



Universität Regensburg

Fakultät  
Physik

Institut für Experimentelle  
und Angewandte Physik

**Dr. Dieter Schuh**

Telefon +49 941 943-2064

Telefax +49 941 943-4226

Sekretariat:

Telefon +49 941 943-2080

Telefax +49 941 943-4226

Universitätsstraße 31

D-93053 Regensburg

dieter.schuh@physik.uni-regensburg.de

## Schlussbericht

Förderschwerpunkt: **nanoQUIT**  
Teilvorhaben: **AFM-strukturierte Quantenpunkttransistoren  
in Arrayanordnung**  
Förderkennzeichen: **01BM465**  
Bewilligungszeitraum: **01.01.2005 – 30.06.2009**  
Projektleiter: **Prof. Dr. Werner Wegscheider**

# I. Kurze Darstellung

## 1. Aufgabenstellung

Ziel des Projektes war die Realisierung von Quantenpunkt-Arrays in beliebiger Anordnung. An diesen Strukturen sollte sowohl elektrischer als auch Spintransport durch gezieltes Be- und Entladen der Quantenpunkte untersucht werden. Dabei stand der Einfluss der Quantenpunkte auf das kollektive Transportverhalten und die Kopplung der Quantenpunkte untereinander im Brennpunkt des Interesses.

Als technologische Herausforderung galt es die Herstellung der Quantenpunkt-Arrays zu etablieren. Dabei sollte das komplexe Verfahren zum Überwachsen von Spaltflächen (CEO) mit dem ebenso komplexen Verfahren der lokalen anodischen Oxidation durch Rasterkraft-Mikroskopie (AFM-Lithographie, bzw. AFM-Strukturierung) kombiniert werden, um die zweidimensionale Array-Anordnung der Quantenpunkt-Strukturen zu erreichen.

Beim Überwachsen von Spaltflächen wird zunächst ein undotiertes AlGaAs/GaAs Übergitter auf einem (100)-orientierten GaAs Substrat aufgebracht. Anschließend wird auf die etwa 100  $\mu\text{m}$  breite (110)-Spaltfläche dieses Substrats ein GaAs-Quantenwell epitaktisch aufgewachsen, in dem sich das zweidimensionale Ladungsträgersystem befindet. Die periodische Änderung der Bandstruktur im Übergitter des ersten Wachstumsschritts moduliert dabei das Potenzial im Transport-Quantenwell auf der Spaltfläche. Diesem technologisch anspruchsvollen Epitaxie-Verfahren mit einer großen Anzahl fein aufeinander abzustimmender Parameter sollten noch ebenso komplexe Strukturierungs-Verfahren hinzugefügt werden. So sollte z.B. mit Hilfe der Elektronenstrahlolithographie die Spaltfläche strukturiert werden und mit der Methode der AFM-Strukturierung die Potenziallandschaft des Transport-Quantenwells gezielt moduliert werden.

Am Ende dieser Verfahrenskette sollte ein 2D-periodisch moduliertes Ladungsträgersystem vorliegen, welches als Modell eines Arrays aus Quantenpunkt-Transistoren im Grenzfall starker Kopplung betrachtet werden kann.

## 2. Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde

Zu Beginn des Projektes stand in Regensburg eine Molekularstrahlepitaxie-Anlage für die epitaktische Herstellung reiner GaAs/AlGaAs-Halbleiterheterostrukturen und höchstbeweglicher zweidimensionaler Elektronensysteme (2DEG) zur Verfügung. Mit dieser Anlage wurden bereits erfolgreich Elektronensysteme auf Spaltflächen hergestellt. Ergänzend dazu standen in der Arbeitsgruppe Weiss ein Rasterkraft-Mikroskop und eine Elektronenstrahlolithographie-Anlage für Strukturierungsaufgaben zur Verfügung. Ebenso waren Ausstattung und Erfahrung für die elektrische Charakterisierung der Proben bei tiefen Temperaturen vorhanden.

### 3. Planung und Ablauf des Vorhabens

Im ersten und zweiten Jahr des Vorhabens war zunächst eine Optimierung der Parameter für das Wachstum auf Spaltflächen sowie eine Optimierung des Dotierprofils speziell für oberflächennahe zweidimensionale Elektronengase auf Spaltflächen vorgesehen, bevor im zweiten Jahr mit der Optimierung der Parameter für die AFM-Strukturierung begonnen werden sollte. Um jedoch möglichst schnell zu reproduzierbar gutem Ausgangsmaterial zu gelangen, wurde das Arbeitspaket „Herstellung und Untersuchung einfacher Quantenpunkt-Arrays“ bereits im ersten Jahr begonnen. Dazu wurden zunächst eindimensional AFM-strukturierte modulierte Elektronensysteme auf Spaltflächen präpariert, um aus Messungen Rückschlüsse für die Optimierung der Wachstumsparameter zu ziehen. Somit gelang bereits in der ersten Hälfte des zweiten Jahres die Herstellung einer 4-Punkt-Hallbarstruktur auf der überwachsenen Spaltfläche einer CEO-Probe. Mittels AFM-Lithographie und einem vergrabenen Übergitter wurde dieses System zweidimensional moduliert, so dass in Magnetotransportexperimenten  $1/B$ -periodische Widerstandsoszillationen beobachtet werden konnten. Diese konnten den prominentesten Fermikonturen der jeweiligen in x- bzw. y-Richtung modulierten Systeme zugeordnet werden. Fraktale Strukturen konnten nicht aufgelöst werden.

Die Erkenntnisse der ersten beiden Jahre zeigten zu diesem Zeitpunkt aber auch auf, dass die Kombination von AFM-Strukturierung mit dem Wachstum auf Spaltflächen im Vergleich zu anderen Verfahren der Herstellung von Einzelelektronentransistoren mit gezielter Kopplung, nur bedingt konkurrenzfähig ist. Da insbesondere die Komplexität von Bauelementstrukturen für die Quanteninformationsverarbeitung (wie z.B. Arrays von Quantenpunkt-Transistoren in beliebiger Anordnung) noch zunimmt, ist die Kombination von CEO und AFM-Strukturierung nicht die beste Wahl. Deswegen wurde eine Änderung der Projektziele hin zu einem Realisierungskonzept eines Quantencomputers auf Basis des „topologischen Quantencomputing“ beantragt<sup>i</sup>. Hauptschwerpunkt der zweiten Hälfte der Projektlaufzeit wurde dadurch die reproduzierbare Herstellung zweidimensionaler Elektronensysteme mit höchsten Beweglichkeiten, welche insbesondere als robustes Ausgangsmaterial für elektrostatisch definierte Bauelemente zum topologischen Quantencomputing verwendet werden können. Dazu wurden drei sich komplementär ergänzende Ansätze als Arbeitspakete definiert:

1. Verbesserung der technologischen Bedingungen wie z.B. Optimierung des Designs von Epitaxiezellen oder Verbesserung des UHV-Systems der Epitaxiekammer.
2. Adaption neuer Schichtfolgen zum Erreichen höchster Elektronenbeweglichkeiten bei stabilen und beleuchtungsunabhängigen Ladungsträgerkonzentrationen.
3. Steigerung der Qualität des Ausgangs-Rohmaterials durch Vorreinigung.

Zu den beiden ersten Ansätzen wurden noch während der Laufzeit des Projektes bedeutende Zwischenergebnisse erzielt, der dritte Ansatz beruht auf längerfristigen Prozessen und wird deswegen erst nach Beendigung dieses Projektes nachhaltige Erkenntnisse liefern.

↪

---

<sup>i</sup>vgl. hierzu 4. Zwischenbericht

#### 4. Wissenschaftlicher und technischer Stand zu Beginn des Vorhabens

Elektrisch zugängliche Systeme in Festkörpern waren zu Beginn des Vorhabens bereits Gegenstand weltweit intensiver Forschung zum Themenkomplex „Quanteninformationstechnologie“. Insbesondere wenige (meist 2) gekoppelte Quantenpunkte und einzelne Quantenpunkte, bei denen die Kopplung untereinander bzw. an die Umgebung einstellbar ist, wurden untersucht (siehe z.B. [1–4]). Komplementär dazu stand die Herstellung vieler (typischerweise  $\sim 1000$  Dots/ $\mu\text{m}$ ) meist selbstorganisiert gewachsener In(Al,Ga)As-Quantenpunkte für optischen Zugang im Interesse der Forschung. Hierbei lag der Schwerpunkt vor allem auf der gezielten Anordnung der selbstorganisiert gewachsenen Quantenpunkte (siehe z.B. [5–8]).

Als eigene Vorarbeiten konnte die AFM-Strukturierung, aufbauend auf Ergebnissen der Arbeitsgruppe Ensslin, Zürich (siehe z.B. [9,10]), in Regensburg erfolgreich etabliert werden. Vorarbeiten zu elektrostatisch definierten gekoppelten Quantenpunkten auf Spaltflächen wurden bereits 1997 erfolgreich demonstriert [11,12]. Darüber hinaus wurden bereits viele verschiedenartige qualitativ hochwertige Elektronensysteme auch auf Spaltflächen hergestellt (siehe z.B. [13–16]).

Arbeiten anderer Gruppen zu gekoppelten, AFM-strukturierten Quantenpunkt-Transistoren in Array-Anordnung waren zum Zeitpunkt der Antragstellung nicht bekannt.

#### 5. Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Vor allem in der ersten Projektphase bestand eine intensive Zusammenarbeit mit der Arbeitsgruppe Weiss, Regensburg. Dort wurden sowohl die AFM-Strukturierung des zweidimensionalen Elektronengases auf der Spaltfläche, als auch die Elektronenstrahlolithographie zur Definition der Hallbar sowie die Magnetotransport-Messungen bei tiefen Temperaturen durchgeführt.

In der zweiten Projektphase bestand eine enge Zusammenarbeit mit den Epitaxiegruppen von Werner Dietsche in Stuttgart und Andreas Wieck in Bochum. In diesem Rahmen wurden mehrere Workshops zum Themenkomplex „Epitaxie höchstbeweglicher Ladungsträgersysteme“ durchgeführt. Informeller Austausch bestand zu diesem Zeitpunkt auch mit Thomas Foxon, Nottingham und Vladimir Umanski, Israel.

Eine Zusammenarbeit während der gesamten Projektphase bestand mit der Arbeitsgruppe von Gerhard Abstreiter, WSI Garching. Hier wurden regelmäßige Informationen sowohl bezüglich des verwandten Projektes innerhalb des Förderschwerpunkts nanoQUIT, als auch allgemein über die Epitaxie hochbeweglicher Elektronensysteme ausgetauscht.

Darüberhinaus wurden die Projektpartner im Förderschwerpunkt nanoQUIT mit hochwertigem Probenmaterial versorgt.

## II. Eingehende Darstellung

### 1. Erzielte Ergebnisse

#### AFM-strukturierte zweidimensionale Elektronengase als Quantenpunkt-Array:

Als Grundlage für diesen Teil des Projektes wurde zunächst die Qualität der Ladungsträger- und Schichtsysteme auf der Spaltfläche optimiert. Einerseits sollten die 2DEGs für die durchzuführenden Magnetotransportexperimente hohe Elektronenbeweglichkeiten aufweisen, andererseits mussten sie sich nahe an der Substratoberfläche befinden. Desweiteren durfte diese nicht zu rau sein, da ansonsten keine AFM-Strukturierung durch lokale anodische Oxidation möglich ist [17]. Hierzu wurde das Wachstum von GaAs- und AlGaAs-Schichten, deren Dicke exakt ein ganzzahliges Vielfaches einer Monolage ist, an die Gegebenheiten der Epitaxie-Anlage in Regensburg angepasst. In Verbindung damit brachte die Einführung eines zusätzlichen Ausheizschrittes, bei dem die Substrattemperatur für 10 min von der regulären Substrattemperatur  $T_s = 480^\circ\text{C}$  auf  $T_s = 600^\circ\text{C}$  angehoben wird [18], eine deutliche Reduzierung der Oberflächenrauigkeit. Abbildung 1 zeigt eine AFM-Aufnahme der Oberfläche einer 20 nm dicken GaAs-Schicht: vor dem Ausheizprozess sind deutlich dreieckige Inseln zu erkennen (linkes Bild), während die Oberfläche nach dem Ausheizschritt glatt ist (rechtes Bild).

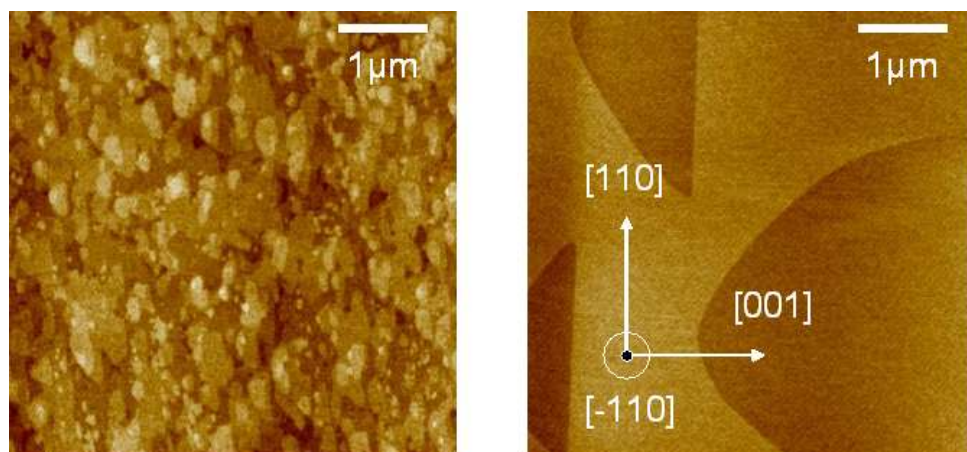


Abbildung 1: 20 nm GaAs auf einer (110)-Spaltfläche. Links: wie gewachsen ohne zusätzlichen Ausheizschritt, rechts: nach 10 min Ausheizen der Schicht bei  $T_s = 600^\circ\text{C}$

Die elektrischen Eigenschaften der oberflächennahen Ladungsträgersysteme wurden für die AFM-Lithographie angepasst. Hier wird zunächst eine 20 nm dicke GaAs-Schicht gewachsen, in der sich später das 2DEG ausbildet. Diese wurde durch Ausheizen geglättet. Anschließend wurden die restlichen AlGaAs Schichten sowie die Si-Dotierung aufgebracht. Mit Teststrukturen auf (110)-Flächen konnten Ladungsträgersysteme erzielt werden, die bei  $T = 4\text{ K}$  eine Elektronenbeweglichkeit von  $\mu = 850\,000\text{ cm}^2/\text{Vs}$  bei einer Dichte von  $n = 3.1 \cdot 10^{11}\text{ 1/cm}^2$  erreichten. Das 2DEG in diesen Strukturen war 50 nm unter der Probenoberfläche, so dass eine Strukturierung dieses Substratmaterials durch lokale anodische Oxidation mit Rasterkraftmikroskopie problemlos möglich war.