Zeitschrift: Bulletin Electrosuisse
Herausgeber: Electrosuisse, Verband für Elektro-, Energie- und Informationstechnik
Band: 101 (2010)
Heft: 9: 100 Jahre Diskurs zur schweizerischen Energiepolitik = 100 ans de discussion sur la politique énergétique suisse

Artikel: Nanotechnologie in der Elektronik
Autor: Grossmann, Günter / Schönenberger, Christian
DOI: https://doi.org/10.5169/seals-856127

Nutzungsbedingungen
Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

Conditions d'utilisation
L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

Terms of use
The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 11.07.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, https://www.e-periodica.ch

VISION **NANOTECHNOLOGIE**

Nanotechnologie in der Elektronik

Miniaturisierung führt zu quantenphysikalischen Effekten

Bei der Miniaturisierung von elektronischen Systemen kommen nicht nur neue Technologien zum Einsatz, sondern das Verhalten der Elektronik ändert sich – quantenphysikalische Effekte machen sich bemerkbar, wenn die Strukturen eine gewisse Grösse unterschreiten. Was in der heutigen Elektronik – noch weitgehend nach klassischen Prinzipien funktionierend – als störend empfunden wird, kann auch als Chance betrachtet werden: Quantencomputer könnten neue Perspektiven eröffnen.

Günter Grossmann, Christian Schönenberger

Die Nanotechnologie ist seit Langem in aller Munde. Für uns Menschen ist ein Nanometer, der millionste Teil eines Millimeters oder ein Tausendstelmikrometer, aber eher ein abstrakter Begriff als eine vorstellbare Grösse. Zur Illustration sollen hier einige Vergleiche gezogen werden:

Ein menschliches Haar hat einen Durchmesser von 120 nm, ein Virus hat einen Durchmesser von 25 bis 100 nm. Vor allem im molekularen und atomaren Bereich trifft man in der Natur auf Strukturen im Bereich von Nanometern. Die Doppelhelix der DNA hat einen Durchmesser von 2 bis 0,5 nm, und Atomabstände bewegen sich im Bereich von 0,1 nm (Bild 1).

Entsprechend der Tatsache, dass nanometergrosse Strukturen in der Natur weit ausserhalb unseres Erfahrungsbereichs auftreten, zählt die Nanotechnologie zu den exotischen Bereichen der Technologie. Es ist allerdings so, dass sich der Mensch technologisch bereits im Mikro- und Nanobereich bewegt und entsprechende Strukturen routinemässig herstellt. Dabei ist nicht von Nanorobots die Rede, die in unserem Körper herumschwimmen und dabei Arbeiten verrichten, sondern von Anwendungen, die grosstechnisch hergestellt werden. Die Grenze zwischen Mikrotechnologie und Nanotechnologie ist unscharf, denn die Nanowelt bedarf einer Verbindung zu unserer Makrowelt, und das geht nur über Strukturen im Mikrometerbereich. Daher hat ein Gebilde, das funktional relevante Strukturen in sich trägt, die unter 100 nm messen, durchaus Abmessungen von einigen Mikrometern. Dieser Massstab ist in der Elektronikfertigung bereits Alltag.

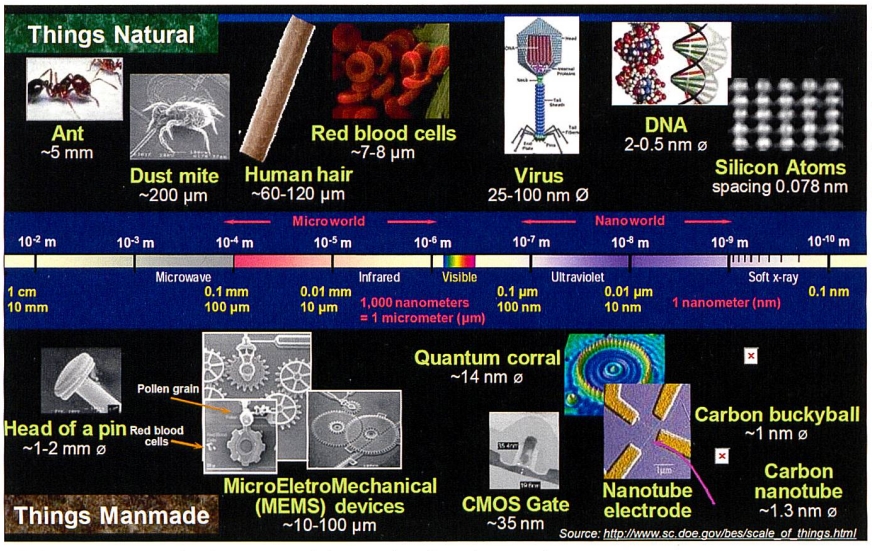


Bild 1 Grössenvergleich von natürlichen und technischen Strukturen.

Beispiele kleinster Komponenten

Die kleinsten elektronischen Komponenten, die in der Industrie maschinell bestückt werden, beispielsweise Chipwiderstände 01005 (Bild 2), haben Abmessungen von 400 × 200 µm mit einer Dicke von 130 µm. Die internen Strukturen und die zur Verbindungstechnik relevanten Strukturen sind im Bereich von einigen 100 nm gross.

Halbleiter, die nackt auf Leiterplatten aufgelötet werden, haben ein Anschlussraster von 25 µm, allerdings sind im Halbleiter Transistorenstrukturen, die unter 50 nm breit sind, Standard, und die zugehörigen Isolationsschichten sind dünner als 5 nm.

Die magnetisierbaren Oberflächen von kommerziellen Harddiscs sind aus 10 nm grossen Partikeln aufgebaut, wobei die magnetisierten Zonen ca. 50 nm breit sind.

Selbst Nanoröhrchen mit einem Durchmesser von ca. 1,3 nm sind kein exotisches Produkt mehr. Sie sind kommerziell erhältlich mit einer maximalen Gebindegrösse von 1 kg.

Herstellung von Nanostrukturen

In der Nanostrukturierung kommen häufig Verfahren zur Anwendung, die in der Halbleitertechnologie gängig sind. Dabei wird auf ein Substrat eine Maske aufgebracht, die eine lokale Schutzfunktion für einen nachfolgenden Ätzprozess übernimmt. Die Strukturierung der Maske erfolgt über Fotolithografie, Röntgenlithografie oder Elektronenstrahlstrukturierung. Nach der Strukturierung der Masken wird das Substrat mithilfe eines Plasmas oder chemisch geätzt. Durch abwechselndes Abscheiden von Schichten und Ätzen können so dreidimensionale Strukturen hergestellt werden. So ist die Herstellung solcher Nanostrukturen grosstechnisch und kostengünstig möglich. Zum Beispiel die bereits erwähnten Schaltkreise auf Halbleitern, die in mehreren Schichten aus der Gasphase abgeschieden und freigeätzt wer-

electrosuisse VSE AES

VISION **NANOTECHNOLOGIE**

Bild 2 In der Elektronikfertigung gebräuchliche Komponenten.

den und so ein dreidimensionales Geflecht aus Leiterbahnen und Komponenten darstellen.

Selbstorganisierende Moleküle

Neben dieser bekannten Technologie können Nanostrukturen auch mit der Hilfe von selbstorganisierenden Molekülen hergestellt werden. Dabei wird die Tatsche ausgenutzt, dass einige Moleküle in dünnen Schichten geordnete Strukturen bilden oder dass sich Lösungen und Dispersionen beim Trocknen entmischen und einen strukturierten Film bilden. Diese Strukturen können einerseits als Ätzmasken verwendet werden oder dienen als Keime, um Nanostrukturen gezielt wachsen zu lassen.

Quantenphysikalische Effekte als Hürden

Diese Technologien bilden die Werkzeuge, um Strukturen im Bereich einiger Nanometer grosstechnisch kontrolliert herzustellen. Damit wären im Prinzip die Türen zur Nanoelektronik weit aufgestossen.

Leider funktioniert die Welt im Nanomassstab nicht ganz so, wie wir es uns gewohnt sind, was zu gewöhnlicherweise schwer nachzuvollziehenden Effekten führt. Zum Beispiel laufen Diffusionsprozesse sehr schnell ab und führen zu lokal ständig ändernden Konzentrationen von Dotierungen. Oder physikalische Grössen, wie der Schmelzpunkt oder der spezifische Widerstand von Materialien, ändern sich mit der geometrischen Ausdehnung.

Quantenphysikalische Effekte haben oft bizarre Konsequenzen. Wie das Unschärfeprinzip, das bewirkt, dass die Reihenfolge einer Messung das Resultat beeinflusst und bei immer genauerer Bestimmung eines Merkmals die erreichbare Genauigkeit zur Bestimmung eines anderen Merkmals an derselben Probe geringer wird. Das kann anhand eines Gedankenexperiments, das Heissenberg vorgeschlagen hat, erläutert werden: Angenommen, es wäre möglich, ein sehr kleines Teil unter einem Lichtmikroskop zu beobachten, so würde, je stärker die Vergrösserung eingestellt wird, zwar die Auflösung steigen und mehr Details sichtbar werden, gleichzeitig würde aber die stärker werdende Flut von Photonen das Teilchen stärker anregen, sodass sein Ort immer weniger genau definiert werden kann.

Relativistisch betrachtet kann also bei einer Geschwindigkeitskontrolle getrost darauf verzichtet werden, die Ordnungsstrafe zu begleichen, da ja der genaue Ort des gemessenen Merkmals bekannt ist und somit die Geschwindigkeit nicht mehr bestimmt werden kann. Ob das Verständnis der Heissenberg'schen Unschärferelation bei den entsprechenden Behörden in ausreichendem Masse vorhanden ist, um dieser Argumentation zu folgen bzw. um diese entkräften zu können, kann allerdings nicht mit Sicherheit gesagt werden.

Ein weiterer quantenphysikaliser Effekt ist die Quantenverschränkung, in der Teilchen, die in einer Beziehung zueinander stehen, auch nach räumlicher Trennung noch als Einheit betrachtet werden müssen.

Damit verbunden ist das Phänomen, dass die Durchführung von Messungen an einem Ort die Messergebnisse an einem anderen Ort beeinflusst. Zum Beispiel haben Elektronen eine quantenphysikalische Eigenschaft, das magnetische Moment. Sozusagen eine quantenmechanische Kompassnadel, die Spin genannt wird.

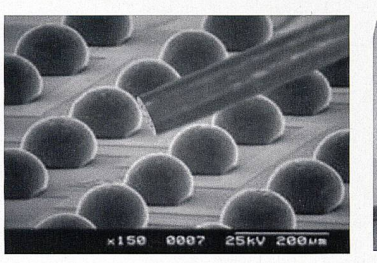
Wird dieser Spin gemessen, so nimmt er nur zwei Zustände an, Spin up und Spin down. Wird das Elektron nicht beobachtet, so kann es auch einen Zwischenzustand einnehmen, der eine Überlagerung der beiden Zustände darstellt. Es ist

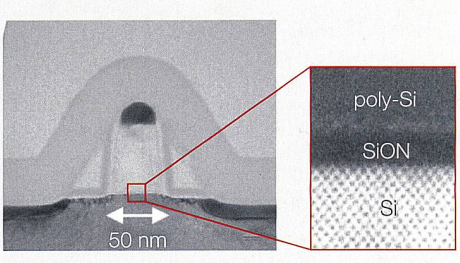
Résumé

La nanotechnologie en électronique

La miniaturisation entraîne l'apparition d'effets quantiques

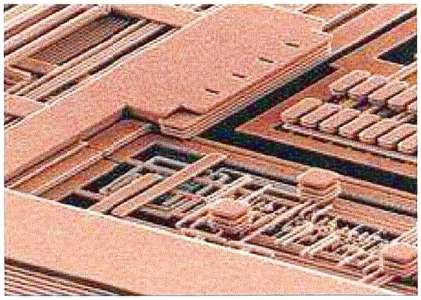
Dès que la taille des structures devient inférieure à une certaine grandeur lors de la miniaturisation de systèmes électroniques, le comportement de l'électronique se modifie : des effets quantiques apparaissent. Ce qui est ressenti comme gênant dans l'électronique actuelle peut également être considéré comme une chance. Il existe différents domaines, dans lesquels l'utilisation de la nanotechnologie est possible, voire déjà réalisée : en nano-optique, en spintronique (exploitation du spin des électrons comme support d'information), de même que dans les processeurs quantiques pour le codage des données. Des ordinateurs quantiques pourraient eux aussi offrir bientôt de nouvelles perspectives. No





Empa

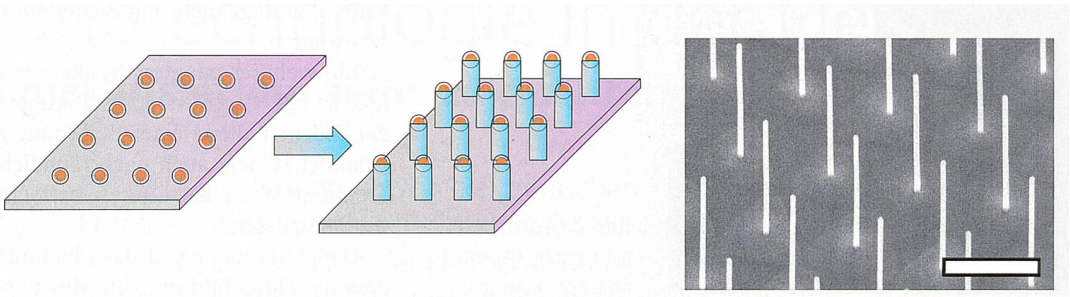
Bild 3 Anschlusskugeln eines Nacktchips mit einem Haar (links) und Transistorzelle in einem Halbleiter (rechts).



P. Seitler IBM Zurich Research Laboratory

Bild 4 3-dimensionale Struktur eines Halbleiters.

VISION **NANOTECHNOLOGIE**



P. Seitler, IBM Zurich Research Laboratory

Bild 5 Kontrolliertes Wachstum von Nanodrähten.

jetzt möglich, Elektronen zu erzeugen, die paarweise entgegengesetzten Spin haben, sie sind verschränkt. Auch diese beiden Elektronen haben, wenn sie nicht beobachtet werden, einen überlagerten Zustand von Spin up und Spin down. Werden diese beiden Elektronen räumlich getrennt, so wird die Messung des Spins des einen Elektrons instantan den Spin des anderen Elektrons festlegen.

Eine weitere Verkleinerung der Strukturen in der Elektronik führt auch dazu, dass von einem kontinuierlichen elektrischen Strom nicht mehr gesprochen werden kann, sondern die Elektronen müssen als individuelle Teilchen mit einer quantisierten Ladung und Aufenthaltswahrscheinlichkeit aufgefasst werden.

In der heutigen Elektronik, die noch weitgehend nach klassischen Prinzipien funktioniert, sind solche Effekte störend. Als reales Problem führt die Wellennatur des Elektrons dazu, dass eine gewisse Wahrscheinlichkeit besteht, dass ein Elektron einen Isolator durchdringen kann, wenn er dünn genug ist. Der daraus resultierende Tunnelstrom führt zu unerwünschten Verlusten in Transistoren und Speicherzellen.

Zukunft der Quantenelektronik

Viele quantenphysikalische Effekte werden aber unterdessen als Chance gesehen, indem die klassische Betrachtungsweise quantenphysikalisch ergänzt wird. Dadurch werden Quanteneffekte in der Zukunft eine immer grössere Rolle spielen.

Der Umstand, dass Elektronen auch Wellencharakter haben, führt dazu, dass die Energie der Elektronen auch von räumlicher Begrenzung abhängig ist. Durch eine reine Kontrolle der Geometrie auf der Nanometerskala können Quantenspeicher definiert werden. Der Effekt spielt bereits heute in der Nanooptik eine grosse Rolle, denn durch eine blosse Änderung des Durchmessers von halbleitenden Nanopartikeln lässt sich die Farbe einstellen, mit der das Partikel fluoresziert.

Einzelne Elektronen lassen sich über die Ladung manipulieren. So ist es heute im Labor bereits möglich, Ströme durch Zählen der vorbeifliessenden Elektronen zu messen.

Ein weiterer Schritt wird in der sogenannten Spin-Elektronik gemacht (englisch: spintronics). Hier verwendet man das magnetische Moment des Elektrons, den Spin, als Informationsträger zusätzlich zur Ladung als Quantenbit.

Neben dem Versuch, in den nächsten Jahren einen Quantencomputer zu realisieren, werden heute bereits erfolgreich Daten mittels Quantenprozessen sicher verschlüsselt. Die Quantenelektronik ist heute praktisch schon vor unserer Haustür angekommen.

Angaben zum Autor

Dipl. Ing. FH **Günter Grossmann** ist seit 1999 Senior Engineer an der Empa Dübendorf, wo er sich mit der Leitung von wissenschaftlichen Projekten sowie der Ausfallanalyse von elektronischen Baugruppen und Komponenten befasst. Seine Hauptforschungsgebiete sind gegenwärtig Materialdegradation in der Elektronik und Materialeigenschaften bleifreier Lote.
Empa, 8600 Dübendorf,
guenter.grossmann@empa.ch

Prof. Dr. **Christian Schönenberger** Ordinarius für experimentelle Physik an der Universität Basel seit 1995 und gegenwärtig Direktor des Swiss Nanoscience Institute (SNI).
Arbeitsgebiet: Nanoelektronik mit Schwerpunkt Quantenelektronik, basierend auf Carbon Nanotubes und halbleitenden Nanodrähten und molekularen Systemen.
Departement für Physik, Universität Basel, 4056 Basel,
christian.schoenenberger@unibas.ch

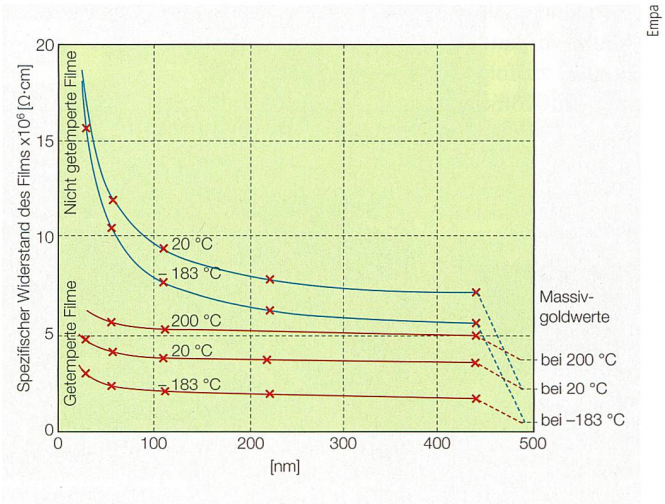


Bild 6 Spezifischer Widerstand von dünnen Filmen.

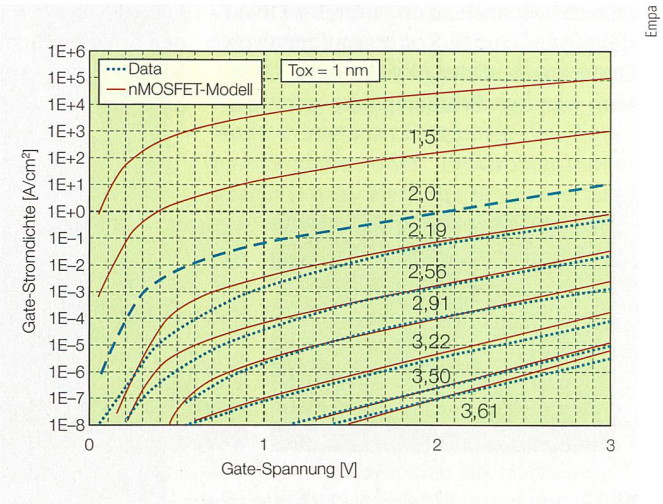


Bild 7 Leckstrom in dünnen Gateoxiden.

aqua metro

Let's talk about
smart metering

Verbraucher-Transparenz
dank zeitnah, smart erfasster Zähler!

Think smart. Solutions for your future.

Aquametro AG
Ringstrasse 75
4106 Therwil
Tel. 061 725 11 22
Fax 061 725 15 95
info@aquametro.com
www.aquametro.com