires are single-crystalline on a micrometer length scale and exhibit wurtzite crystal structure. The deposition of Ohmic contacts after transferring the nanowires on various substrates allows to perform transport experiments on individual nanowires.

Coherent transport is probed by measuring individually contacted nanowires, where universal conductance fluctuations appear as a function of magnetic field and gate voltage. In addition, a pronounced weak antilocalization correction to the classical conductivity due to the strong spin-orbit interaction is observed.

Introducing an additional confinement along the nanowire axis induces quantum dots in the nanowire where single electrons can be isolated. Various combinations with GaAs/AlGaAs heterostructure two-dimensional electron gas substrates as well as with graphene are presented, with the aim of establishing a sensitive charge detector for the nanowire quantum dots. A vertical arrangement of the charge detector and the quantum dots yields a strong coupling with a high charge detection signal compared to conventional lateral approaches. This detection sensitivity is exploited to perform time-resolved charge detection experiments and to access the counting statistics of single electron transfer through a quantum dot.

Measurements of the inelastic current through a nanowire double quantum dot reveal periodic modulations of the current which are attributed to an interference effect mediated by coherent electron-phonon coupling. The phase difference between electron-phonon coupling matrix elements allows to pass through the interference pattern by changing the detuning between the energy levels of the quantum dots, in close analogy to the double-slit experiment.

The specific material properties of InAs, such as the small effective mass, the large effective g -factor and the strong spin-orbit interaction become especially interesting when investigating single spins in quantum dots of InAs nanowires. Owing to this properties, Pauli spin blockade is observed at elevated temperatures and at high electron numbers in a double quantum dot. Lifting of the spin blockade is attributed to spin relaxation due to spin-orbit interaction, as supported by the distinct magnetic field dependence of the leakage current in the spin blockade regime.

Zusammenfassung

In der vorliegenden Doktorarbeit untersuchen wir Quanteninterferenzeffekte und Einzelelektronentransport in epitaktisch gewachsenen InAs Nanodrähten. Die Nanodrähte werden durch metallorganische Gasphasenepitaxie mit Hilfe von Goldnanoteilchen als Katalysatoren gewachsen. Die resultierenden Nanodrähte sind Einkristalle auf einer Längenskala von Mikrometern und weisen eine Wurtzit Kristallstruktur auf. Das Aufbringen von Ohm'schen Kontakten nach dem Transferieren der Nanodrähte auf verschiedenen Substraten erlaubt es, Transportexperimente an einzelnen Nanodrähten durchzuführen.

Kohärenter Transport wird durch die Messung von einzeln kontaktierten Nanodrähten untersucht, bei welchen universelle Leitwertfluktuationen als Funktion des Magnetfeldes auftauchen. Darüber hinaus wird aufgrund der starken Spin-Bahn-Wechselwirkung eine ausgeprägte schwache Antilokalisierungskorrektur der klassischen Leitfähigkeit beobachtet.

Die Einführung einer zusätzlichen Einschränkung entlang der Nanodrahtachse induziert im Nanodraht Quantenpunkte, in denen einzelne Elektronen isoliert werden können. Verschiedene Kombinationen mit Substraten wie zweidimensionalen Elektronengasen innerhalb von GaAs/AlGaAs Heterostrukturen sowie mit Graphen werden präsentiert, mit dem Ziel einen empfindlichen Ladungsdetektor für die Quantenpunkte im Nanodraht zu erhalten. Eine vertikale Anordnung des Ladungsdetektors und der Quantenpunkte führt zu einer starken Kopplung mit einem ausgeprägten Signal der Ladungsdetektion im Vergleich zu herkömmlichen lateralen Ansätzen. Diese Detektionsempfindlichkeit wird bei der Durchführung von zeitaufgelösten Ladungsdetektionsexperimenten und für die Bestimmung der Zählstatistik des Einzelelektronentransfers durch den Quantenpunkt ausgenutzt.

Messungen des inelastischen Stromes durch einen Doppelquantenpunkt in einem InAs Nanodraht offenbaren periodische Modulationen des Stromes, welche auf einen Interferenzeffekt, vermittelt durch kohärente Elektron-Phonon-Kopplung, zurückgeführt werden. Die Phasendifferenz zwischen Elektron-Phonon-Kopplungsmatrixelementen erlaubt es, in enger Anlehnung an das Doppelspaltexperiment, mit Hilfe der Änderung der Differenz zwischen den Energieniveaus der Quantenpunkte durch das Interferenzmuster zu fahren.

Die spezifischen Materialeigenschaften von InAs, wie zum Beispiel die kleine

effektive Masse, der grosse effektive g -Faktor und die starke Spin-Bahn-Wechselwirkung werden besonders interessant, wenn einzelne Spins in Quantenpunkten von InAs Nanodrähten untersucht werden. Dank dieser Eigenschaften kann die Pauli-Spin-Blockade bei erhöhten Temperaturen und bei grossen Elektronenzahlen in einem Doppelquantenpunkt beobachtet werden. Das Aufheben der Spin-Blockade wird auf Spin-Relaxation aufgrund der Spin-Bahn-Wechselwirkung zurückgeführt, was zudem mit der ausgeprägten Magnetfeldabhängigkeit des Leckstromes im Regime der Spin-Blockade untermauert wird.