

# Spin states in InAs nanowires

**Doctoral Thesis**

**Author(s):**

Pfund, Andreas

**Publication date:**

2008

**Permanent link:**

<https://doi.org/10.3929/ethz-a-005684664>

**Rights / license:**

In Copyright - Non-Commercial Use Permitted

Diss. ETH No. 17861

# Spin states in InAs nanowires

A dissertation submitted to  
ETH Zurich

for the degree of  
Doctor of Sciences

presented by

**Andreas Pfund**

Diplom-Physiker, Universität Regensburg  
born August 22, 1978  
citizen of Germany

accepted on the recommendation of:

Prof. Dr. Klaus Ensslin, examiner  
Prof. Dr. Lieven M. K. Vandersypen, co-examiner  
Dr. Renaud Leturcq, co-examiner

June 2008



# Abstract

The focus of this thesis are spin states and their different interactions in epitaxially grown InAs nanowires. Its specific bandstructure makes InAs interesting to study spin dependent effects, especially because of the small effective electron mass, high effective g-factor and strong spin-orbit interaction compared to other semiconductors.

The nanowires are grown by self-assembly using metal-organic vapor phase epitaxy with catalytic nanometer-size gold particles. Crystallographic analysis shows, that the nanowires can have perfect wurtzite lattices over micrometer lengths. Individual nanowires are deposited on a substrate and can be electrically contacted with high reliability. To realize quantum dots, the lateral confinement due to the wire geometry is combined with electrostatic gates on top of the nanowire. This way, highly tunable double quantum dots can be defined with sizes of tens of nanometers.

The spin states are probed by electron transport at low temperature. For particular spin configurations in the double dot, the current is suppressed due to the Pauli exclusion principle. A current through this spin-blockade is directly related to mixing or relaxation of spin states.

Two different spin mixing mechanisms are identified. First, the strong spin-orbit interaction in InAs is detected by its influence on the spin states in transport spectroscopy at finite magnetic field. Second, the hyperfine interaction with nuclear spins leads to a current in the spin-blockade regime, which shows a characteristic, very sensitive magnetic field dependence.

The nuclear spins in InAs are in turn influenced by the electronic spin dynamics. Under certain conditions, a pronounced bistability of the relaxation current is observed in dependence on external magnetic field and gate voltages. A model is suggested, where the interplay of different relaxation paths for the electronic spin leads to dynamic polarization of the nuclear spins by the current through the nanowire.

Finally, the time dependence of the electron spins is investigated by measurements with fast gate pulses. Two-electron spin states are probed by pumping single electrons through the Pauli spin-blockade configuration. The corresponding spin transition rules systematically reduce the pumped current. Relaxation and time evolution of the involved spin states modify the pumped current and can be investigated by varying the gate pulse times.



# Zusammenfassung

Zustände und Wechselwirkungen von Spins in epitaktisch gewachsenen InAs Nanodrähten bilden den Schwerpunkt dieser Doktorarbeit. Aufgrund seiner Bandstruktur ist InAs ein interessantes Material, um spinabhängige Effekte zu untersuchen, insbesondere wegen der kleinen effektiven Masse der Leitungselektronen, des grossen effektiven g-Faktors und der starken Spin-Bahn Wechselwirkung im Vergleich zu anderen Halbleitern.

Die Nanodrähte werden durch selbstorganisiertes Wachstum mit metallorganischer Gasphasenepitaxie gewonnen, initiiert durch ein nanometer-grosses Goldteilchen. Kristallstrukturanalysen zeigen, dass die Nanodrähte perfekte Wurtzitstruktur auf Längenskalen bis zu einem Mikrometer aufweisen. Einzelne Nanodrähte können auf ein Substrat übertragen und zuverlässig mit elektrischen Kontakten versehen werden. Quantenpunkte entstehen durch die Kombination der Drahtgeometrie mit Gatter-Elektroden auf dem Nanodraht. Dadurch können gut abstimmbare Doppelquantenpunkte von einigen zehn Nanometern Grösse erzeugt werden.

Die Spinzustände werden mittels Elektronentransportmessungen bei tiefen Temperaturen untersucht. Für bestimmte Spinkonfigurationen unterdrückt das Pauli-Ausschlussprinzip den Strom durch den Doppelquantenpunkt. Ein Strom durch die Spinblockade zeigt direkt die Kopplung der Spinzustände untereinander oder Spinrelaxation an.

Zwei Kopplungsmechanismen können identifiziert werden. Zunächst hat die Spin-Bahn Kopplung messbaren Einfluss auf die in Transport-Spektroskopie beobachteten Spinzustände in einem Magnetfeld. Darüber hinaus führt die Wechselwirkung mit den Kernspins zu einem Strom im Bereich der Spinblockade, der eine charakteristische empfindliche Magnetfeldabhängigkeit aufweist.

Die Kernspins selbst werden umgekehrt auch von der Dynamik der Elektronenspins beeinflusst. Unter bestimmten Bedingungen kann ein auffallend bistabiles Verhalten des Stromes als Funktion von Magnetfeld und Elektrodenspannung beobachtet werden. Es wird ein Model vorgeschlagen, bei dem das Zusammenwirken verschiedener Relaxationswege für den Elektronenspin zu einer dynamischen Kernspinpolarisation aufgrund des Stroms durch den Nanodraht führt.

Schliesslich wird die Zeitabhängigkeit der Elektronenspins mit schnellen Spannungspulsen an den Elektroden analysiert. Zweiteilchenspinzustände können unter-

sucht werden, indem man einzelne Elektronen durch die Spinblockade pumpt. Die Übergangsregeln zwischen den beteiligten Spinzuständen reduzieren den gepumpten Strom. Relaxation und Zeitentwicklung der Spinzustände modifizieren den Pumpstrom und können durch Variation der Pulszeiten systematisch untersucht werden.