

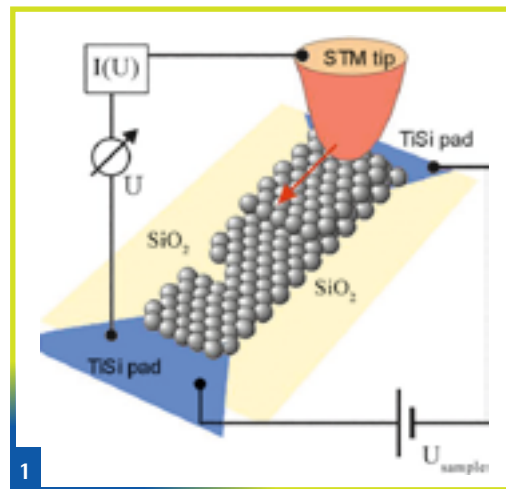
Physik auf der unteren Nanoskala

WIE LEITFÄHIGE QUANTENDRÄHTE SELBSTORGANISIERT ENTSTEHEN

Der Siegeszug der elektronischen Datenverarbeitung in den vergangenen 50 Jahren wurde entscheidend geprägt durch die Entwicklung immer kleinerer und komplexerer elektronischer Schaltkreise und Datenspeicher. Technologisch war dies möglich durch die immer weitere Skalierung schon weitgehend bekannter Prozesse auf immer kleinere Abmessungen (top-down-Ansatz). Heute sind wir auf diese Weise bei Strukturgrößen von wenigen zehn Nanometern angelangt. Ein Wissenschaftler vom Institut für Festkörperphysik zeigt die physikalischen Grenzen dieser Entwicklungsstrategie auf und erklärt, wie diese überwunden werden können.

In der Tat stellt der Übergang von Strukturgrößen auf der Skala von 100 Nanometern hin zu solchen, die nur noch ein oder wenige Nanometer groß sind, sowohl physikalisch wie technisch einen großen Sprung dar, denn während die Eigenschaften von 100 Nanometer großen Strukturen noch weitgehend von den Volumeneigenschaften des Materials bestimmt sind, sitzen beispielsweise bei einem nur noch drei Nanometer großen Teilchen schon etwa die Hälfte der Atome auf dem Rand dieses Teilchens. Sie sind daher schwächer gebunden als die Atome im Inneren und wechselwirken direkt mit der Umgebung. Beides hat direkte Auswirkungen auf ihre elektronischen Eigenschaften, das heißt diese werden direkt, und mit zunehmender Miniaturisierung immer stärker, von den Grenzflächen und Oberflächen bestimmt. Strebt man jedoch den Übergang zur Nanoelektronik im wörtlichen Sinne oder gar zur Molekularen Elektronik an, sind Strukturgrößen in diesem Bereich für die Bauteile selbst, aber auch schon für einfache Verbindungen zwischen Bauteilen zwingend notwendig.

Bei derartig kleinen Abmessungen wird darüber hinaus die Position jedes einzelnen Atoms wichtig, wie Abbildung 1 illustriert: Hier ist schematisch ein nur eine Atomlage hoher Quantendraht von im Mittel sechs Atomen Breite



dargestellt. Fehlt ein Atom, wird der Querschnitt bereits um zwanzig Prozent verkleinert. Zusätzlich wirkt diese Störung der periodischen Anordnung als Streuzentrum für daran vorbeifließende Elektronen. Ähnliche Auswirkung hat die Hinzufügung eines oder mehrerer Atome auf der vorhandenen Lage. Will man derart kleine Strukturen herstellen und nutzen, muss man folglich in der Lage sein, diese Strukturen auf der atomaren Skala zu kontrollieren und zu manipulieren. Hierzu greifen wir ganz wesentlich auf das Prinzip der Selbstorganisation zurück. Dies nennt man den bottom-up-Ansatz. Natürlich wird so nur die Basis für weitere Schritte gelegt. Auch ist ein Anschluss an die makroskopische Welt immer notwendig. Also muss man top-down- und bottom-up-Techniken geschickt kombinieren.

Grundsätzlich unterscheiden sich jedoch auch diese ultra-kleinen Strukturen von der uns bekannten makroskopischen dreidimensionalen Welt. Dies betrifft einerseits die Quantisierung aller physikalischen Eigenschaften. Der

Reiz sehr kleiner Teilchen und Strukturen liegt nicht nur darin, dass die energetischen Abstände quantisierter Niveaus bei Reduzierung in den Bereich von einem Nanometer schon bei Raumtemperatur beobachtbar werden, sondern dass auch neue Funktionalitäten, zum Beispiel durch quantenmechanisches Tunneln, genutzt werden können. Die ganz explizite Abhängigkeit dieser Eigenschaften von der Größe und von der chemischen Wechselwirkung mit einer immer vorhandenen Umgebung eröffnet ein weites Feld der Variation von Eigenschaften, die sowohl physikalisch wie technisch interessant sind.

Auch die Physik dieser Systeme in einer und zwei Dimensionen unterscheidet sich, abgesehen von den schon genannten Quanteneigenschaften,

ganz erheblich von der gut bekannten dreidimensionalen Welt, insbesondere durch ihre zahlreichen Instabilitäten und den dazwischen auftretenden Phasenübergängen. Diese führen beispielsweise zu Metall-Isolatorübergängen durch die so genannte Peierls-Instabilität, zur Ausbildung von Ladungs- und Spindichtewellen und zu korrelierten Elektronenbewegungen, die zum Beispiel durch das Modell der Luttinger-Flüssigkeit beschrieben werden.

Wenn man es genau nimmt, sind eindimensionale Systeme eine rein modellhafte Idealisierung, da thermische Fluktuationen jede langreichweitige Ordnung bei endlichen Temperaturen in solchen Systemen zerstören würden. Das bedeutet umgekehrt, dass erst die Verkopplung mit der dreidimensionalen Umgebung diese Systeme stabilisiert. Wie das im Einzelnen geschieht, ist nicht nur bei uns, sondern weltweit Gegenstand aktueller Forschung.

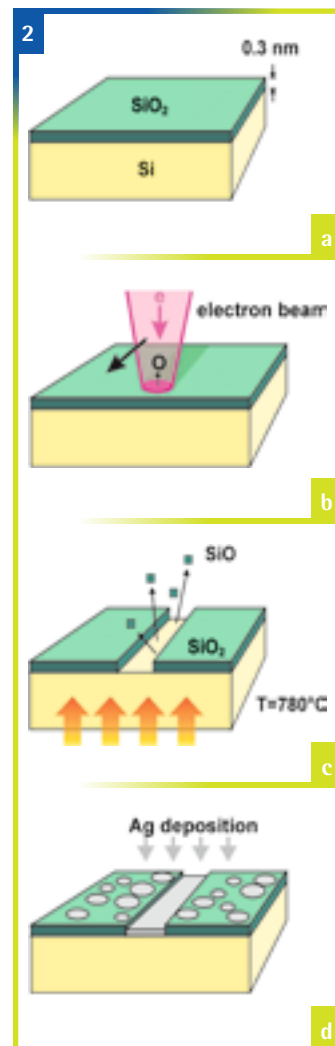
Aus diesem sehr weiten Feld sollen hier zwei Beispiele vorgestellt werden. Die physikalischen Eigenschaften extrem kleiner Strukturen sollen am Beispiel atomarer Quantendrähte vorgeführt werden. Zunächst wird die Verbindung von bottom-up- und top-down-Techniken zur Erzeugung und Vermessung des lokalen Widerstands eines einzelnen Quantendrahts gezeigt. Im zweiten Teil geht es dann um Bündel von Quantendrähten, die durch reine Selbstorganisation entstanden sind, und deren Transporteigenschaften.

Vereinzelung von Quantendrähten Nanolithographie im Oxid

Das Schreiben mit dem Elektronenstrahl eines Rasterelektronenmikroskops direkt in

sehr dünne Oxidschichten statt in Lacke erlaubt es, Strukturen nahe an der Auflösungsgrenze des Elektronenmikroskops zu schreiben.

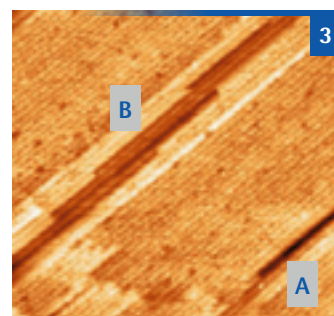
Das Prinzip ist in Abbildung 2 für Siliziumoberflächen dargestellt: Im Ultrahochvakuum wird zunächst eine nur zwei bis drei Atomlagen dicke Oxidschicht durch Einwirken einer verdünnten Sauerstoffatmosphäre hergestellt. In die-



se Schicht wird nun mit dem Elektronenstrahl »geschrieben«, das heißt die primären Elektronen aus dem Strahl des Rasterelektronenmikroskops erzeugen durch elektroneninduzierte Desorption ein unterstoichiometrisches Oxid. Beim Aufheizen der Probe unterhalb

der Desorptionstemperatur für SiO_2 setzt nun ein komplexer Reaktionsmechanismus ein, in dem das geschädigte Oxid weiter reagiert und beide Komponenten zusammen desorbieren. Auf dem freigeschriebenen Si können nun ultradünne metallische Strukturen erzeugt werden, die zum Beispiel aus nur einer atomaren Lage Silber bestehen, da Silber auf dem Silizium einen geschlossenen Film bildet, während auf dem nicht belichteten Oxid nur unzusammenhängende Tropfen entstehen.

Abbildung 3 zeigt nun ein mit dem Tunnelmikroskop aufgenommenes Bild einer real erzeugten Drahtstruktur nach dem Ausheilprozess, aber ohne Metall auf einer regelmäßig gestuften $\text{Si}(557)$ -Oberfläche. Man erkennt, dass abhängig von der Dauer der Belichtung und des Ausheilvorgangs unterschiedlich breite Drahtstrukturen entstehen, insbesondere aber auch, dass die kleinsten erzeugten Drahtstrukturen nur eine einzige Terrasse des Substrats umfassen. Mit 5,7 Nanometern Breite liegen sie also schon recht nahe am Durchmesser des Elektronenstrahls von circa drei Nanometern. Hier wird



gleichzeitig die Anisotropie der gestuften Oberfläche ausgenutzt. Die oben beschriebene Reaktion läuft nämlich entlang der Stufenkanten viele Größenordnungen schneller ab als senkrecht dazu.

Abbildung 1
Prinzipskizze eines Drahtes atomarer Dicke auf einer isolierenden Unterlage mit typischen Bau Fehlern auf der atomaren Skala. Gezeigt sind fehlende Atome und lokale Variation der Schichtdicke. Mit der Spitze eines Tunnelmikroskops lassen sich diese Eigenschaften spektroskopieren. Legt man zwischen die Enden des Drahtes eine Spannung, lassen sich mit der Spitze auch das lokale Potenzial entlang des Drahtes und damit elektrische Widerstandsänderungen auf atomarer Skala feststellen.

Abbildung 2
Direktes Elektronenstrahlschreiben in ultradünnen Oxidschichten:
a) Die Siliziumoberfläche wird im UHV 2–3 Lagen dick oxidiert und
b) mit dem Elektronenstrahl belichtet.
c) Das teilreduzierte Oxid wird thermisch entfernt.
d) Ein Silberdraht wird erzeugt.

Abbildung 3
Tunnelmikroskopische Aufnahme (200x200 Nanometer) einer gestuften $\text{Si}(557)$ -Oberfläche. Die Terrassenstruktur verläuft diagonal von links unten nach rechts oben. Mit dem Elektronenstrahl ins dünne Oxid geschriebene Drahtstrukturen erscheinen dunkel. Sie zeigen, dass kleinste Strukturen mit nur einer Terrassenbreite (5,7 Nanometer) erzeugt werden können (rechts unten).

Dieser Schreibvorgang wird nun kombiniert mit einer makroskopischen Kontaktierung, wie er in Abbildung 4a) dargestellt ist. Die elektronenmikroskopische Aufnahme zeigt oben und unten hell metallische Kontaktflächen, die durch die Reaktion von einer Schicht Titan mit dem Silizium zu TiSi_2 entstanden ist. Der dunkle, circa 50 Mikrometer breite Streifen wurde davon ausge-

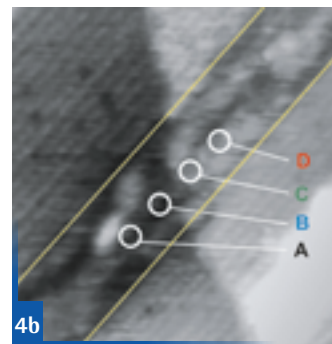
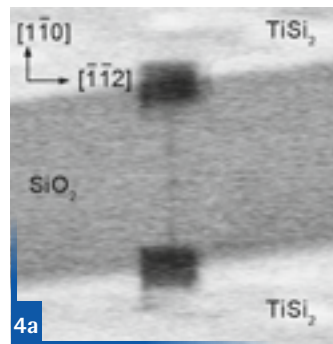
nun mit der Tunnelspektroskopie und -potentiometrie untersucht. Dazu wird das Tunnelmikroskop wie ein Potentiometer in einer Wheatstone-Brücke verwendet und mit der Spitze des Tunnelmikroskops an vielen Stellen auf dem Draht jeweils eine Strom-Spannungskennlinie des Tunnelstromes zwischen Spitze und Draht gemessen. Der Nulldurchgang des Stro-

für Stufen des Substrates, die den Draht kreuzen. Hier findet sich eine typisch zehnfache Erhöhung des lokalen Widerstandes schon für eine Doppelstufe und eine proportionale Widerstandserhöhung, wenn die Stufen höher sind. Dies bedeutet, dass die leitfähige Schicht eben nicht, wie man naiv annehmen würde, auf eine einzige Atomlage begrenzt ist, sondern die Oberflächenzustände des Siliziums mit einschließt.

Abbildung 4

a) SEM-Aufnahme (80x80 Mikrometer) eines Quantendrahtes (dünne vertikale Linie) zwischen zwei makroskopischen metallischen Kontaktflächen (helle Bereiche, TiSi_2). Zur besseren Kontaktierung ist der Draht an den Anschlussstellen zu zwei (dunkel erscheinenden) Rechtecken verbreitert.

b) Lokale STM-Aufnahme des mit einer Bleimonolage gefüllten Drahtes (Grenzen markiert durch gelbe Linien, Bildgröße 200 x 200 Nanometer). Die Inhomogenitäten auf dem Draht sind durch Bleiinseln verursacht. Der Kontrast zwischen dem rechten und linken Bildteil markiert den Höhenunterschied durch eine atomare Doppelstufe des Substrates (Höhe 0,314 Nanometer).



spart und enthält oxidiertes $\text{Si}(557)$, wie gerade beschrieben. In diesen wurde ein etwa 50 Nanometer breiter Draht parallel zu den Stufen des $\text{Si}(557)$ -Kristalls geschrieben und an den Enden zur besseren Kontaktierung verbreitert. Diese Kontaktflächen erscheinen als dunkle Rechtecke in Abbildung 4a). Auf diese Struktur wurde nun Blei aufgedampft. Ein geeigneter Temperoschritt entfernt nun das überschüssige Blei von den oxidbedeckten Flächen. Übrig bleibt nur noch eine durchgehende Monolage mit einigen höheren Bleiinseln im Bereich des Quantendrahtes, wie in Abbildung 4b) zu sehen. Diesen Eigenschaften wurden

mes bestimmt dabei jeweils die lokale Spannung entlang des Drahtes (einige Orte auf dem Draht in Abbildung 4b sind durch weiße Kreise gekennzeichnet). Auf diese Weise kann man lokale Widerstandsänderungen entlang des Drahtes feststellen. Aus diesem Widerstandsverhalten als Funktion des Ortes ergibt sich in der Tat, dass die leitfähige Schicht hier nur aus einer einzigen Monolage Blei besteht. Erstaunlicherweise tragen die sich auf dem Draht befindlichen Inseln zum Widerstand (oder seiner Verringerung) überhaupt nicht bei, da ihr Durchmesser deutlich kleiner als die jeweilige Drahtbreite ist. Ganz anders ist das aber

Bündel aus Quantendrähten

Lag die Betonung im vorigen Abschnitt eher auf Technik auf der unteren Nanoskala, die aber bereits eine Menge an neuartiger Physik liefert, wollen wir uns nun einigen kollektiven Effekten zuwenden, wie sie in stark anisotropen zweidimensionalen Systemen entstehen können und im Extremfall wieder eindimensionale Eigenschaften liefern. Wir bleiben beim System $\text{Pb}/\text{Si}(557)$. Nehmen wir eine nicht weiter strukturierte Oberfläche dieser Orientierung und bringen darauf eine gut ausgeheilte Monolage Blei auf, so bilden sich spontan Bündel von Bleidrähten durch Selbstorganisation (siehe Schema-bild 5a und das zugehörige STM-Bild 5b). Sieht man etwas genauer nach, stellt man fest, dass die bevorzugte Neigung dieser bleibedeckten Fläche nicht mehr der Ausgangsfläche, sondern einer etwas stärker geneigten (223)-Orientierung entspricht: Das auf der Oberfläche gebundene Blei hat



Prof. Dr. Herbert Pfnür

Jahrgang 1952, ist seit 1990 als Professor am Institut für Festkörperphysik an der Leibniz Universität Hannover tätig. Kontakt: pfnuer@fkp.uni-hannover.de

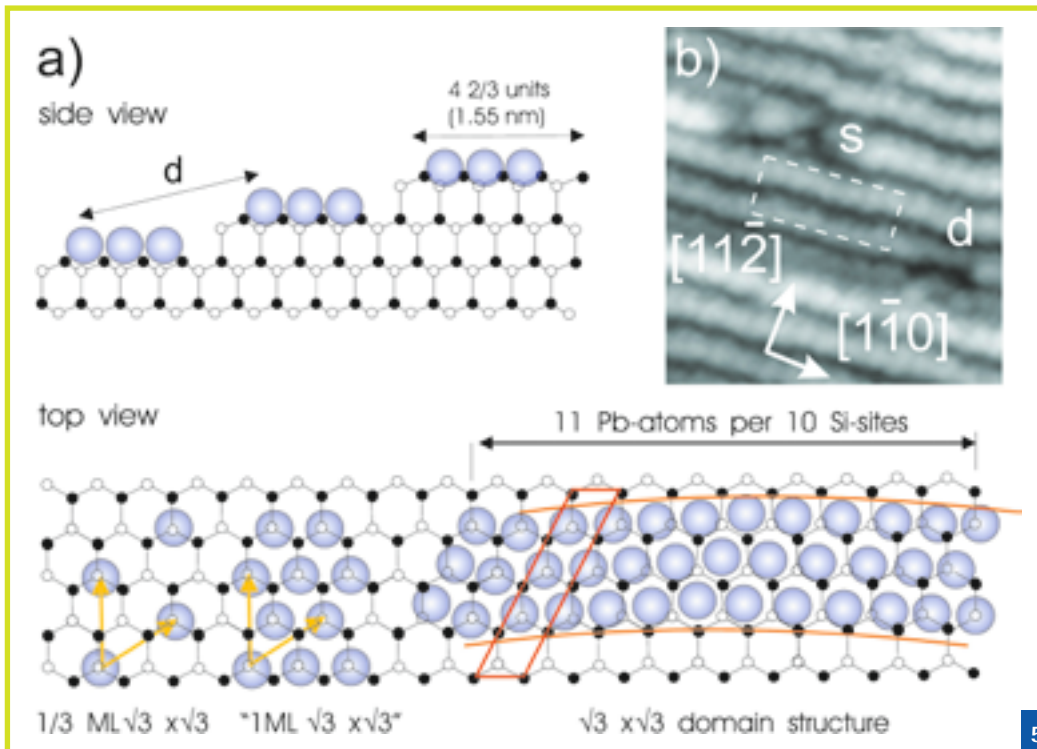


Abbildung 5
Bleimonolage auf Si(557):
a) Seitenansicht (oben) und Aufsicht der bleiinduzierte Ordnung und der Oberflächenfacettierung.
b) Tunnelmikroskopische Abbildung dieser Struktur. Nur die Atome an den Stufenkanten werden aufgelöst.

also die Ausgangsfläche destabilisiert und eine neue Fläche mit höherer Stufendichte und schmalere Bleidrähte auf den einzelnen Terrassen generiert. Die einzelnen Drähte sind intern wohl geordnet und entwickeln eine von den ebenen Si(111)-Flächen her gut bekannte Ordnung.

Diese bleiinduzierte Umordnung der Oberfläche ist verknüpft mit einer Energieabsenkung für die obersten besetzten elektronischen Zustände und hat deshalb dramatische Auswirkungen auch auf die elektronischen Transporteigenschaften. Sie führt nämlich, ganz anders als bei praktisch allen bisher bekannt-

ten Systemen, zu eindimensionaler metallischer Leitfähigkeit bei tiefen Temperaturen, und nur eindimensional zu einem isolierenden Zustand. Wir haben hier also ein Beispiel, in dem das kollektive Zusammenwirken von stark miteinander gekoppelten Drähten trotzdem zu eindimensionalen Eigenschaften führt. Diese Eindimensionalität wird erzwungen durch den periodischen Abstand der Drähte untereinander und kann deshalb durch die Aufhebung dieser Periodizität zum Verschwinden gebracht werden.

Die beiden Beispiele illustrieren, welche spannende Physik sich auf der unteren Nanoskala abspielt und dass es sich lohnt, in die Welt der niedrigdimensionalen Systeme vorzustoßen. Natürlich erfordert die präzise Kontrolle auf der atomaren Skala einigen Aufwand an Technik, aber der Vorstoß in diese Dimensionen bietet auch heute noch so viele Überraschungen, dass sich der Aufwand auf jeden Fall lohnt.

Weitere Details können in Physica Status Solidi B 82, 104106 (2010) nachgelesen werden.