

Stoßfrei durch die Nanostruktur

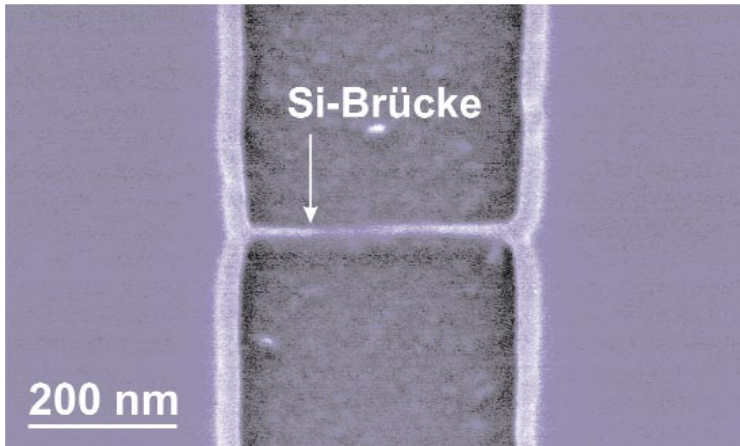


Abb. 1:
Si-Brücke von 20 nm Breite, 12 nm Dicke und 360 nm Länge, die etwa 45 nm über dem SiGe-Boden aufgespannt ist. Die hellen Säume an den Rändern repräsentieren unterätzte Si-Überstände.

Die kleinste Silizium-Brücke der Welt steht in Bochum. Mit unkonventionellen Präparationstechniken werden schon heute Strukturen hergestellt, deren Maßstab Atomabstände bilden. Doch in diesen ultrakleinen Dimensionen können Elektronen Wellencharakter zeigen. Die Folge sind neue, so genannte Quanteneigenschaften. Ob diese auch zu einem „Quantensprung“ in die Nanoelektronik-Ära führen, ist noch ungewiss – und doch schon heute Gegenstand der Forschung.

U. Kunze

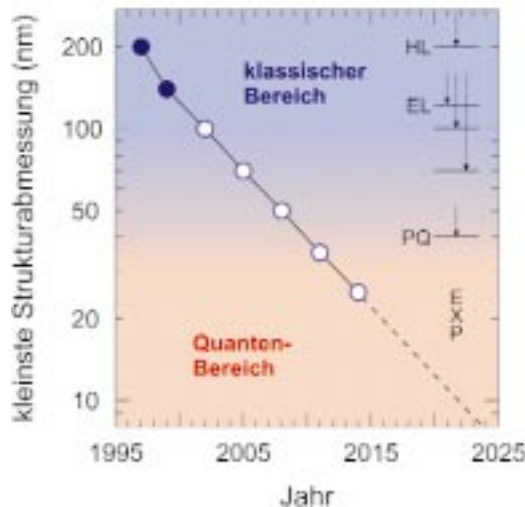


Abb. 2:
Halbleiter-Mikrochips werden immer kleiner: Die Prognosen der „SIA Roadmap for Semiconductors“ (leere Punkte) und ihre Extrapolation über 2014 hinaus sind jedoch ungewiss. Die Farbskala zeigt den Übergang von klassischen Bauelementen zu solchen auf der Basis von Quanteneffekten. Strukturherstellung (rechts) durch Hochdrucklampen (HL), Excimerlaser (EL) verschiedener Wellenlänge oder Plasmaquellen (PQ). „EXP“ sind beschriebene experimentelle Verfahren.

Seit Einführung der integrierten Schaltungen, der Silizium-Mikrochips, werden ihre Einzelbauelemente regelmäßig immer kleiner: Etwa alle fünf Jahre verringern sich die Strukturabmessungen auf die

Hälfte (Abb. 2). Betragen sie 1970 noch rund 15 µm (1 Mikrometer = 0,001 Millimeter), werden sie in wenigen Jahren die magische Grenze von 0,1 µm oder 100 nm (1 Nanometer = 0,000 001 Millimeter) unterschreiten

und das Zeitalter der „Nano“-Elektronik einläuten. Wird das immer so weiter gehen oder gibt es unüberwindliche physikalisch-technische Grenzen? Diese Frage beschäftigt nicht nur die Chiphersteller, sondern

auch einige tausend Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler, die weltweit auf dem Gebiet der Halbleiter-Nanotechnologie tätig sind. Wenn auch eine schlüssige Antwort derzeit nicht gegeben werden kann, so sind doch Teil-Antworten möglich. Zum einen sind industriell anwendbare lithographische Verfahren zur Strukturgebung unterhalb von etwa 100 nm noch nicht verfügbar, unter etwa 10 nm gibt es Ansätze von Herstellungsprozessen im Forschungslabor.

Doppelnatur: mal Teilchen, mal Welle

Zum anderen macht sich in Nanostrukturen die „Doppelnatur“ der Elektronen bemerkbar, die nicht nur Teilchen-, sondern auch Wellencharakter besitzen können. In ultrakleinen Strukturen treten unter bestimmten Bedingungen Elektronenwellen (Abb. 3) auf, die interferieren, d.h. sich verstärkend oder auslöschend überlagern und damit zu neuen, sog. Quanteneigenschaften in elektronischen Bauelementen führen.

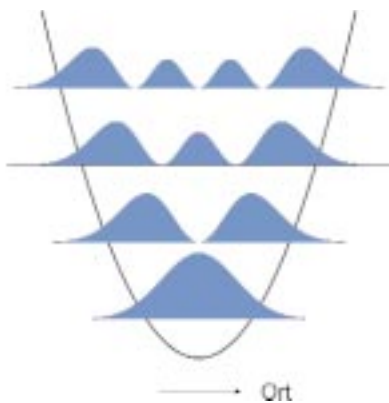


Abb. 3: Stehende Elektronenwellen quer zur Engstelle einer Halbleiter-Nanostruktur. Durch die seitliche Begrenzung der Struktur entsteht ein Potentialminimum (schwarze Kurve), in dem die Welle ortsfest „steht“. Die Zahl der Knoten bestimmt die Energie der Elektronen, sie ist hier durch die Lage der jeweiligen Grundlinie der Wellen wiedergegeben.

Elektronenwellen können „Hindernisse“ überwinden - sie „durchtunneln“ -, wenn diese nicht wesentlich länger sind, als die Wellenlänge des Ladungsträgers selbst. Hindernisse für die Elektronen stellen in der Nanostruktur die verschiedenen elektrostatischen Potentiale (potentielle Energie) dar. Elektronen bewegen sich in der Nanostruktur wie in einer „Potentiallandschaft“ mit Hügeln und Tälern.

Auch die sog. Coulomb-Abstoßungskraft zwischen den geladenen Elektronen kann in Nanostrukturen zu Einzelelektroneneffekten führen, die in herkömmlichen Bauelementen keine Rolle spielen: Wenn ein kleiner Raumbereich von Potentialwänden umgeben ist und so eine Potentialmulde („Quantenpunkt“) gebildet wird, kann diese nicht mehr kontinuierlich mit Elektronen angefüllt bzw. geladen werden. Das Hinzufügen des nächsten Elektrons erfordert eine zusätzliche „Coulomb-Energie“, die umso größer sein muss, je kleiner der Quantenpunkt ist, weil sich die Ladungsträger immer schwerer ausweichen können.

Für Chiphersteller ein Problem, für Forscher eine Spielwiese

Das Auftreten der ungewohnten Effekte ist für die Chiphersteller ein großes Problem, denn will man die neuen Eigenschaften zukünftig nutzen, dann müsste ein komplett neuer Baukasten von Modellen zur Simulation der Bauelemente zur Verfügung stehen. Für die Forschung hingegen eröffnen diese Effekte eine Spielwiese sowohl für ein grundlegendes Studium der elektronischen Eigenschaften von Nanostrukturen als auch für die Entwicklung neuartiger Bauelemente.

Unsere Bemühungen um die Herstellung von Halbleiter-Nanostrukturen konzentrieren sich von Anfang an auf experimentelle Strukturierungsverfahren (s. Abb. 2), denn eine hohe

Stückzahl je Zeit - wie z.B. 50 Wafer pro Stunde im industriellen Prozess - spielt hier ebenso wenig eine Rolle wie eine hohe Ausbeute an funktionierenden Proben. Ziel sind dagegen die besonders kleinen Strukturen, soll doch gerade die „terra incognita“ dieser ultrakleinen Abmessungen erforscht werden. Eine der verwendeten Techniken ist die seit Jahrzehnten etablierte Elektronenstrahlolithographie. Grundlegende Verbesserungen



Abb. 4: Bei der Arbeit im sog. Reinraum: Das wichtigste Arbeitsgerät ist das Rasterelektronenmikroskop (REM) - eigentlich zum Abbilden kleiner Strukturen gedacht, „zeichnet“ es hier die Nanostrukturen vor.

bei der Erzeugung und Formung des Elektronenstrahls machen dieses Verfahren heute gerade für das Forschungslabor interessant. Die Technik beruht auf einem Rasterelektronenmikroskop (REM), das zum Abbilden kleiner Strukturen ohnehin unverzichtbar ist (Abb. 4). Durch ein Zusatzgerät kann mit dem fokussierten Elektronenstrahl entlang vorgegebener Linien und Flächen über eine Probe „geschrieben“ werden, die zuvor mit einem Polymerfilm von einigen 10 nm Dicke beschichtet wurde. Die auftreffenden Elektronen zerschlagen die Molekülketten des Polymers in kleine Bruchstücke. Nachdem diese in einem Entwicklerbad herausgelöst wurden, liegt der

Halbleiter dort bloß und kann durch Ätzen in einer wässrigen Lösung angegriffen werden. Dabei entsteht unter den Linien ein Graben, dessen Abmessungen durch die Form der Öffnungen im Polymerfilm sowie von der Reaktivität der Ätzlösung und der Ätzdauer bestimmt wird. Die minimale Strukturbreite dieses Verfahrens liegt bei etwa 20 nm. Im Vergleich zu den industriell üblichen Trockenätzprozessen, bei denen die Oberfläche durch Beschuss mit reaktiven Teilchen abgetragen wird, ermöglicht Nassätzen mit einer geeigneten Lösung eine viel geringere Schädigungstiefe an der Halbleiteroberfläche.

Wir haben mit Hilfe der Elektronenstrahlolithographie Nanostrukturen in einem Schichtsystem aus Silizium (Si) und einer Legierung aus ca. 70% Si und 30% Germanium (Ge) hergestellt. Da der Polymerfilm den

Freitragende Brücke quasi ein Nebenprodukt

Si- und SiGe-Ätzlösungen nicht standhielt, wählten wir einen schrittweisen Prozess der Strukturübertragung. Dazu wurde die Si-Deckschicht des Schichtstapels zunächst durch Aufheizen in einer reinen Sauerstoff-Atmosphäre mit einem SiO₂-Film von 1 nm Dicke überzogen. In Ätzlösungen, die jeweils nur ein Material stark angreifen, wurden der SiO₂-Film strukturiert und Nano-Gräben in der Si-Schicht geätzt (Abb. 5, links). Während des Weiterätzens mit einer SiGe-spezifischen Lösung wird das Si unterätzt und bildet einen freitragenden Überstand (Abb. 5, rechts). Da für die Untersuchung des elektronischen Transports in Nanostrukturen die Präparation eines unterbrochenen Grabens optimiert werden sollte, erhielten wir - quasi als Nebenprodukt - bei besonders kurzen Unterbrechungen freitragende Brücken aus Si. Denn im Bereich der Unterbrechung wird das unter dem schmalen Si-Steg befindliche SiGe vollstän-

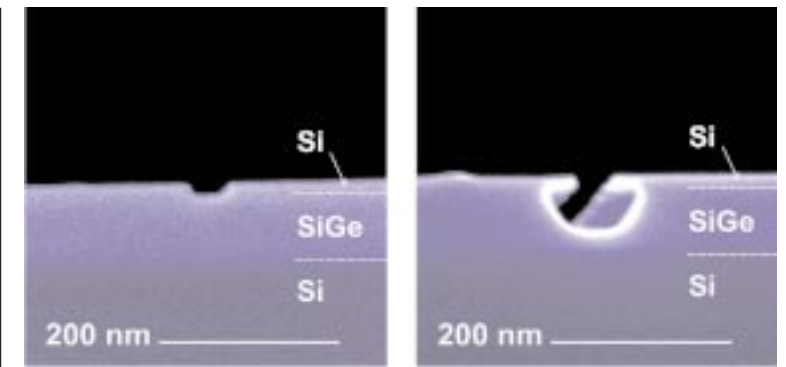


Abb. 5: Spaltflächen eines Si/SiGe-Schichtstapels mit geätzten Gräben auf der Oberfläche. Im linken Bild wurde ein 40 nm breiter Graben in die 13 nm dicke Si-Deckschicht geätzt, rechts ein 50 nm tiefer Graben in die 74 nm dicke SiGe-Schicht. Dabei wurde der Si-Film unterätzt - auf beiden Seiten bilden sich je 30 nm breite Überstände. Man beachte den schwachen Materialkontrast zwischen den dickeren Si- und SiGe-Schichten.

dig abgeätzt. Abb. 1 zeigt das „Rekordprodukt“ einer 360 nm langen Brücke von 20 nm Breite und 12 nm Dicke. Erstaunlich sind nicht nur die geringen Abmessungen - die Dicke entspricht dem 50fachen Abstand zwischen benachbarten Atomen - sondern auch die mechanische Stabilität. Nach dem Unterätzen des Si-Stegs wurde die Probe unter einem Strahl von (Reinst-)Wasser gespült und im Stickstoffstrom aus einer Druckpistole trockengeblasen.

Ein unkonventionelles Verfahren der Nanolithographie beruht auf der Verwendung eines Rasterelektronenmikroskops (RKM). So wie das REM ist auch das RKM für das Abbilden von Oberflächendetails entwickelt worden. Die Probenoberfläche wird zeilenweise durch eine feine Spitze mit etwa 10 nm Durchmesser abgetastet, die an der Unterseite eines federnden Stabes angebracht ist. Abstoßende Kräfte zwischen Spitze und Unterlage führen zu einer Verbiegung des Stabes, die optisch erfasst wird und die Höheninformation der Oberfläche enthält. Wenn der Federstab zusätzlich in Schwingungen versetzt wird und die Spitze dabei periodisch auf die Unterlage tippt, werden die Kräfte stark reduziert, sodass sich sogar weiche Materialien (z.B. lebende Zellen) zerstörungsfrei abbilden lassen.

Durch drastische Erhöhung der Vibrationsstärke verwandelt sich das zart fühlende Abtastinstrument in einen „dynamischen“ Pflug, mit dem sich entlang der Bewegungslinie der Spitze in eine plastisch deformierbare Oberfläche eine Furche ziehen lässt (Abb. 6).

Vom zarten Abtasten zum dynamischen Pflügen

In dieser Weise durchpflügten wir mit der RKM-Spitze einen diesmal nur 5 nm dünnen Polymerfilm und legten so die Halbleiteroberfläche für einen nachfolgenden Ätzangriff frei. Durch eine präzise Steuerung der Bewegung über die Oberfläche entlang zuvor festgelegter Linienmuster und einer dabei ortsabhängig umgeschalteten Vibrationsstärke können beliebige Linienmuster geschrieben werden. Mit vielen parallelen Linien in engem Abstand lässt sich beim Ätzvorgang sogar ein flächenhafter Abtrag annähern.

Prinzipiell lassen sich im anschließenden Ätzprozess noch feinere Strukturen erzeugen als mit der Elektronenstrahlolithographie. Die Anwendung der Methode wird eingeschränkt durch die hohen Anforderungen an die Ebenheit der Proben-

oberfläche. Si/SiGe-Schichten sind viel zu wellig, hier lässt sich kein gleichmäßig dünner Polymerfilm erzielen. Anders bei der Lithographie mit dem Elektronenstrahl, dieser kann viel dickere Polymerfilme durchdringen als die RKM-Spitze. Das elektronisch wichtige GaAs/(Al,Ga)-As-Schichtsystem ist auf der Oberfläche nahezu atomar eben und kann daher ideal mit der RKM-Lithographie bearbeitet werden (Abb. 6).

Zur Untersuchung elektronischer

Eigenschaften von Nanostrukturen in Hinblick auf Quanteneffekte geht man von einem Halbleitermaterial aus, in dem sich die Ladungsträger möglichst ungehindert bewegen können. Besonders hohe Kristallqualität wird in Schichtstapeln aus verschiedenen Materialien erzielt, die unter besonders reinen Prozessbedingungen abgeschieden werden. An der Grenzfläche zwischen GaAs und dem Mischkristall (Al,Ga)As oder zwischen einem Si-Film und dem umgebenden

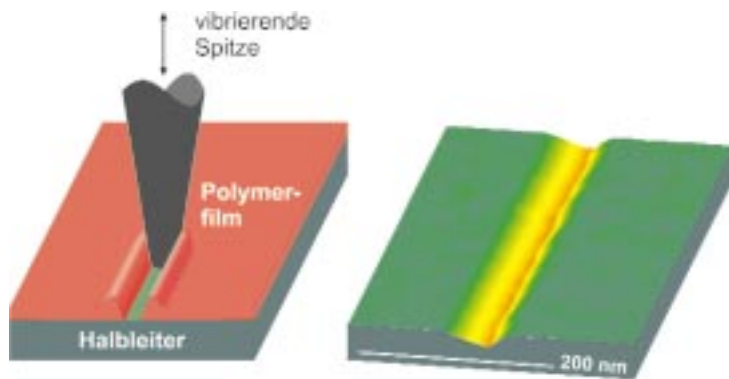
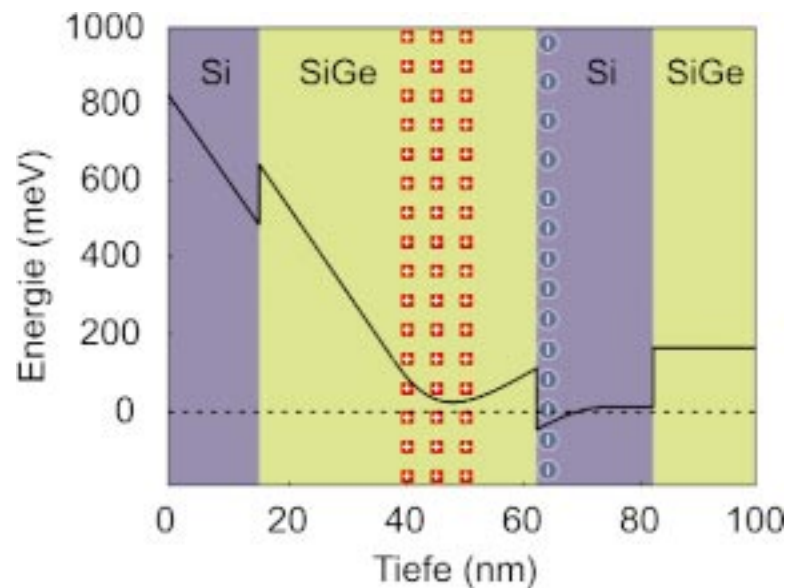


Abb. 6: Prinzip der dynamischen Pflügetechnik zur Verdrängung eines dünnen Polymerfilms auf der Probe durch die Spitze eines Rasterkraftmikroskops (RKM). Das rechte Bild zeigt eine GaAs/(AlGa)As-Probenoberfläche nach der Ätzübertragung. Die Tiefe des etwa 50 nm breiten Grabens wird bei der Abtastung mit der etwa 10 nm dicken RKM-Spitze unterätzt.



SiGe (Abb. 7) entsteht ein Potential-sprung, da die Minimalenergie für freibewegliche Elektronen in den Materialien verschieden ist.

Freie Elektronen fallen in den „Potentialtopf“

An der Stelle der geringsten Energie sammeln sich die in der Struktur vorhandenen freien Elektronen. Diese werden von Fremdatomen mit einem überzähligen Valenzelektron (Donatoren) geliefert, die zu diesem Zweck auf Gitterplätzen „fest eingebaut“ werden. Im vierwertigen Si und SiGe ist das fünfwertige Sb geeignet, im GaAs und (Al,Ga)As ersetzt Si die dreiwertigen Atome des Al oder Ga. Da die Donatoren nach Abgabe eines Elektrons positiv geladen sind, stören sie in ihrer unmittelbaren Umgebung die Bewegung der negativ geladenen Elektronen gewaltig. Daher werden sie in das Barrierenmaterial (SiGe in Abb. 7) eingebaut. Die abgegebenen Elektronen bilden in einiger Entfernung von dieser positiven Donatorladung in der Si-Schicht dicht an der Grenzfläche zum SiGe (bzw. im GaAs nahe der (Al,Ga)As-Barriere) einen leitenden Film.

Bei einer Temperatur des flüssigen Heliums von 4,2 K (-269 °C) werden die Schwingungen der Gitteratome um ihre Ruhelage weitgehend unterdrückt und damit mögliche Hindernisse für die Elektronen „aus dem Weg geräumt“. Sie können dann im Si-Film mehrere Mikrometer „immer geradeaus“ zurücklegen, bis es zum nächsten Zusammenstoß (elektrostatische Krafteinwirkung)

Abb. 7: Verlauf der potentiellen Energie senkrecht zur Oberfläche eines Si/SiGe-Schichtsystems (Hintergrund) mit positiv geladenen Donatoren (rot) in einem Teil der mittleren SiGe-Schicht. Freie Elektronen (blau) fallen bei tiefer Temperatur in den „Potentialtopf“ des eingeschlossenen Si-Films. An der Probenoberfläche nimmt das Potential stets große Werte an.

kommt und damit zu einer abrupten Richtungsänderung des Elektrons. Im GaAs/(Al,Ga)As-Schichtsystem erreichen die Elektronen bei tiefer Temperatur sogar zehnfach längere Weg-

ätzte Gräben zerschnitten wird. Die Grabentiefe muss dabei nicht bis in den Elektronenfilm reichen, die Tiefe der Donatorschicht genügt, um die Elektronen unter dem Graben zu ver-

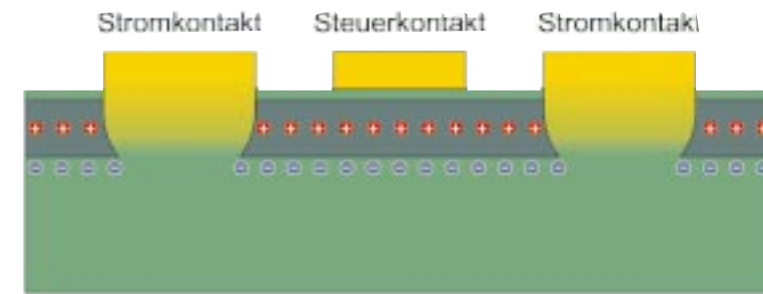


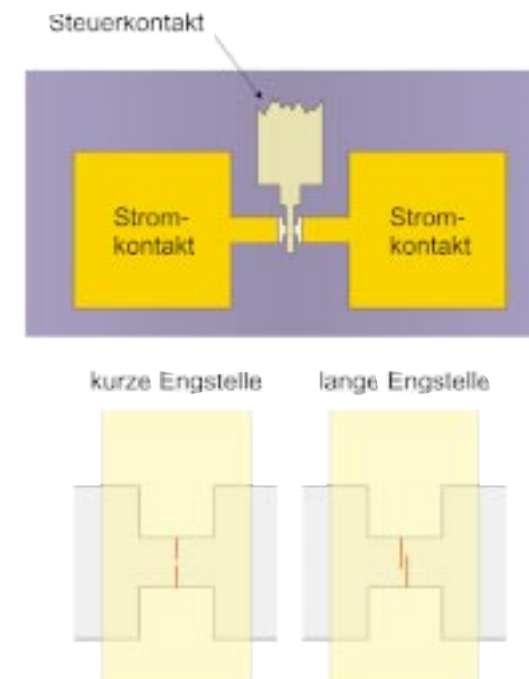
Abb. 8: Schematischer Querschnitt durch einen GaAs/(Al,Ga)As-Feldeffekt-Transistor.

strecken als im Si.

Um den Elektronentransport zu steuern, bietet sich auch bei Nanostrukturen das bewährte Prinzip des Feldeffekt-Transistors (Abb. 8) an, besteht er doch im Wesentlichen aus dem beschriebenen Schichtsystem mit Elektronenfilm. Die Flächendichte der Elektronen bestimmt seine Leitfähigkeit, die durch einen Metallfilm auf der Oberfläche der Schichtanordnung gesteuert werden: Wenn an diesem Steuerkontakt der Minuspol und am Elektronenfilm der Pluspol einer Spannung angelegt wird, dann werden die Elektronen im Film abgestoßen und in ein Nachbargebiet verdrängt, das nicht vom Metallfilm bedeckt ist. Wenn alle Elektronen verdrängt werden, leitet der Film nicht mehr - der Transistor ist „gesperrt“. Ähnliche Feldeffekt-Transistoren sind als aktives Schaltelement in vielen elektronischen Schaltungen und millionenfach in Computer-Mikroprozessoren enthalten.

Aus SiGe- oder (Al,Ga)As-Schichten lassen sich elektronische Nanostrukturen herstellen, indem der Elektronenfilm durch ge-

drängen. Durch eine unterbrochene Nut (s. Abb. 9, unten links) wird auf einer Strom führenden Fläche eine kurze Engstelle geschaffen, durch die die Elektronen hindurch müssen, wenn sie von einem Elektronengebiet in das andere kommen wollen. Diese Nanostruktur wird im Zentrum des Elektronenfilms platziert, der den Kanal eines Feldeffekt-Transistors bildet, und mit der metallischen Steuerelektrode bedeckt (Abb. 9, oben). Eine präzise Formgebung der Nanostruktur ist zwar notwendig, sie allein garantiert noch nicht den gewünschten stoßfreien Transport



durch die Engstelle. Wenn während der Strukturierung in der begrenzten Oberfläche Kristallbaufehler entstehen, können sich diese Defekte aufladen und durch ihr abstoßendes Potential die Engstelle weiträumig von Ladungsträgern frei halten, also die Stromleitung unterdrücken. Selbst wenn die Elektronen nicht verdrängt werden, können sie an einer mikroskopisch rauen seitlichen Begrenzungsfläche gestreut werden.

Welle: ungestört in Längsrichtung durch die Engstelle

Dadurch überlagern sich die entstehenden Wellen der Elektronen ungeordnet, ihr Wellencharakter wird im Experiment nicht sichtbar, und der Quanteneffekt kann nicht studiert und schon gar nicht ausgenutzt werden. Die Quanteneffekte stellen sich nur ein, wenn eine Welle ungestört, d.h. ungestreut in Längsrichtung durch die Engstelle läuft. Die beschriebenen nasschemischen Ätzverfahren zur Nanostrukturierung liefern optimale Bedingungen für einen stoßfreien Elektronentransport.

Die Qualität des Stromtransports durch die Engstellen wird durch die Leitfähigkeit (Leitwert) als Funktion der Spannung an der Steuerelektrode charakterisiert (s. Abb. 10). Bei tiefer Temperatur ($T = 4,2 \text{ K}$) zeigen diese Kennlinien sowohl in Si- als auch in GaAs-Strukturen das gleiche Grundschema: Anders als bei Transistoren ohne Engstelle verläuft die Kurve nicht

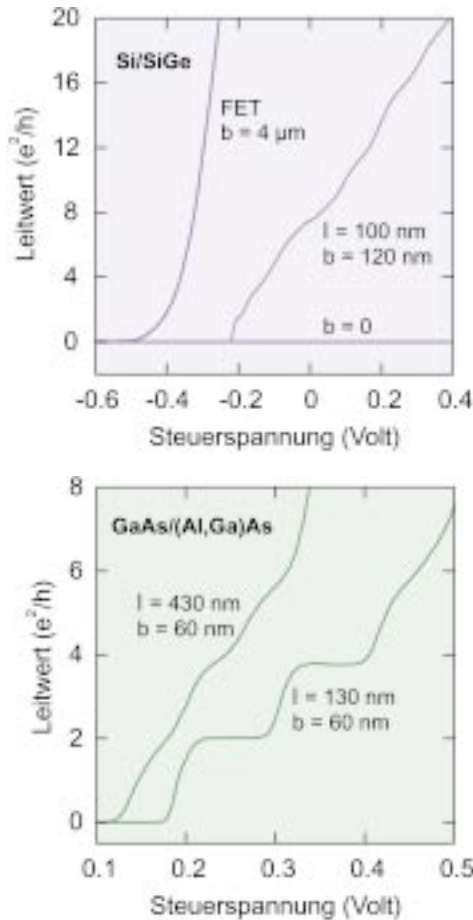
Abb. 9: Aufsicht eines Feldeffekttransistors auf der Basis eines Schichtsystems wie in Abb. 7. Große Metallinseln für Steuer- und Stromkontakte erleichtern den Anschluss von Zuleitungen. Der aktive Teil des Stromkanals befindet sich unter einer Zunge des Steuerkontakts. Diesen Teil zeigen vergrößert die unteren Bilder: Die geätzten isolierenden Linien (rot) bilden die Engstellen für die Elektronen.

mehr glatt, sondern zeigt eine Welligkeit, die bei besonders hoher Schichtqualität die Form von Stufen annimmt. Der Anteil von Elektronen, die es schaffen, die Engstelle stoßfrei zu durchlaufen, ist besonders hoch bei den qualitativ besseren GaAs/(Al,Ga)As-Schichten und hier insbesondere bei kurzen Engstellen.

Die Stufenhöhe wird im Idealfall nur von Naturkonstanten bestimmt: Der Leitwert beträgt dann in den Stufenplateaus Vielfache von $2e^2/h$ mit e als der Elementarladung und h als Planck'schem Wirkungsquantum.

Das Zustandekommen von Stufen kann durch die Wellennatur der Ladungsträger gedeutet werden. Der verfügbare Platz zwischen den geätzten Barrieren der Engstelle ist so klein, dass die Elektronen dort quer zur freien Transportrichtung eine stehende Welle bilden (s. Abb. 2). Jede weitere Stufe in Abb. 10 (rechts) ist Ausdruck einer dieser Elektronenwellen mit jeweils einem zusätzlichen Knoten. Bei erhöhter Spannung am Steuerkontakt der Transistorstruktur wird die gesamte Potentialumgebung der Engstelle abgesenkt und die Energiewerte der stehenden Welle sinken nacheinander unter die Besetzungsgrenze der Elektronenseen der Zuleitungsgebiete. Damit wird die Engstelle zur Schleuse: die Elektronen können diese passieren und gelangen so von einem Elektronensee in den anderen - sofern sie nicht gestreut werden.

Je größer der Abstand zwischen den Barrieren der Engstelle ist, desto dichter folgen die Energien der stehenden Wellen aufeinander, bis sie schließlich nicht mehr aufgelöst werden können und die Stufen in einen glatten Anstieg übergehen. Die Stufen im Leitwert von kurzen und langen Engstellen sind erstaunlich temperaturstabil, erst bei über 80 K (-193 °C) sind die Bedingungen für einen stoßfreien Transport nicht mehr gegeben. Das ist allerdings keine Frage der Präparationstechnik, sondern Folge der mit steigender Temperatur stärker schwingenden Atome im Kristall.



Die Herstellung qualitativ hochwertiger Halbleiter-Nanostrukturen verbunden mit dem Nachweis der Elektronen-Wellenleitung ist ein wichtiger Meilenstein auf der Suche nach verwertbaren Quanteneffekten für neuartige Bauelemente der Nanoelektronik. Diese Suche ist gerade für unseren wissenschaftlichen Nachwuchs bei der Vorbereitung ihrer Diplom- und Doktorarbeiten ein ideales Betätigungsfeld, das neben spannenden Experimenten mit faszinierenden Effekten auch einen tiefen Einblick in zukunftsweisende Halbleiter-Nanotechnologien bietet. Die Nanoelektronik leistet bereits heute einen wichtigen Beitrag für den Einstieg in die Post-Mikroelektronik-Ära, auch wenn wir noch nicht wissen, wann und mit welchen Konzepten diese einsetzen wird.

Abb. 10:
Kennlinien des Kanal-Leitwerts als Funktion der Spannung am Steuerkontakt:
- oben auf Si/SiGe, davon eines Feldeffekttransistors (FET ohne Nanostruktur), eines Punktkontaktes (s. Abb. 9 unten links) aus 100 nm-Gräben mit 120 nm breiter Unterbrechung und eines Kanals mit durchgehendem Graben.
- unten auf GaAs/(Al,Ga)As (Engstelle s. Abb. 9 unten rechts). Der Grabenabstand beträgt in beiden Fällen 60 nm, die Länge der Engstelle 130 nm bzw. 430 nm.

Dank

Allen internen und externen Kooperationspartnern auf den Gebieten der Halbleitertechnologie, -physik und Materialforschung sei an dieser Stelle herzlich gedankt, insbesondere den Herren Prof. Dr. Wieck und Dr. Reuter (RUB), Dr. Hackbarth und Dr. König (Daimler Chrysler, Ulm) sowie Dr. Ismail und Dr. Chu (IBM, Yorktown Heights, USA) für die Bereitstellung von Halbleiterschichten.

Mein besonderer Dank gilt meinen Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern, die mit großem Engagement, hilfreichen Ideen und unermüdlichem Einsatz die Projekte mitgetragen haben.

Dankbar erwähnt sei die finanzielle Förderung durch die DFG und das BMBF.

Prof. Dr.-Ing. Ulrich Kunze;
Lehrstuhl für Werkstoffe
der Elektrotechnik,
Fakultät für Elektrotechnik
und Informationstechnik