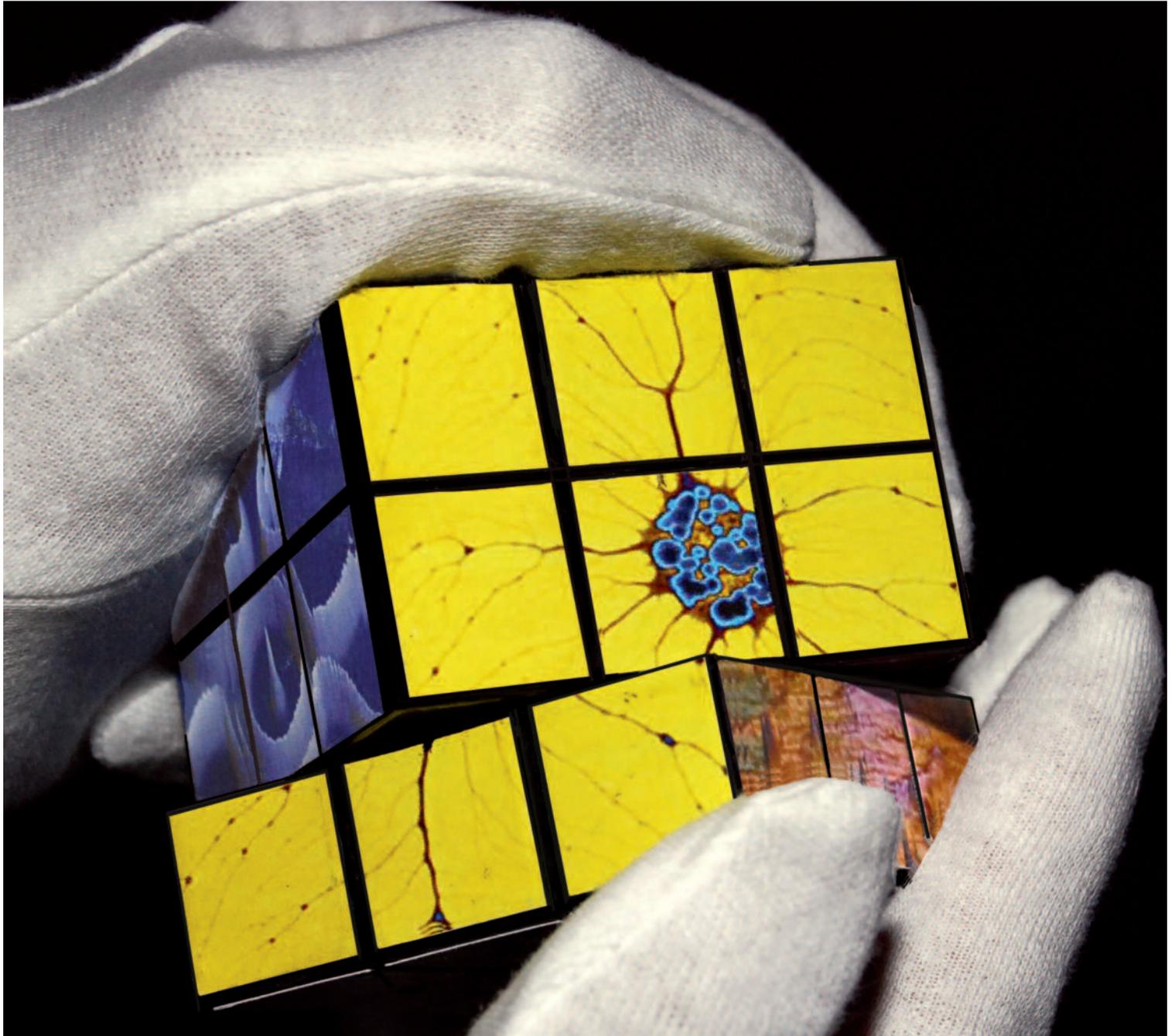


universitas

JUIN 2008 | 08

LE MAGAZINE DE L'UNIVERSITÉ DE FRIBOURG, SUISSE | DAS MAGAZIN DER UNIVERSITÄT FREIBURG, SCHWEIZ



Nanotechnologies quand tout s'imbrique !

Zukunftsträchtige
Forschung in Freiburg

Quand les nanos envahissent
notre quotidien

Ethische Grenzen der
Forschung im Nanobereich

Freie Elektronen im Dienste der Nanotechnologie

«Focussed Electron Beam Induced Processing» (FEBIP) ist eine moderne Methode, um Sensoren, elektrische Leitungen und andere Strukturen im Nanobereich zu fabrizieren. Extrem fein fokussierte Elektronenstrahlen bewirken chemische Umwandlungen.

von Michael Allan, Ivo Utke (EMPA), Patrik Hoffmann (EPFL),
Klaus Edinger (Carl Zeiss SMS GmbH)

dossier

La chimie au service des nanotechnologies

Des structures de grandeur nano – tels que des détecteurs ou des liaisons électriques – peuvent être fabriquées grâce à la méthode FEBIP. Avec ce processus, des modifications chimiques au moyen d'électrons libres sont activées, et des objets sont créés, d'une taille comprise entre cinq et 1000 nanomètres. Par la modification du trajet du rayon d'électrons, des structures tridimensionnelles peuvent être fabriquées, couche par couche, ou, si besoin, nivelées. La méthode FEBIP présente toutefois encore certains défauts. On essaie notamment d'en augmenter la résolution, la pureté et la précision. Dans ce domaine, les scientifiques suisses jouent un rôle prépondérant.

Um eine chemische Veränderung von Substanzen in Gang zu bringen, werden in der Regel die Zutaten vermischt und erwärmt. So verwandeln sich Mehl, Milch, Eier, Zucker und weitere vertraute Zutaten, gut vermischt und im Ofen erhitzt, in einen leckeren Kuchen. Ähnlich ergibt Fett, mit Lauge vermischt und erhitzt, ein neues Produkt, die Seife. Auch Licht kann eine chemische Umwandlung bewirken: die Photochemie. So wird eine spezielle Paste, von der Zahnarztassistentin mit blauem Licht bestrahlt, zu einer beständigen Zahnreparatur. Dass chemische Veränderungen auch mit freien Elektronen in Gang gebracht werden können, ist weniger bekannt – sind uns doch freie Elektronen im Gegensatz zu Wärme und Licht nicht vertraut. Vielleicht ohne es zu wissen, sind wir aber sehr wohl mit den Produkten der Elektronenstoss induzierten Chemie vertraut: Etwa 30% der Produktionsschritte einer integrierten Schaltung benutzen die Plasmatechnologie, bei der in einer elektrischen Entladung freie Elektronen hochreaktive Moleküle erzeugen, die je nach Produktionsschritt eine ganze Reihe wichtiger chemischer Schritte bewirken (Transistoren, elektrische Leiterbahnen und Isolatoren aufbauen etc.). Kein Computer und kein mobiles Telefon könnten ohne diese Technologie fabriziert werden.

Neue Methode

An dieser Stelle möchten wir eine noch neuere Technologie vorstellen, die Fabrikation von Nano-Gegenständen, die zwischen etwa 5 und 1000 Nanometern (nm) gross sind. Zum Vergleich: Man müsste 100'000 solcher Gegenstände, jeder 10 nm gross, hintereinander aufstellen, damit die Reihe 1 mm lang wird. Solche Gegenstände lassen sich mit keiner Drehbank, auch nicht mit der feinsten, welche die Uhrenindustrie zu bieten hat, auch nur annähernd fabrizieren.

Die grosse Stärke der freien Elektronen ist es,

dass sie sich zu extrem schmalen Bündeln fokussieren lassen, hinunter bis zu etwa 1 nm, viel feiner als jedes Werkzeug, sogar mehr als hundert mal schmaler als jeder Laserstrahl. Die Quellen solcher hoch aufgelösten Elektronenstrahlen wurden für die Elektronenmikroskopie entwickelt. Neu ist nun, dass man in die normalerweise völlig luftleere (evakuierte) Apparatur ein wenig Dampf einer geeigneten Vorläufersubstanz einlässt. Dieser Dampf bildet eine extrem dünne, nur ein Molekül dicke Schicht auf dem Substrat – einem Metall- oder Siliziumplättchen. Die scharf fokussierten Elektronen wandeln nun auf einer winzigen Fläche die flüchtigen Moleküle zu einer festen beständigen Substanz um. Je nach Art der Vorläufer-Moleküle kann man so einen «Kunststoff», einen Keramik ähnlichen Isolator oder ein Metall abscheiden. Durch geeignete Ablenkung des Elektronenstrahls kann man nun auf dem Substrat «schreiben» und Schicht für Schicht komplexe dreidimensionale Strukturen aufbauen. Da man in einem (modifizierten) Elektronenmikroskop arbeitet, kann anschliessend das winzige «Werk» auch betrachtet werden. Wegen der engen Fokussierung der Elektronen heisst die Technologie «Focussed Electron Beam Induced Processing» (FEBIP). «Processing» schliesst mit ein, das auch ein Vorläufer-Molekül gewählt werden kann, welches bei Elektronenstoss induzierter Zersetzung Material abtragen kann. Man kann also mit fokussierten Elektronenstrahlen lokal funktionales Material auftragen oder (Träger-) Material lokal abtragen.

Im Detail betrachtet ist die Verwirklichung dieses einfachen Prinzips sehr komplex. Intensive Forschung versucht nun, es besser zu verstehen und zu optimieren. So wird versucht, die Auflösung (die gegenwärtig etwa 30 nm, in wenigen Fällen sogar 1 nm beträgt), die Reinheit der abgeschiedenen Substanz (so ent-

Michael Allan ist assoziierter Professor am Departement für Chemie.
michael.allan@unifr.ch

hält ein abgeschiedenes Gold-Nano-Drähtchen gegenwärtig noch recht viel vom störenden Kohlenstoff) und die Präzision (z.B. die Einheitlichkeit der Dicke der Schicht) zu verbessern. Ein wesentlicher Beitrag zu dieser Forschung wird an der EMPA in Thun und an der EPFL geleistet.

Erforschung der Elektronen-Molekülprozesse

Um Aufschluss über die Mechanismen und Anregungen zur Verbesserung der im FEBIP ablaufenden molekularen Prozesse zu erhalten, ist es nützlich, die Details der durch Elektronenstoss bewirkten Prozesse in separaten Experimenten an einzelnen Molekülen zu untersuchen. Präzise Messungen solcher Prozesse und die Entwicklung der dazu benötigten Apparaturen haben in Freiburg eine lange Tradition.

Trotz des sehr «jungen Alters» findet die FEBIP-Technologie bereits wichtige kommerzielle Anwendungen. Ein Beispiel ist die Reparatur der Masken für die Halbleiterindustrie. Solche Masken, vom ultravioletten Licht durchleuchtet, dienen zur Übertragung der Muster für Transistoren, Leiterbahnen, etc., auf eine sich in der Fabrikation befindenden integrierten Schaltung. Da nun z.B. ein moderner Computer-Prozessor über 500 Millionen Transistoren enthält, gelingt es auch bei sorgfältigster Arbeit nicht, eine derart komplexe Maske völlig fehlerfrei zu fabrizieren – sie muss repariert werden. Keine einfache Aufgabe, wenn man bedenkt, dass man die Fehler zunächst unter den vielen Millionen (mit einem Metall auf einem dünnen Quarz-Plättchen gezeichneten) Mustern finden muss. Und dann muss man mit einer Präzision von 10 nm an den fehlerhaften Stellen fehlendes

Metall auftragen oder das überschüssige Metall abtragen. Diese unglaubliche Aufgabe gelingt mit der FEBIP-Technologie wie die Abb. 1 zeigt. Eine weitere wichtige Anwendung der FEBIP-Technologie besteht im Fertigen kleiner Apparate und Sensoren. Da die Strukturen direkt «geschrieben» werden können – es wird also keine Maske benötigt – besitzt man eine extrem grosse Flexibilität in Form (steuerbar durch die Elektronenstrahllenkung) und Material (wählbar durch Art der Vorläufermoleküle) der Strukturen. Ein Beispiel in Abb. 2 zeigt einen magnetischen Sensor, der in Form eines Kreuzes vier bereits vorhandene Gold-elektroden verbindet. Je kleiner nun dieser Sensor abgeschieden werden kann, desto sensitiver ist er gegenüber kleinen lokalisierten Magnetfeldern, z.B. von magnetischen Kügelchen, die zur Zeit intensiv im Bereich der Biologie zur Detektion bestimmter Moleküle erforscht werden. Abb. 3 zeigt, dass es mit FEBIP gelang, Gold-Nano-Drähtchen an einem einzigen einwandigen Kohlenstoff-Nanoröhrchen («carbon nanotube»), anzuschliessen. Dies erlaubt, die Leitung von elektrischen Strom durch eindimensionale Strukturen mit nur molekularem Durchmesser zu untersuchen. Abb. 4 zeigt mit FEBIP fabrizierte «Ringmauern», deren Dimensionen der Wellenlänge vom Licht ähnlich sind, und die imstande sind, Licht in ihrem Zentrum zu fokussieren.

Starke Schweizer

Die starke Stellung, die die Schweiz in der Entwicklung dieser zukunftssträchtigen Technologie einnimmt, kommt auch durch die Tatsache zum Ausdruck, dass die Organisation des zweijährlichen internationalen Symposiums in diesem Jahr einem der Autoren

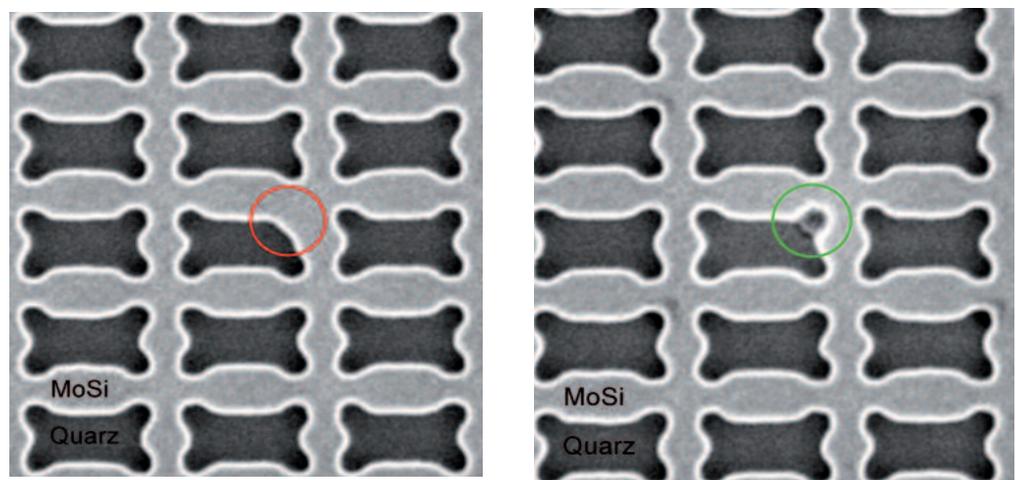


Abb. 1: Links: Elektronenmikroskopisches Bild einer schadhaften Maske. Rechts: Lokales Abtragen durch Elektronenstoss induzierte Chemie der Molybdänsilizid (MoSi) Metallschicht. Der abgetragene Bereich hat eine laterale Ausdehnung von nur 50 nm. (Carl Zeiss SMS)

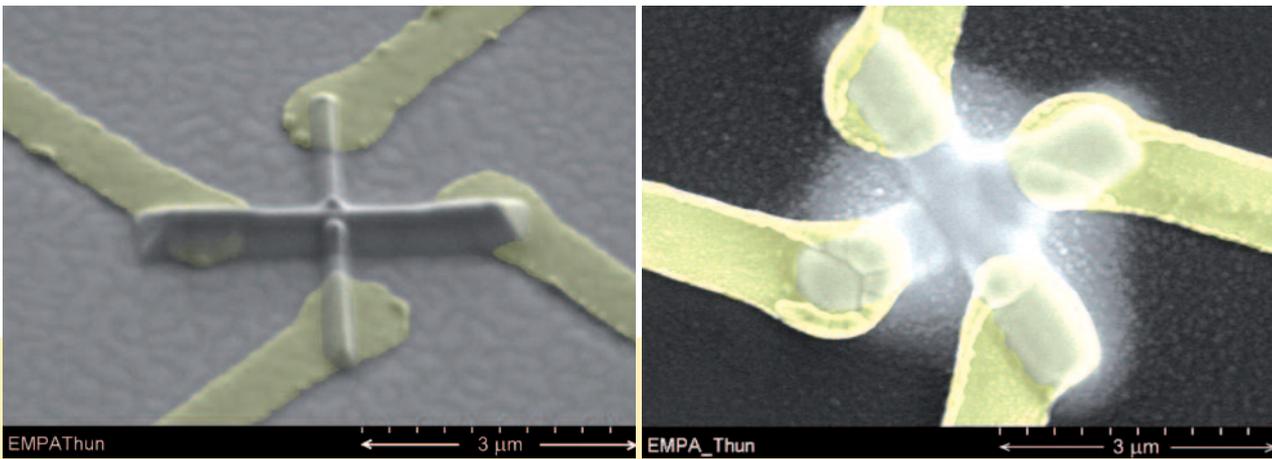


Abb. 2. Miniaturisierter magnetischer Sensor, der durch Elektronenstoss induzierte Chemie in Form eines Kreuzes zwischen vier Goldelektroden aufgetragen wurde.

(I.Utke) übertragen wurde und Anfang Juli in Thun stattfinden wird (www.empa.ch/febip-2008). Diese Forschung profitiert auch von der kürzlich ins Leben gerufenen COST (European Cooperation in the field of Scientific and Technical Research) Aktion «Electron Controlled Chemical Lithography», an der die Autoren teilnehmen und die im vergangenen März in Lissabon zum ersten Mal tagte. ■

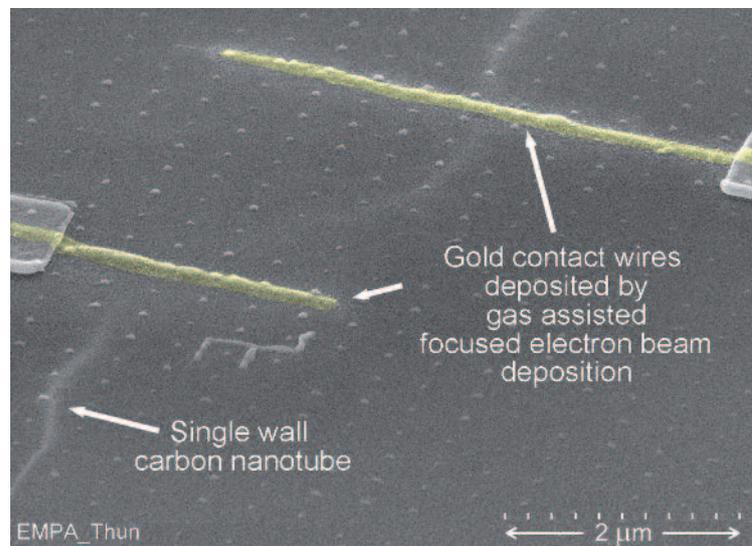


Abb. 3. Mit FEBIP fabrizierte Goldkontakte zu einem einzigen Kohlenstoff-Nanoröhrchen. Der Durchmesser dieses Nanoröhrchens beträgt 2 nm. Im Bild sieht man seinen elektrischen Aufladungskontrast (nicht das Nanoröhrchen selbst), wodurch es etwas dicker erscheint. In der Nähe der Goldkontakte werden diese Ladungen abgeleitet und der Kontrast verschwindet.

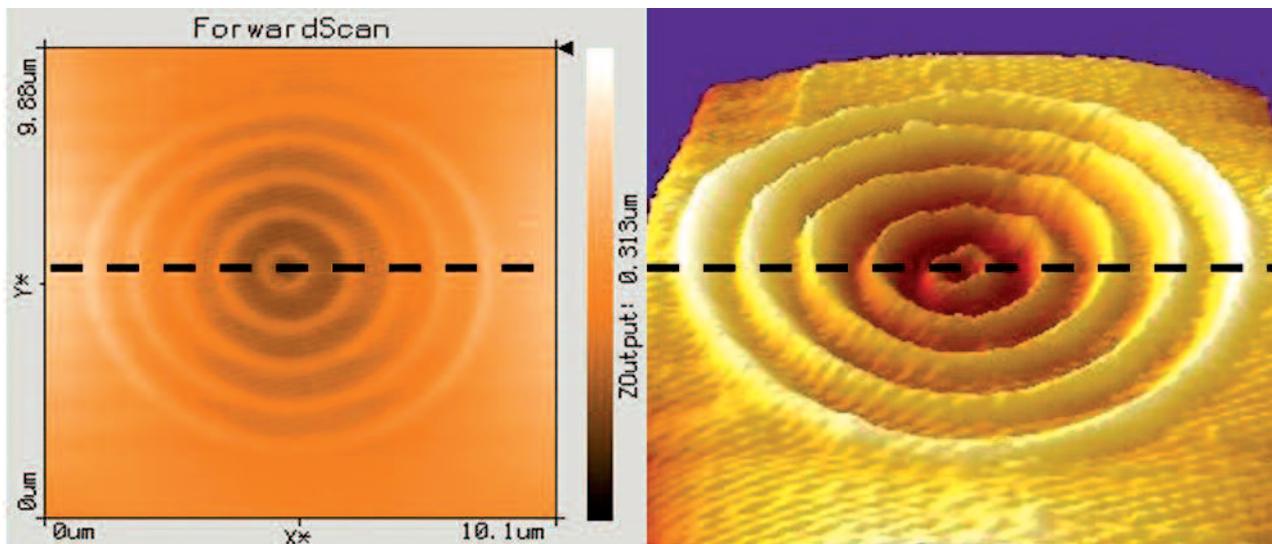


Abb. 4. Ringstrukturen mit FEBIP hergestellt um Lichtwellen im Zentrum zu fokussieren (EPFL).