

Kohärenter Elektronentransport in eindimensionalen GaAs/AlGaAs-Nanostrukturen und Quantenringen

Sven S. Buchholz

Berlin, 24.05.2011

*Lehrstuhl für Werkstoffe und Nanoelektronik
Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik
Ruhr-Universität Bochum*

Diese Arbeit beschäftigt sich mit experimentellen Untersuchungen an komplexen eindimensionalen (1D) Elektronensystemen. Die verwendeten Bauelemente basieren auf GaAs/AlGaAs-Heterostrukturen, die bei Temperaturen von wenigen Kelvin hochbewegliche zweidimensionale Elektronengase beherbergen. Alle Bauelemente wurden mit optischer UV- und Elektronenstrahl-lithographie präpariert und nasschemisch geätzt. Zur Steuerung der Elektronensysteme wurden metallische Gate-Elektroden auf der Halbleiteroberfläche definiert.

Da die Abmessungen der Bauelemente kleiner sind als die mittlere freie Weglänge der Elektronen (von über zehn Mikrometern bei 4.2 K), findet der Transport phasenkohärent und ballistisch statt. Ein Großteil der Ladungsträger propagiert somit ohne inelastische und elastische Streuprozesse, sodass Quantisierungseffekte und Elektroneninterferenz experimentell beobachtbar sind. In allen Strukturen ist das Elektronensystem lateral so stark eingeschränkt, dass sich 1D-Transport, getragen von energetisch quantisierten Moden, einstellt.

Zentraler Gegenstand der Arbeit ist der ballistische Transport auf der untersten 1D-Transportmode in ausgedehnten und komplexen Multimoden-Wellenleitersystemen. Dazu wurden Transportmessungen bei tiefen Temperaturen (20 mK – 4.2 K) an insgesamt 15 Bauelementen von steigender Komplexität aufgenommen und analysiert.

Zunächst wird der Transport in kurzen 1D-Engstellen, Quantenpunktkontakten (QPCs), untersucht. Dieser zeigt Leitwertquantisierung mit hohen Subbandabständen von mehr als 10 meV. Es wird demonstriert, dass das Einschlusspotential eines QPCs reproduzierbar durch eine Abkühlspannung variiert werden kann. Ferner wird eine experimentelle Methodik erarbeitet, die in Aussicht stellt, die 0.7-Leitwertanomalie mit nur geringem experimentellem Aufwand von anderen Leitwertanomalien zu unterscheiden. Dabei bedarf es einzig der zeitaufgelösten Analyse des Stroms durch den QPC und keiner Temperaturvariation oder magnetfeldabhängiger Messungen, wie bisher üblich.

Quantisierter Leitwert wird auch an einfachen langen und sich kreuzenden elektronischen Wellenleitern (EWGs) nachgewiesen. Durch die begrenzt präzise Nanolithographie ist es in ausgedehnten Strukturen allerdings nicht möglich, einmodigen Transport zu erzielen. Um dennoch Transport auf der untersten 1D-Mode in einer komplexen EWG-Struktur zu realisieren, wird ein QPC als Modenfilter untersucht. An EWG-Quantenringen wird die Subbandstruktur des injizierenden QPCs in Zwei- und Vierpunktmessungen beobachtet. Die QPC-Subbandquantisierung wird an das EWG-Elektronensystem weitergegeben. Es wird ein Transportmodell erarbeitet, das die Beobachtungen erklärt und auf das Modenfiltern der 1D-Engstelle zurückführt. Somit wird einmodiger Transport in Multimoden-Wellenleiter durch einen steuerbaren QPC nachgewiesen.

Elektroneninterferenz in 1D-Quantenringen wird über den Aharonov-Bohm-(AB)-Effekt analysiert. Es gelingt mit einer asymmetrischen Vierpunktgeometrie sich zweifach orthogonal kreuzender EWGs, die in den meisten Quantenringen herrschende Phasenstarre aufzuheben. Dies ist von großer Relevanz für phasensensitive Untersuchungen. Mit Hilfe des elektrostatischen AB-Effekts kann die Elektronentransmissionsphase kontrolliert und kontinuierlich detektiert werden.

Die Quantenringe werden darüber hinaus genutzt, um Dekohärenz in 1D-Elektronensystemen zu untersuchen. Es wird demonstriert, wie ausgeprägt der Einfluss einer Messung auf die Kohärenz im Experiment sein kann. Mit zunehmender Anregungsamplitude nimmt die Kohärenz exponentiell ab. So wird ein Messaufbau mit minimalem Eingangsstrom (effektiv nur 100 pA) für eine maximale Sichtbarkeit der Interferenz (über 30%) entwickelt. An einem Quantenring mit Heizkanal wird die Elektronentemperatur bei kaltem Gitter variiert, und es wird ein thermisches Nichtgleichgewicht über den Quantenring angelegt.

Abschließend wird Elektroneninterferenz am Quantenring mit eingebettetem QPC nachgewiesen. Der QPC wird dabei in den untersten beiden Transportmoden betrieben. In phasensensitiven Interferenzmessungen wird keine systematische Phasenverschiebung festgestellt, was als weiteres Indiz für die kohärent-modenfilternde Eigenschaft des QPCs interpretiert wird.