

# Raster-Tunnelspektroskopie an Halbleitern im Nanometerbereich

C. Eder, J. Smoliner, E. Gornik  
Institut für Festkörperelektronik, TU Wien  
1040 Wien

In der hier vorliegenden Arbeit werden Möglichkeiten demonstriert, wie mit Hilfe eines speziell konstruierten Raster-Tunnelmikroskops (STM) Aussagen nicht nur über ganze Ensembles, sondern über lokale Eigenschaften von niedrigdimensionalen Elektronensystemen gewonnen werden können. Anforderungen an Proben und Systemkomponenten werden diskutiert, die es ermöglichen, nanostrukturierte GaAs/AlGaAs Heterostrukturen über die technologisch wichtige (100)-Probenoberfläche zu charakterisieren.

## 1. Einleitung

Durch die fortschreitende Miniaturisierung von elektronischen Bauelementen sind die Anforderungen an die Mikrocharakterisierung enorm gestiegen. Neuartige Rastertechnologien wie STM, AFM, SNOM usw. eröffnen die Möglichkeit, Halbleiterstrukturen mit Auflösungen im atomaren Bereich zu studieren. Besonders bedeutend ist dies für das Gebiet der nanostrukturierten Elektronensysteme, die oft, bedingt durch Herstellungstechnologien wie z.B. der Laserholographie, nur in großen Ensembles charakterisiert werden konnten. Mittels STM ist es nun möglich, einzelne quantum wires [1], multi quantum wells [2] oder Übergänge [3] zu untersuchen. Dies geschah bislang allerdings immer über die geclavte (110) Oberfläche, die hinsichtlich der Oberflächen-Bandstruktur speziell geeignete Eigenschaften aufweist [4]. Die besonders interessante laterale Charakterisierung nanostrukturierter Halbleiter ist jedoch nur über die (100) Oberfläche möglich. In diesem Fall sollten sich Aussagen treffen lassen über die örtliche Elektronenverteilung im einzelnen wire oder dot bzw. über die Breite von Raumladungszonen an den Ränder. Die Beschaffenheit der (100) Oberfläche und speziell die bei Nanostrukturen im Vergleich zu atomar glatten Flächen rauhe Topographie stellt allerdings spezielle Anforderungen an Probenpräparation und Systemkomponenten.

## 2. Cryo-STM im Magnetfeld

Die Messungen zur Charakterisierung von nanostrukturierten GaAs/AlGaAs Heterostrukturen werden in einem kommerziell gebauten STM durchgeführt, das nach den von uns vorgegebenen Bedingungen konstruiert wurde. Die Besonderheit besteht in einer extrem schmalen Sondengeometrie (Durchmesser = 35 nm), die es ermöglicht, das STM in einem mit einem variablen Temperatureinsatz bestückten Cryostaten mit zwei supraleitenden Magneten ( $B_{\max} = 13$  T) zu verwenden. Dadurch kann ein Temperaturbereich von 1.5 K – 300 K überdeckt werden. Das STM selbst besteht aus einem Röhrenpiezo mit einem Scanbereich von  $10\mu\text{m} \times 10\mu\text{m}$  bei Raumtemperatur und  $2\mu\text{m} \times 2\mu\text{m}$  bei 4.2K. Niedrige Temperaturen und die Möglichkeit hoher Magnetfelder erlauben es, die strukturierten Proben auch mittels Magnetotransport zu untersuchen.

### 3. Experimentelles

#### 3.1 Probenherstellung

Ein wesentlicher Vorteil der Verwendung des STM liegt darin, daß die Proben weiterhin mittels der relativ einfachen Methode der Laserholographie und nachfolgendem naßchemischen Ätzen hergestellt werden können. Es werden dabei Perioden zwischen 200 nm und 500 nm realisiert, mit typischen Strukturturen von 10 nm. Über die Position der Spitze kann jeder beliebige quantum wire innerhalb des Scanbereiches einzeln untersucht werden. Ein einlegierter, alle quantum wires erfassender Au-Ge/Ni Kontakt dient als zweiter Kontakt an den Strukturen. Besondere Aufmerksamkeit muß der Bandstruktur der Probe gewidmet werden. Diese muß so beschaffen sein, daß in den nicht geätzten Bereichen die Oberflächenbarriere sehr dünn ist. Nur dann ist es möglich, über die Spitze Ladungsträger direkt in das unter der Oberfläche liegende 2DEG zu injizieren. In den geätzten Bereichen ist dies nicht mehr möglich, was einen signifikanten Unterschied im Transmissionskoeffizienten und somit im gemessenen Tunnelstrom bedeutet.

#### 3.2 Oberflächenpassivierung

Von besonderer Bedeutung für Messungen mit einem STM ist die Oberflächenbeschaffenheit der Probe. Da die Messungen weder an geätzten Strukturen noch im Ultrahochvakuum durchgeführt werden, muß vor allem der Einfluß des natürlichen Oxids so weit als möglich minimiert werden. Es wird dazu mittels einer milden  $\text{H}_2\text{SO}_4:\text{H}_2\text{O}_2:\text{H}_2\text{O}$  Lösung (4:1:400) zunächst die natürliche Oxidschicht entfernt. Anschließend wird die Probe sofort in einer wäßrigen  $\text{P}_2\text{S}_5/(\text{NH}_4)_2\text{S}$  Lösung passiviert. Diese Behandlung bewirkt eine ultradünne, stabile Oxidschicht [5].

#### 3.3 Makroskopisch rauhe Oberflächen

Obwohl bei nanostrukturierten Proben letztlich die Anforderungen bezüglich der lateralen Auflösung des STM im Vergleich zu atomaren Studien der Probenoberfläche wesentlich geringer sind, ergeben sich aufgrund der gegebenen Topographie (große vertikale Differenzen im Bereich von 10 nm) besondere Anforderungen an die Geometrie der Spitze [6].

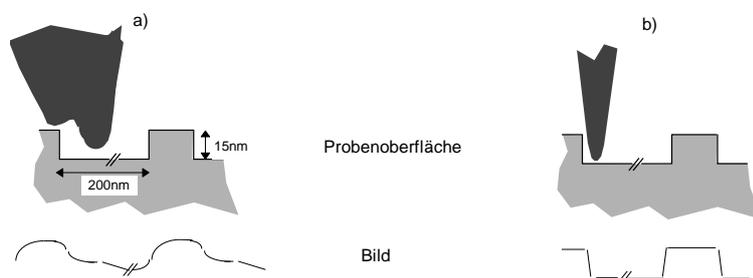


Abb. 1. Auswirkung der Spitzengeometrie auf die gemessene Probenmorphologie. Makroskopisch asymmetrische Spitzen mit großem Radius, die unter Umständen durch Minispitzen für Oberflächen mit atomarer Rauigkeit geeignet wären, verursachen eine unrealistische Bildwiedergabe (a). Zur Messung der tatsächlichen Topographie müssen symmetrische, scharfe Spitzen verwendet werden (b).

Um den Einfluß der Spitzenform auf das gemessene Oberflächenprofil so gering als möglich zu halten, bedarf es einer symmetrischen Spitze mit möglichst kleinem Radius und hohem Aspekt-Verhältnis (Abb. 1.). Dies macht die Verwendung von elektrochemisch geätzten Spitzen notwendig. Es wird dabei ein zu ätzender Draht als eine Elektrode einer elektrochemischen Zelle verwendet. Prinzipiell kann durch das Anlegen einer DC oder AC Spannung ein Abtragen des Materials erreicht werden, wobei es allerdings nötig ist, den Ätzprozeß zum richtigen Zeitpunkt zu unterbinden, oder die Spitze einem zweiten Prozeß zu unterziehen, der erst die endgültige Form bewirkt (elektrochemisches Polieren). Ersteres soll ein unnötiges Abflachen der Spitze verhindern, bei der zweiten Vorgangsweise wird der Spitzenradius durch den zweiten Prozeß optimiert.

Um möglichst scharfe Spitzen zu erhalten, wurde ein Prozeß realisiert, der auf starke Änderungen im Zellenstrom anspricht und den Ätzprozeß zu dem Zeitpunkt unterbricht, an dem der Radius des W-Drahtes gerade null wird [7]. Ein W-Draht (Durchmesser = 0.5 mm) wird dazu ca. 1 mm tief in eine 1M NaOH-Lösung eingetaucht und eine anfängliche Spannung zwischen +6 V bis +20 V DC angelegt. Die Änderung des Zellenwiderstandes liefert über einen Differenzierer ein Spannungssignal  $V_d$ , das über einen Komparator mit einem einzustellenden Schwellwert  $V_{th}$  verglichen wird. Dieser ist so gewählt, daß der Komparator genau dann getriggert wird, wenn der untere Teil des Drahtes abfällt, was einer sehr starken Änderung im Zellenstrom entspricht. Über einen Transistor wird dann die an der Zelle anliegende Spannung innerhalb von ms reduziert und ein weiteres Ätzen der verbleibenden Spitze verhindert. Mit diesem Aufbau können Radien von 50 nm und beliebigen Aspektverhältnis, abhängig von der Anfangsspannung, zuverlässig hergestellt werden. In der Bildqualität ist der Unterschied zwischen solchen und mechanisch hergestellten Au-Spitzen deutlich zu sehen (Abb. 2).

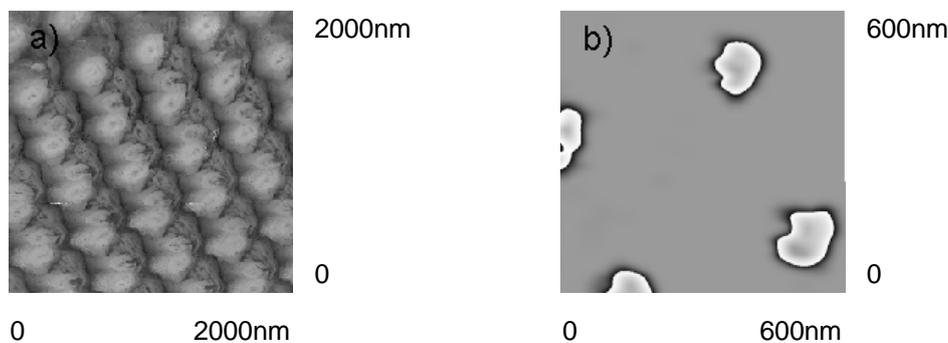


Abb. 2. STM-Aufnahmen von naßchemisch geätzten dots. Bei der Verwendung einer mechanisch präparierten Au-Spitze überlagern sich die Bilder mehrerer Minipoints (a). Mit geätzten W-Spitzen können solche Interferenzen vermieden werden. (b).

#### 4. Zusammenfassung

Es wird eine neuartige Methode entwickelt, mit der mittels eines Raster-Tunnelmikroskops nanostrukturierte Halbleiter direkt über die (100) Oberfläche lokal charakterisiert werden können. Dazu ist es nötig, speziell der Beschaffenheit der Tunnelspitze erhöhte

Aufmerksamkeit zu widmen, um deren Einfluß auf die gemessene Topographie zu minimieren. Das vorhandene System sollte es letztlich aber erlauben, neben topographischen Informationen auch Rückschlüsse auf elektronische Eigenschaften wie Raumladungszonen und Elektronendichten gewinnen zu können.

## Danksagung

Unser besonderer Dank gilt Herrn Josef Lutz von der Montanuniversität Leoben für die hilfreichen Hinweise zur Herstellung von geätzten W-Spitzen. Ebenfalls gedankt sei dem Metallwerk Plansee GmbH, von denen wir unseren W-Draht kostenlos beziehen konnten.

## Literaturverzeichnis

- [1] M. Pfister, M.B. Johnson, S.F. Alvarado, H.W.M. Salemink, U. Marti, D. Martin, F. Morier-Genoud and F.K. Reinhart, *Appl. Phys. Lett.* **65** (9), 1168 (1994)
- [2] J.F. Zheng, J.D. Walker, M.B. Salmeron, E.R. Weber, *Phys. Rev. Lett.* **72** (15), 2414 (1994)
- [3] S. Gwo, A.R. Smith, C.K. Shih, K. Sadra and B.G. Streetman, *Appl. Phys. Lett.* **61** (9), 1104 (1992)
- [4] R.M. Feenstra, J.A. Stroscio in *Scanning Tunneling Microscopy*, ed. J.A. Stroscio und W.J. Kaiser, Academic Press, San Diego, 1993
- [5] J.A. Dagata, W. Tseng, J. Benett, J. Schneir, H.H. Harary, *Appl. Phys. Lett.* **59** (25), 3288 (1991)
- [6] G. Reiss, J. Vancea, H. Wittmann, J. Zweck, H. Hoffmann, *J. Appl. Phys.* **67** (3), 1156 (1990)
- [7] Yufeng Chen, Wei Xu and Jinlin Huang, *J. Phys. E* **22**, 455 (1989)