

Diss. ETH No. 17242

Scanning Gate Microscopy of Semiconductor Quantum Circuits

A dissertation submitted to the
SWISS FEDERAL INSTITUTE OF TECHNOLOGY ZURICH

for the degree of
Doctor of Natural Sciences

presented by

Arnd E. Gildemeister

Diplomphysiker, Universität Heidelberg
born July 17, 1978
citizen of Germany

accepted on the recommendation of:

Prof. Dr. Klaus Ensslin, examiner
Prof. Dr. Danilo Pescia, co-examiner
PD Dr. Thomas Ihn, co-examiner

May 2007

Abstract

We present the construction of a dilution refrigerator cooled scanning force microscope (SFM) and its application in scanning gate microscopy (SGM) on mesoscopic semiconductor nanostructures.

The microscope operates at temperatures of about 100 mK. We use a tuning fork sensor with a metallic tip as a scanned gate. Slip-stick motors allow sample coarse-positioning at base temperature. The construction, thermal anchoring, and a procedure to optimize the settings of the phase-locked loop that we use for sensor control are discussed in detail.

With this microscope we have quantitatively studied the effect of charge traps on the electrical conductance of a quantum dot and a capacitively coupled quantum point contact. Using SGM, we could localize the traps. The quantum point contact served as a charge detector and allowed us to distinguish single electron charging events in several traps from charging events on the Coulomb blockaded dot. We used the quantum dot to analyze the tip-induced potential quantitatively and found its shape to be independent of the voltage applied to the tip within a certain range of parameters. We estimate that the trap density is below 0.1% of the doping density, that the charging energy of a trap is three times higher than that of the quantum dot, and that the interaction energy between the quantum dot and a trap is a significant portion of the dot's charging energy. Possibly, such charge traps are the reason for frequently observed parametric charge rearrangements.

To further our understanding of the tip-induced potential we have studied it in detail. With a novel method we quantitatively mapped the spatial dependence of the tip-induced potential and of the tip's lever arm with high resolution. We find that two parts of the tip-induced potential can be distinguished, one that depends on the voltage applied to the tip and one that is independent of this voltage. The first part is due to the metallic tip while the second part is the effect of a charged dielectric particle on the tip that may have been picked up during topography scans. In the measurements of the lever arm we find fine structure that depends on which quantum state we study. The results are discussed in view of the resolution that can be achieved by SGM and the interpretation of SGM data.

Finally, we present an *in situ* high-field treatment of the tip that improves the tip-induced potential. Alternative approaches for the production of tips are discussed.

Zusammenfassung

In dieser Arbeit werden die Konstruktion und Anwendung eines Tieftemperatur-Rasterkraftmikroskops dargestellt. Das in einem Mischkryostaten gekühlte Mikroskop wird für die Rastergatemikroskopie (SGM) von mesoskopischen Halbleiter-Nanostrukturen verwendet.

Das Mikroskop wird bei Temperaturen von etwa 100 mK betrieben. Wir verwenden Stimmgabelsensoren mit einer metallischen Spitze als bewegliche Gate-Elektroden. Slipstickmotoren erlauben uns eine grobe Positionierung bei Basistemperatur. Die Konstruktion, die thermische Verankerung, sowie ein Verfahren zur Optimierung des geschlossenen Phasenregelkreises werden detailliert beschrieben.

Mit diesem Mikroskop haben wir die Auswirkungen von lokalisierten Zuständen auf die elektrische Leitfähigkeit eines Quantendots und eines kapazitiv daran gekoppelten Quantenpunktkontakts quantitativ untersucht. Mittels SGM konnten wir die Position der Ladungen bestimmen. Der Quantenpunktkontakt diente uns als Ladungsdetektor und ermöglichte es uns, die Aufladung mehrerer lokalisierter Zustände mit einzelnen Elektronen von der Aufladung des Coulomb-blockierten Quantendots zu unterscheiden. Wir benutzten den Quantendot, um das spitzeninduzierte Potential quantitativ zu untersuchen. Wir stellen fest, dass seine Form innerhalb gewisser Grenzen nicht von der Spitzenspannung abhängt. Wir schätzen, dass die Dichte der lokalisierten Zustände weniger als 0.1% der Dotierdichte beträgt, ihre Ladeenergie etwa dreimal grösser als diejenige des Quantendots ist und dass die Wechselwirkungsenergie zwischen einem lokalisierten Zustand und dem Dot ein nennenswerter Teil der Ladeenergie des Dots ist. Vermutlich verursachen diese lokalisierten Zustände die häufig beobachteten parametrischen Ladungsverschiebungen.

Wir haben das spitzeninduzierte Potential sowie den Hebelarm der Spitze eingehend untersucht. Mit einer neuartigen Methode konnten wir ihre räumlich Verteilung mit hoher Auflösung abbilden. Es lassen sich zwei Anteile des spitzeninduzierten Potentials unterscheiden. Ein Teil hängt von der Spitzenspannung ab, der andere Teil ist davon unabhängig. Der erste Teil rührt von der metallischen Spitze her, während der zweite Teil durch ein geladenes dielektrisches Partikel auf der Spitze verursacht wird. Dieses wurde möglicherweise bei Topographiemessungen aufgelesen. Die Messungen des Hebelarms zeigen Feinstruktur, die vom benutzten Quantenzustand abhängt. Wir analysieren die Ergebnisse in Hinblick auf die mit SGM

erreichbare Auflösung sowie die Interpretation von SGM-Messungen.

Schliesslich präsentieren wir eine Hochfeld-Behandlung der Spitze, welche das spitzeninduzierte Potential *in situ* verbessert und besprechen alternative Methoden zur Herstellung von Spitzen.