

Kohlenstoff-Nanoröhrchen für die Mikroelektronik?

Anwendungen sind als Leiterbahnen und in Transistoren denkbar

Wolfgang Hönlein und Franz Kreupl

Allen Unkenrufen zum Trotz folgt die auf Silizium basierte Mikroelektronik noch immer dem Mooreschen Gesetz und entwickelt sich rasant weiter. Über kurz oder lang wird sie aber an inhärente physikalische Grenzen stoßen. Nanoröhrchen aus Kohlenstoff bieten das Potenzial für eine weitere Miniaturisierung, sofern es gelingt, sie mit definierten Eigenschaften reproduzierbar an einem vorbestimmten Ort abzuscheiden.

Die Mikroelektronik befindet sich seit mehr als 40 Jahren in einer atemberaubenden Produktivitätsentwicklung: Alle drei Jahre verdoppelt sich die Anzahl der Transistoren auf einem Chip, wobei sich gleichzeitig die Transistor-Eigenschaften, wie z. B. die Schaltgeschwindigkeit, verbessern. Damit steht den Entwicklern eine leistungsfähige Technologie zur Verfügung, die sie in intelligente Lösungen zur Verbesserung unserer Lebensqualität umsetzen können. Doch welche Mechanismen stehen hinter einer derart erfolgreichen Entwicklung und wie lange kann sie noch andauern?

Integration einer großen Anzahl von Bauelementen mit hoher Ausbeute ist eng verbunden mit der technologischen Beherrschung der Grenzfläche zwischen Silizium und Siliziumdioxid. Sie bildet das Herzstück des MOS-Feldeffekt-Transistors, der wiederum zusammen mit den Leiterbahnen der elementare Baustein eines jeden Chips ist. Interessanterweise hat sich nicht das Material mit den besten physikalischen Eigenschaften, z. B. der höchsten Ladungsträger-Beweglichkeit, durchgesetzt, sondern – mit Silizium – das Material, das technologisch am besten beherrschbar ist.

Weitere Erfolgskriterien für die Silizium-Technologie sind, dass sich eine große Anzahl von Bauelementen zur gleichen Zeit parallel prozessieren lässt und dass die individuellen Prozessschritte mit hoher Präzision wiederholt werden können. Dazu kommt die Modularität des hochkomplexen Gesamtprozesses, der es gestattet, die sehr kapitalintensiven Fertigungsgeräte besser zu nutzen. So erlaubt die Silizium-Technologie einen höchst ausgereiften Fertigungsprozess, in dem die grundlegenden Schritte, wie die Aufbringung einer Schicht und ihre anschließende Strukturierung durch Photolithographie und Ätzen, seit vielen Jahren unverändert geblieben sind. Die wesentliche Innovation liegt in der stetigen Verkleinerung der Bauelemente, ohne die grundsätzlichen Herstellungszyklen zu verändern.

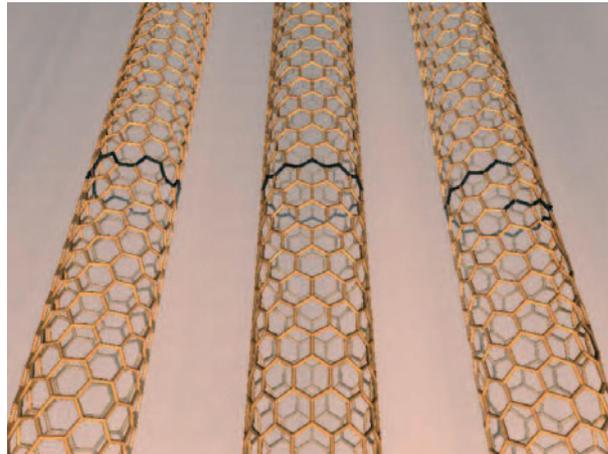


Abb. 1: Kohlenstoff-Nanoröhrchen sind aus dreifach kovalent gebundenen Kohlenstoff-Atomen aufgebaut, die in Sechsecken angeordnet sind. Man kann sie sich als nahtlos aufgerollte, einlagige Grafitschicht vorstellen. Die Durchmesser können dabei sehr klein (< 1 nm), die Längen im Vergleich dazu aber sehr groß (mm) sein. Die Röhrchen lassen sich auf verschiedene Weise aufrollen; man unterscheidet Armchair- (links), Zigzag- (Mitte) und chirale Typen (rechts). Alle Konfigurationen haben unterschiedliche elektronische Eigenschaften.

Natürlich hat eine derartige Entwicklung Grenzen, z. B. physikalische, wenn bei den immer dünner werdenden Isolatorschichten die Tunnelbarriere unterschritten und der Isolator zum Leiter wird. Oder ökonomische, wenn etwa die Kosten für die Lithographie in erheblichem Maße die Steigerungsraten der übrigen Prozesse übertreffen. In der Vergangenheit sind solche Grenzen häufig vorhergesagt und dann durch Innovationen doch wieder umschifft worden. Trotzdem ist jedem klar, dass sich die Produktivitätsentwicklung der Silizium-basierten Mikroelektronik irgendwann verlangsamen wird. Die Mikroelektronik-Industrie muss für diesen Fall Alternativen bereit haben, die es ermöglichen, die Produktivitätsraten beizubehalten. Grundsätzlich kann das durch „sanfte“ Hereinnahme neuer Materialien in den erfolgreichen Fertigungsprozess geschehen oder im Extremfall durch eine vollkommen neue „Ablösetechnologie“, die aus anderen physikalischen und fertigungstechnischen Prozessen besteht.

Im Folgenden wollen wir untersuchen, ob die seit 1991 bekannten Kohlenstoff-Nanoröhrchen (Carbon Nanotubes, CNT) [1, 2], eine neuartige Modifikation des Kohlenstoffs, eine weitere Fortführung der Mikro-

Dr. Wolfgang Hönlein; Dr. Franz Kreupl, Infineon Technologies AG, CPR NP, Otto-Hahn-Ring 6, 81739 München

elektronik-Technologie gestatten. Die Entwicklung einer vollkommen neuartigen Technologie, die durch Verfahren z.B. der Biologie zum „Chip aus dem Reagenzglas“ führt, soll hier nicht behandelt werden.

Physikalische Grundlagen

Kohlenstoff-Nanoröhrchen sind röhrenartige Gebilde, die man sich aus einer Grafitsschicht aufgerollt vorstellen kann (Abb. 1). In Analogie zur grafitischen Modifikation des Kohlenstoffs sind die Grundbausteine planare Sechsecke, in denen jedes Kohlenstoff-Atom zu drei seiner Nachbarn kovalente Bindungen eingeht

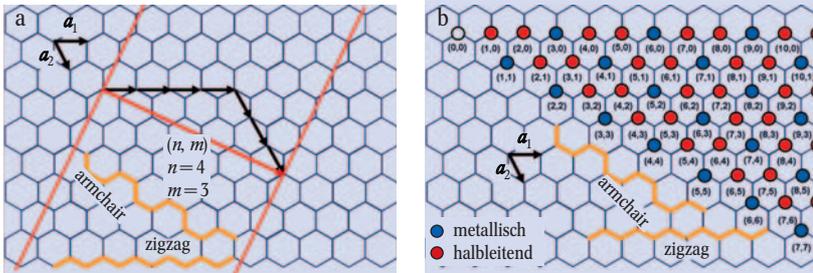


Abb. 2: Der Aufrollvektor (n,m) der Nanoröhrchen ist über die Basisvektoren a_1 und a_2 des Grafitgitters definiert. Je nach Kon-

figuration können die Röhrchen metallisch oder halbleitend sein (b, vgl. Text).

und das vierte Elektron über die gesamte Struktur frei beweglich, also „verschmiert“ ist (sp^2 -Hybridisierung). Je nach Lage der Sechsecke relativ zu einem frei wählbaren Koordinatensystem lassen sich sog. „Armchair“- , „Zigzag“- und chirale Typen unterscheiden, die sich alle durch unterschiedliche elektronische Eigenschaften auszeichnen (Abb. 1).¹⁾ Die Nanoröhrchen lassen sich mithilfe des Aufrollvektors (n,m) klassifizieren, den man bezüglich der Basisvektoren a_1 und a_2 des Grafitgitters angibt (Abb. 2). Der Betrag des Aufrollvektors entspricht dem Umfang des Röhrchens und seine Richtung zeichnet die Richtung senkrecht zur Aufrollachse des Röhrchens aus. Für $n=m$ erhält man Armchair-Röhrchen, die immer metallisch sind, wohingegen Zigzag-Röhrchen metallisch oder halbleitend sein können; hier zeigt der Aufrollvektor in Richtung eines der Basisvektoren, d. h. $n=0$ oder $m=0$. Generell gilt, dass das entstehende Röhrchen metallisch ist, falls $(n-m)/3$ eine ganze Zahl ist; andernfalls ist es halbleitend. Insgesamt sind daher zwei Drittel aller möglichen Konfigurationen halbleitend, ein Drittel metallisch.

1) Die Bezeichnungen „armchair“ und „zigzag“ beziehen sich auf das Aussehen der fettgedruckten bzw. orangefarbenen Linien in Abb. 1 bzw. 2.

Darüber hinaus muss man unterscheiden zwischen einwandigen Nanoröhrchen, die einer einzelnen aufgerollten Grafitsschicht entsprechen, und mehrwandigen Röhrchen, die aus mehreren konzentrisch angeordneten einwandigen Röhrchen bestehen.

Abbildung 3 zeigt die berechneten Zustandsdichten für zwei einwandige Röhrchen mit nahezu gleichem Durchmesser. Die Zustandsdichte in Abb. 3a verschwindet um das Fermi-Niveau $E=0$ herum, man hat also eine halbleitende Nanotube erzeugt, während in Abb. 3b die Zustandsdichte nirgends vollständig verschwindet, also eine metallische Nanotube entstanden ist. Periodische Randbedingungen für die Elektronenwellenfunktion (Born-von Karman-Quantisierung) entlang des Umfangs führen zu diskreten Zuständen, die jeweils mit einem Peak in der Zustandsdichte einhergehen. Da ihr Energie-Abstand wesentlich größer ist als die thermische Energie (~ 26 meV) bei Umgebungstemperatur, ist bei Raumtemperatur nur der tiefste Zustand besetzt.

Man hat also Systeme zur Verfügung, die bei Raumtemperatur eindimensionales Verhalten zeigen, denn längs der Röhrenachse sind Elektronen frei beweglich, falls das Gitter keine Fehlstellen enthält. Der Leitwert dieses eindimensionalen Systems kommt auf einer Längenskala von $1 \mu\text{m}$ dem idealen Leitwert von $4G_0$ nahe, weswegen man den Ladungstransport auch als ballistisch bezeichnet. Dabei kommt der Faktor 4 aufgrund der Band- sowie der Spinartung zustände (je ein Faktor 2) und $G_0=e^2/h$. Im Gegensatz zu Metallen mit mittleren freien Weglängen der Ladungsträger von etwa 40 nm weisen Nanotubes Werte zwischen 500 nm und $10 \mu\text{m}$ auf. Durch die Abwesenheit von Streuzentren und die geringe Wechselwirkung mit Phononen lassen sich extrem hohe Stromdichten von bis zu 10^{10} A/cm^2 realisieren [3].

Da sich CNTs mit extremen Aspektverhältnissen (Länge zu Durchmesser) herstellen lassen, erscheinen sie für Anwendungen als Stromleiter besonders geeignet. In ihrer halbleitenden Konfiguration können sie – mit einer Steuerelektrode versehen – als Stromschalter eingesetzt werden. Damit hat man die wesentlichen Bausteine der Mikroelektronik zur Verfügung, und das mit besseren Eigenschaften als in der Silizium-Technologie. Die Tabelle unten gibt einen Überblick über die wichtigsten Eigenschaften von Kohlenstoff-Nanoröhrchen für Anwendungen in der Mikroelektronik.

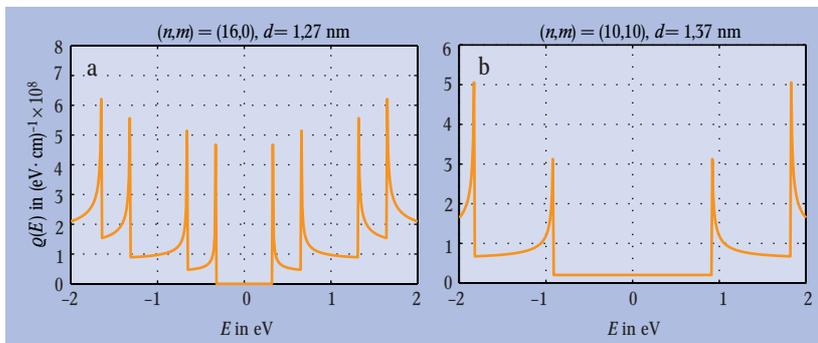


Abb. 3: Berechnete Zustandsdichten $\rho(E)$ für einwandige Nanoröhrchen mit annähernd gleichem Durchmesser. Bei einem halbleitenden Röhrchen verschwindet die

Zustandsdichte in der Nähe der Fermi-Energie $E=0$ (links), bei einem metallischen Röhrchen ist $\rho(E)$ überall endlich.

Die wichtigsten Eigenschaften der Nanoröhrchen

elektrische Leitfähigkeit	metallisch oder halbleitend
Energielücke	E_g [eV] $\approx 1/d$ [nm]
Elektronentransport	ballistisch, keine Streuung
maximale Stromdichte	10^{10} A/cm^2
Durchmesser	1–100 nm
Länge	bis zu mm
thermische Leitfähigkeit	6000 W/(K·m)
piezoelektrische Verformung ($\Delta l/l$)	0,11% @ 1V

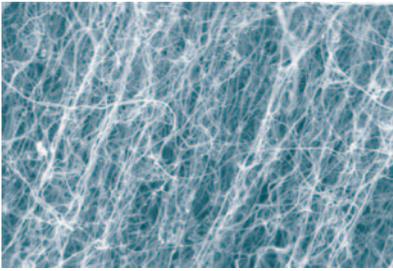


Abb. 4: Mehrwandige Nanoröhrchen, die mit dem Katalysator-unterstützten CVD-Verfahren hergestellt wurden, bilden einen „Rasen“. Dieser wird durch seitliche Vernetzung stabilisiert. Die Katalysator-Schicht ist in diesem Bild nicht sichtbar.

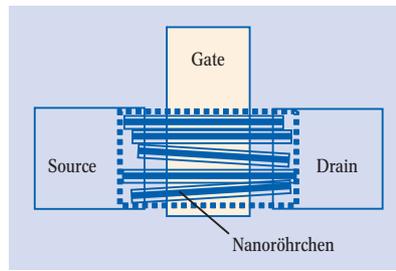


Abb. 5: Ein CNT-Transistor lässt sich herstellen, indem eine definierte Anzahl von Nanoröhrchen mit definiertem Abstand und gleichen Eigenschaften aus der Flüssigphase in ein lithografisch definiertes Fenster abgeschieden wird.

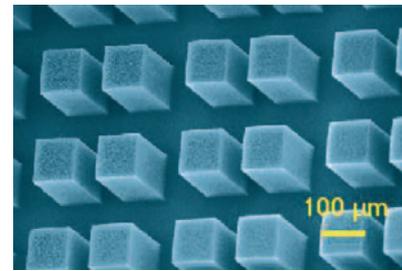


Abb. 6: Katalysator-unterstütztes Wachstum von mehrwandigen Nanoröhrchen. Durch lithographische Strukturierung der Katalysator-Schicht lässt sich selektives Wachstum erreichen. Durch seitliche Vernetzung behalten die aus hunderttausenden von Röhrchen gebildeten Blöcke ihre Kontur.

Herstellung von Nanoröhrchen

Zur Synthese von Nanoröhrchen stehen prinzipiell zwei Methoden zur Verfügung:

► Herstellung von CNTs in einem Lichtbogen zwischen Kohlenstoff-Elektroden [4] oder durch Laser-unterstützte Abdampfung von Kohlenstoff in einem Ofen [5] bei jeweils hohen Temperaturen: Hierbei werden die entstandenen Kohlenstoff-Reaktionsprodukte aus dem Reaktor aufgesammelt und in einem geeigneten Lösungsmittel suspendiert. Mit diversen Reinigungsprozeduren lassen sich amorphe Rückstände beseitigen. Anschließend ist bei dieser *ex situ*-Methode generell eine Sortierung nach halbleitenden oder metallischen Tubes möglich, wie sie für einen Einsatz in der Mikroelektronik notwendig ist. Für Anwendungen als Transistor benötigt man halbleitende einwandige Röhrchen, für leitfähige Verbindungen kann man auf mehrwandige Röhrchen zurückgreifen, die bei bestimmten Herstellungsbedingungen entstehen und bei genügender Anzahl der Schalen immer auch metallische Konfigurationen enthalten. Vergleichbare Daten für Reinheit und Ausbeute werden in der Literatur aber bisher nicht genannt. Auch ist es bisher noch nicht gelungen, die Länge und Durchmesser mit ausreichender Ausbeute einzustellen.

► *In situ*-Herstellung durch katalytische Abscheidung aus der Dampfphase (CCVD) eines kohlenstoffhaltigen Gases: Man scheidet dabei zunächst eine sehr dünne Schicht eines Katalysators (hauptsächlich Fe, Co, Ni) auf einem Substrat ab und bringt anschließend nach geeigneten Temper-Schritten das Substrat bei Temperaturen zwischen 600 und 900 °C in einen CVD-Reaktor. An Stellen, an denen der Katalysator die zum Wachstum ausreichende Morphologie hat, wächst nun bei Zugabe von Acetylen oder Methan ein „Nanotube-Rasen“ (Abb. 4). Ob primär mehrwandige oder einwandige Röhrchen wachsen, kann bis zu einem gewissen Grad über die Katalysator-Morphologie und die Abscheide-Temperatur gesteuert werden [7]. Diesen wichtigsten Parameter vollständig zu kontrollieren ist aber auch mit dieser Methode (noch) nicht möglich. Immerhin lassen sich senkrecht angeordnete Nanotubes in sehr guter Qualität und Reinheit erzeugen, weswegen der CCVD-Prozess bevorzugt für Mikroelektronik-Anwendungen zum Einsatz kommt.

Platzierungsmethoden

Der Erfolg der Mikroelektronik beruht wesentlich auf der gleichzeitigen Herstellung von sehr vielen Bauelementen auf einem Silizium-Wafer. Parallele Her-

stellungsmethoden sind daher auch eine unabdingbare Voraussetzung für Bauelemente aus Kohlenstoff-Nanoröhrchen. Serielle Methoden, wie sie häufig in der Laborpraxis zum Einsatz kommen (etwa die Manipulation von Nanotubes mit dem Rasterkraftmikroskop) sind in einem Technologie-Szenario nicht erlaubt.

Für die Abscheidung aus der Flüssigphase bedeutet das, dass man eine definierte Anzahl von Röhrchen mit gleicher Länge, Durchmesser und elektrischen Eigenschaften in ein lithographisch definiertes Fenster platzieren muss (Abb. 5). Danach werden Source-, Drain- und Gate-Kontakte aufgebracht. Der gesamte Vorgang wird technologisch noch nicht beherrscht. Daneben muss, zumindest für die Anwendung in einem Transistor, ein „Abstandshalter“ eingebaut werden, der den Durchgriff des Gate-Feldes ermöglicht. Solche Techniken sind in Ansätzen vorhanden, allerdings ist es noch nicht gelungen, einen Transistor mit einer definierten Anzahl von gleichwertigen Nanoröhrchen, wie in Abb. 5 schematisch gezeigt, herzustellen.

Wendet man die *in situ*-CCVD-Abscheidung an, so lässt sich über die Strukturierung der Katalysator-Schicht mittels Photolithographie ein selektives Wachstum von senkrecht stehenden Nanotubes erreichen. Damit kann man Block-Strukturen erzeugen, die aus vielen individuellen, sich gegenseitig stabilisierenden

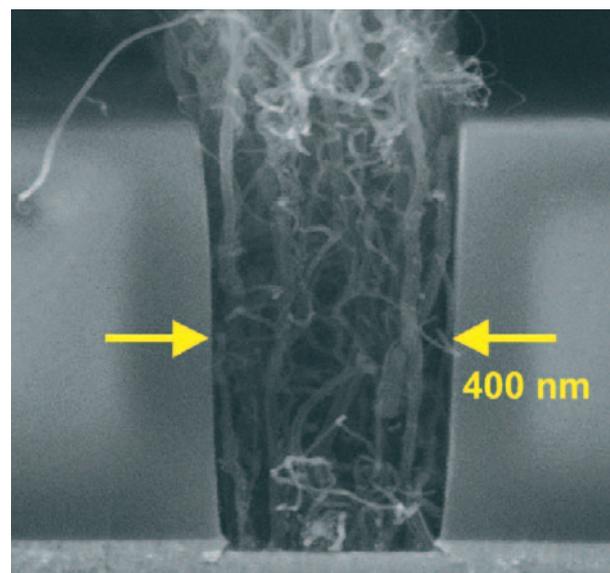


Abb. 7: Ein Anwendungsbeispiel aus der Mikroelektronik: Kohlenstoff-Nanoröhrchen werden als Verbindung (Via) zwischen zwei metallischen Leitern eingesetzt. (vgl. Text)

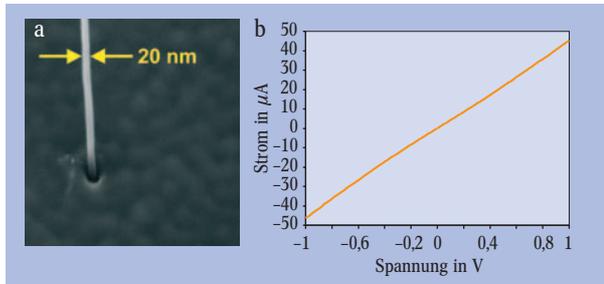


Abb. 8: Geführtes Wachstum eines mehrwandigen Nanoröhrchens in einem durch lithographische Methoden hergestellten Nano-Loch in SiO₂ (a). Der Durchmesser des Röhrchens passt sich dem Lochdurchmesser an. Durch die immer vorhandenen metallischen Schalen lässt sich Strom schicken (b). Die Kennlinie zeigt einen wahrscheinlich durch Kontaktwiderstände verursachten nicht ganz linearen Zusammenhang zwischen Strom und Spannung.

Röhrchen bestehen (Abb. 6). Im vorliegenden Fall wurden mehrwandige Nanoröhrchen erzeugt, bei denen jede individuelle Schale unabhängig konfiguriert ist und bei geeigneter Kontaktwahl zum Stromtransport beitragen kann. Allerdings erwartet man bei statistischer Verteilung der Nanotube-Modifikationen, dass nur etwa ein Drittel der individuellen Schalen metallisches Verhalten zeigt.

Leiterbahnen

Eine erste praktische Anwendung dieser Technik sind vertikale Verbindungen zwischen zwei Leiterbahnen (Vias) aus Carbon Nanotubes. In diesem Fall verwendet man mehrwandige Röhrchen, um die statistisch immer vorhandenen metallischen Schalen für die Stromleitung auszunutzen. Abbildung 7 zeigt einen Querschnitt durch ein solches Via, der beweist, dass das geführte selektive Wachstum auf einer unteren metallischen Elektrode in einem engen Loch in einer isolierenden Schicht möglich ist. Fügt man die in Abb. 7 nicht gezeigte obere Elektrode hinzu und misst den Widerstand, so erhält man eine Ohmsche Kennlinie. Der individuelle Widerstand eines Röhrchens befindet sich mit ca. 10 k Ω in einem technologisch nutzbaren Bereich. In der bestehenden Mikroelektronik-Technologie bestehen solche Vias aus Kupfer. Durch die darin auftretenden hohen Stromdichten und inhomogenen Stromverteilungen sind Vias die häufigsten Ausfallstellen, da Löcher aufgrund von elektroneninduziertem Materialtransport (Elektromigration) entstehen. Von Carbon Nanotubes erwartet man einen erheblich größeren Widerstand gegen Elektromigration und damit weniger Ausfälle. Ein weiterer Vorteil wird sichtbar, wenn man an die Verkleinerung der Leiterbahnen und Vias denkt. Da sich mehrwandige Röhrchen bis zu Durchmessern von 5–100 nm herstellen lassen, sind Vias denkbar, die nur noch aus einem einzigen, vielwandigen Röhrchen bestehen. Abbildung 8a zeigt ein solches einzelnes Nanoröhrchen mit einem Außendurchmesser von 20 nm, Abb. 8b die zugehörige elektrische Kennlinie, die aufgrund von Kontaktwiderständen ein noch nicht vollständig ohmsches Verhalten zeigt.

Der Einsatz von mehrwandigen Röhrchen in Vias setzt keine strenge Auswahl von metallischen Tubes voraus, da automatisch ausreichend metallische Röhrchen vorhanden sind und die halbleitenden Röhrchen nicht nennenswert zum Transport beitragen. Mit den zu Verfügung stehenden Abscheidungsverfahren erscheint es deswegen möglich, in wenigen Jahren zu einer Ver-

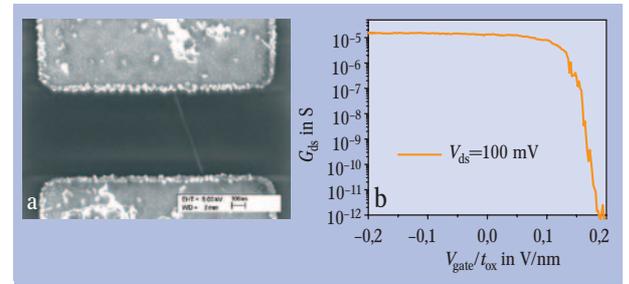


Abb. 9: Der planare Feld-Effekt-Transistor besteht aus einem einzelnen einwandigen, halbleitenden Nanoröhrchen zwischen zwei Kontakten (a). Über eine isolierende SiO₂-Schicht wird an die (nicht sichtbare) Gate-Elektrode von unten ein elektrisches Feld angelegt. Mithilfe der Gate-Spannung lässt sich die Leitfähigkeit G_{ds} zwischen den Kontakten über mehr als sechs Größenordnungen ändern (b).

besserung der bestehenden Technologie beitragen zu können, ohne grundsätzliche Veränderungen in der Prozessführung vornehmen zu müssen. Der Einsatz von Kohlenstoff-Nanoröhrchen auch für laterale Verbindungen wäre sehr wünschenswert, da die immer weitere Verkleinerung der Leiterbahnbreiten zu einem zunehmenden Einfluss der Streuung von Ladungsträgern an inneren und äußeren Grenzflächen und damit zu einer Erhöhung des spezifischen Widerstandes führt [8]. Allerdings ist gegenwärtig noch kein Verfahren in Sicht, mit dem sich laterale Verbindungen mit Nanotubes in einer mit der Mikroelektronik-Technologie vereinbaren Weise realisieren lassen.

Transistoren

Die Leitfähigkeit von halbleitenden einwandigen Kohlenstoff-Nanoröhrchen lässt sich durch ein äußeres elektrisches Feld steuern [9]. Abbildung 9a zeigt ein halbleitendes Röhrchen, das mit dem CCVD-Verfahren zwischen zwei metallischen Kontakten gewachsen wurde. Die Dichte der Katalysatorpartikel wird dabei so eingestellt, dass die Wahrscheinlichkeit von mehrfachen CNT-Brücken und damit die Anwesenheit

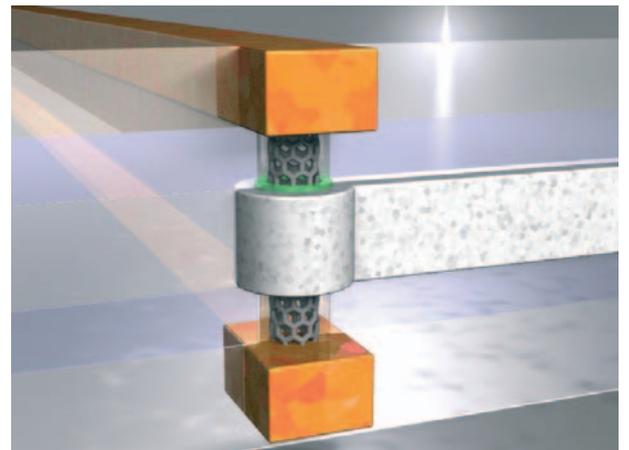


Abb. 10: Konzept des vertikalen CNTFETs (VCNTFET). Eingebettet in dielektrische Schichten sind Source- und Drain-Elektrode, Nanotube und eine ringförmige Gate-Elektrode, die über ein Dielektrikum (grün) isoliert ist. Dieses Bauelement hat bei optimaler Gate-Geometrie nur wenige nm² Grundfläche. Die Lage und Länge des Gates ist nicht mehr lithographisch definiert, sondern durch die viel genauer einstellbare Schichtdicke der individuellen Schichten. Das Konzept benutzt Verfahren, die – bis auf das Wachstum der Nanoröhrchen – heute bereits in der Mikroelektronik eingesetzt werden.

von metallischen Tubes nicht zu groß ist. Die Gate-Elektrode ist durch ein Dielektrikum von dem Röhren getrennt und großflächig unter der Anordnung angebracht (Back-Gate-Geometrie). Wie aus Abb. 9b ersichtlich, lässt sich dieser CNTFET durch die Gate-Spannung über mehr als sechs Dekaden abschalten, wobei die maximale Leitfähigkeit von $19 \mu\text{S}$ bereits einem Achtel der maximal möglichen Leitfähigkeit für eine Nanotube entspricht [9]. Dieses Ergebnis zeigt die grundsätzliche Eignung für Schaltelemente. Ein syste-

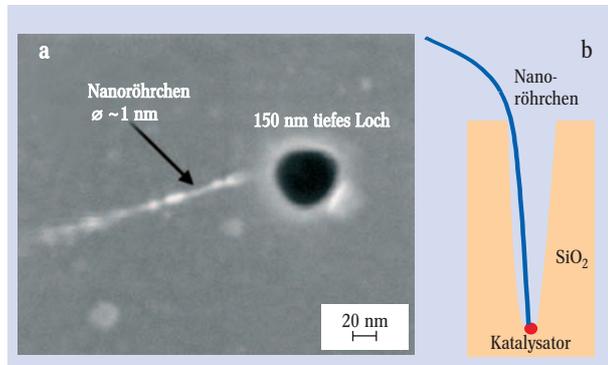


Abb. 11: Elektronenmikroskopische Aufnahme eines einzelnen einwandigen Nanoröhrchens mit einem Durchmesser von etwa 1 nm, das aus einem Loch heraus gewachsen ist (a). Die Unschärfe entstand durch Vibrationen im Elektronenstrahl des Rasterelektronenmikroskops. Das Schema (b) zeigt die Lage des Nanotubes und des Katalysators im Schnitt. Der Prozess stellt eine Vorstufe für die Entwicklung des vertikalen CNTFETs dar.

matischer Vergleich der besten Resultate für CNTFETs und Si-Transistoren ergibt sogar eine Überlegenheit der CNTFETs in fast allen wichtigen Parametern [10]. Allerdings zeigt Abb. 9a auch den Stand der Technik. Weder gelingt es bisher, einzelne halbleitende Nanoröhrchen mit definiertem Durchmesser reproduzierbar zwischen zwei Elektroden zu platzieren, noch eine definierte Anzahl von parallel liegenden Röhren mit konstantem Abstand und identischen Eigenschaften abzuschneiden – eine unabdingbare Voraussetzung für einen technologischen Einsatz.

Das Konzept des vertikalen CNTFET

Wenn man die Vorteile des kontrollierten vertikalen Wachstums von einzelnen Nanoröhrchen in Nanolöchern (Abb. 8a) mit der Steuerung der Leitfähigkeit über eine Gate-Elektrode verbindet, erhält man das Konzept eines Vertikal-Transistors (VCNTFET) wie in Abb. 10 skizziert [10]. Dazu benötigt man ein einwandiges, halbleitendes Nanoröhrchen mit einem Durchmesser von ca. 1 nm, um mit der Energielücke im interessanten Bereich von ca. 1 eV zu liegen. Die Herstellung von Nanolöchern mit derart geringen Durchmessern in einer reproduzierbaren Weise ist extrem schwierig. Abbildung 11a zeigt das erfolgreiche Wachstum eines einwandigen Nanoröhrchens aus einem, allerdings noch viel zu weiten, Nanoloch heraus. Wahrscheinlich war durch die Verjüngung des Loches am Boden die Ausbildung eines, verglichen mit dem Lochdurchmesser wesentlich kleineren, Katalysatorpartikels möglich, wie schematisch in Abb. 11b angedeutet. In großtechnischem Maßstab realisiert, hätte dieser Prozess einige Vorteile zu bieten: Der vertikale CNTFET hat eine minimale Grundfläche, die wenig mehr als der Durchmesser der Nanotube sein kann.

Die Gate-Elektrode umschließt das Röhren ringförmig und gestattet den besten Durchgriff des Gate-Felds. Die Abstände zwischen Gate und Elektroden und die Gate-Weite sind nicht mehr durch minimale lithografische Maße gegeben, sondern durch die Wahl der Schichtdicke einzelner Schichten bestimmt.

Schließlich lassen sich beliebig viele solcher Module zu größeren Einheiten gruppieren, wie schematisch in Abb. 12 gezeigt. Durch die Wahlfreiheit des Ortes ist man außerdem nicht mehr an eine bestimmte Ebene gebunden, sondern kann, anders als in der Silizium-Technologie, mehrere Ebenen übereinander legen, um dreidimensionale Strukturen zu erzeugen. Während dieses viel versprechende Konzept bisher noch nicht vollständig realisiert werden konnte, gibt es einen anderen Ansatz, der von den momentanen Möglichkeiten der CNT-Herstellung ausgeht, und unter Aufgabe der Integrationsfähigkeit ein Einzelbauelement mit bereits respektablen Daten zur Verfügung stellt.

Der Power-CNTFET

Da bei der Abscheidung von Nanoröhrchen mit dem CCVD-Verfahren bisher immer sowohl halbleitende als auch metallische Röhren entstehen, kann man versuchen, die metallischen Röhren zwischen Source- und Drain-Elektrode eines Transistors durch einen hohen Source-Drain-Strom „abzubrennen“. Das übrig bleibende Gemisch hat durch die hohe Stromdichte an einzelnen halbleitenden Röhren dann genügend Treiberfähigkeit, um makroskopische Lasten zu steuern. Mit einem Transistor-Labormuster dieser Art gelang es bereits, einige Milliampere Strom mit einem Schaltverhältnis von bis zu 1000 zu schalten (Abb. 13). Dies genügt, um z.B. Leuchtdioden oder kleine Elektromotoren anzutreiben. Durch Faltung des Gate-Bereiches können mit dieser Anordnung noch höherer Ströme erreicht werden und – wie erste Abschätzungen zeigen – Polymertransistoren und sogar Silizium-basierte Power-FETs übertroffen werden. Der Herstellungsprozess für diese „Low-End-Transistoren“ ist extrem einfach und damit kostengünstig. Da man nicht mehr an einkristalline Silizium-Wafer gebunden ist, kommen vor allem großflächige Displays als Anwendung infrage.

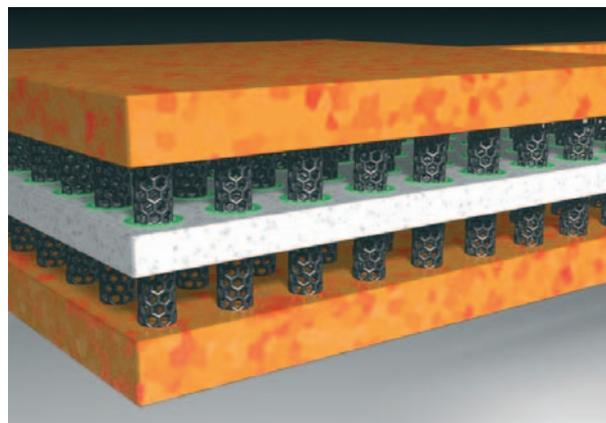


Abb. 12: Das VCNTFET-Konzept ermöglicht zweidimensionale Strukturen aus vielen zusammengesetzten Transistoren zur Anpassung an die gewünschte Ausgangsleistung. Wenn die Abstände der einzelnen Transistoren in der Größenordnung des Durchmessers liegen sollen, müssen selbstjustierende, sublithographische Methoden zur Strukturierung eingesetzt werden.

Zusammenfassung und Ausblick

Kohlenstoff-Nanoröhrchen haben einige für Anwendungen in der Mikroelektronik sehr interessante Eigenschaften. Sowohl für Leiterbahnen als auch für Transistoren sind Anwendungen denkbar. Beschränkt man sich auf eine Technologie, die in ihren Grundzügen der heutigen Silizium-Technologie ähnelt, müssen jedoch noch wesentliche technologische Herausforderungen gemeistert werden. So ist es bisher noch nicht

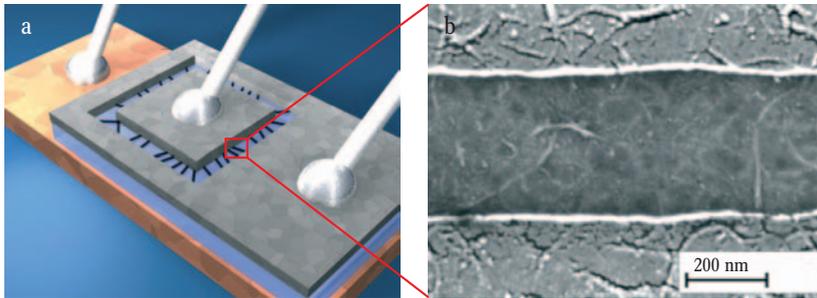


Abb. 13: Schematische Darstellung eines Power CNTFETs (a). Die elektronenmikroskopische Vergrößerung des „Kanalbereichs“ (b) zeigt eine statistische Ansammlung von Nanotubes. Nach dem Abbrennen

der metallischen tragen die halbleitenden Röhrchen den Strom, der durch die nicht sichtbare (Back-) Gate-Elektrode gesteuert wird.

gelingen, Nanoröhrchen mit vorher genau bestimmten Eigenschaften reproduzierbar an einem vorbestimmten Ort mit einem parallelen Verfahren abzuscheiden. Zwar existieren bereits Abscheidungsverfahren, die Ausbeuten für halbleitende Röhrchen von deutlich mehr als die statistisch zu erwartenden 66 % ergeben; für Mikroelektronik-Anwendungen sind Ausbeuten bis nahe 100 % jedoch obligatorisch. Für die Lösung dieses Problems haben wir das Konzept eines vertikalen Transistors vorgestellt, mit dem sich auch dreidimensionale Strukturen mit den Mitteln der heutigen Technologie realisieren ließen.

Mit den bereits vorhandenen Herstellungsverfahren lassen sich jedoch auch schon sinnvolle Anwendungen definieren. Für die Beseitigung von Elektromigrations-Erscheinungen in Vias können mehrwandige Nanoröhrchen zum Einsatz kommen und bis in die Dimension von wenigen Nanometern skaliert werden. Verzichtet man auf Integration, so lassen sich mit den heute zur Verfügung stehenden Methoden Power-CNTFETs herstellen, die in kostengünstigen Displays zum Einsatz kommen können.

Die Anwendungen von Kohlenstoff-Nanoröhrchen stecken noch in den Kinderschuhen. Die gegenwärtige Bestandsaufnahme ist also nur ein Schnappschuss in einer immer noch stürmisch verlaufenden Entwicklung. Da sich die Mikroelektronik – dem Gesetz von Moore folgend – ohnehin in die Dimensionen der Nanotechnologie hinein entwickelt, lernt sie mit Nanostrukturen und Selbstorganisation umzugehen und sie in die vertraute Technologie zu integrieren. Anders als in der Silizium-Technologie möglich, kann die Erschließung der dritten Dimension zudem der extrem kostenaufwändigen Entwicklung neuer Lithographie-Belichtungsgeräte entgegenwirken. Kohlenstoff-Nanoröhrchen sind also nicht nur die potenziell besseren Bauelemente, sie eignen sich auch hervorragend als „Sparringspartner“ der Mikroelektronik auf dem Weg in die Nanoelektronik.

Danksagung

Die hier gezeigten Ergebnisse sind das Resultat einer Teamarbeit der CNT-Gruppe in den Forschungslabors der Infineon Technologies Corporate Research (CPR). Die Autoren verstehen sich als Berichterstatter und möchten ausdrücklich auf die hervorragenden Beiträge aller Beteiligten, namentlich von Georg Duesberg, Andrew Graham, Maik Liebau, Werner Pamler, Robert Seidel und Eugen Unger hinweisen. Außerdem besteht eine fruchtbare Kooperation mit der Gruppe von S. Roth am MPI für Festkörperforschung in Stuttgart. Teile der Ergebnisse entstammen dem Fördervorhaben Nr. 13N8402 des BMBF, dessen Unterstützung wir hervorheben möchten.

Literatur

- [1] S. Iijima, *Nature* **354**, 56 (1991)
- [2] R. Saito, G. Dresselhaus und M. S. Dresselhaus, *Physical Properties of Carbon Nanotubes*, Imperial College Press (1998)
- [3] B. Q. Wei, R. Vajtai und P. M. Ajayan, *Appl. Phys. Lett.*, **79** (8), 1172 (2001)
- [4] C. Journet et al., *Nature* **388**, 756 (1997)
- [5] A. Thess et al., *Science* **273**, 483 (1996)
- [6] R. Krupke et al., *Science* **301**, 344 (2003)
- [7] J. Kong et al., *Nature* **395**, 878 (1998)
- [8] W. Steinhögl et al., *Phys. Rev. B* **66**, 075414 (2002)
- [9] R. Seidel et al., *Nano Letters* **3**, 965-698 (2003)
- [10] W. Hönlein et al., *Materials Science & Engineering C* **23**, 663-669 (2003)

Die Autoren

Wolfgang Hönlein studierte Physik an der Universität Würzburg. Er promovierte in Würzburg und am Max-Planck-Institut für Festkörperforschung Stuttgart über Elektron-Phonon-Wechselwirkung in MOSFETs (Prof. Landwehr, Prof. v. Klitzing). 1983 trat er in die Siemens AG ein, wo er am MEGA-Projekt zur Entwicklung eines 1- und 4-Megabit-DRAM-Speichers mitarbeitete. Hönlein leitete diverse Projekte zur Entwicklung neuer Verfahren und Speicherkonzepte. Seit 1999 ist er Leiter der Abteilung „Nanoprozesse“ in der Corporate Research der Infineon Technologies AG.



Franz Kreupl studierte Physik in Regensburg, wo er auch promovierte. Er arbeitet als Senior Staff Scientist in der Abteilung „Nanoprozesse“ bei Infineons Corporate Research und ist dort Projektleiter für die Arbeiten an Carbon Nanotubes. Zuvor entwickelte er bei Siemens ZT verschiedene Einzelprozesse für ferroelektrische und magnetoresistive Speicher sowie für Kupfer-Chipverdrahtungssysteme.