

JÜRGEN P. RABE · Institut für Physik und IRIS Adlershof der Humboldt-Universität zu Berlin

Zwischen Nano und Makro

MESOSKOPISCH STRUKTURIERTE HYBRIDSYSTEME FÜR ELEKTRONIK UND OPTIK

Mesoskopisch strukturierte Hybridmaterialien mit präzise definierten Strukturgrößen im molekularen Bereich zwischen atomaren und makroskopischen Längenskalen werden als Schlüssel zur ultimativen Miniaturisierung und Integration von Funktionselementen in Elektronik und Photonik betrachtet. Die sich schnell entwickelnden Technologien zur Informationsverarbeitung bieten ein erhebliches Anwendungspotenzial für derartige Systeme.

DIE RASANTE Entwicklung der Informationstechnologien während der vergangenen Jahrzehnte ist eng mit Erfolgen der Materialforschung verknüpft. Heute ist die kontinuierliche Miniaturisierung in der Mikroelektronik bei Strukturgrößen von 32 nm angelangt. Im kommenden Jahr sind höchst integrierte elektronische Schaltkreise mit kleinsten Strukturgrößen von 22 nm avisiert. Dafür werden unter anderem neue poröse *low-k* Materialien eine wichtige Rolle spielen. Technologieknoten mit Strukturgrößen von 11 nm sind laut International Technology Roadmap for Semiconductors ITRS für den Anfang des kommenden Jahrzehnts vorgesehen.

Die Natur macht es vor

Die Mikroelektronik ist damit bei Strukturgrößen angelangt, die dem Durchmesser einzelner großer Proteine entsprechen. Die belebte Natur zeigt uns, dass auch einzelne Biomakromoleküle sehr effizient lebenswichtige Funktionen übernehmen können. Bekannte Beispiele sind die Informationsspeicherung in einzelnen DNA-Strängen, die effiziente Detektion von Photonen, und die Wandlung ihrer Energie in elektrische oder chemische Potentiale in einzelnen Proteinen. Aber auch die Erkennung einzelner Makromoleküle, wie sie in Molekular- und Systembiologie untersucht und in der Immunologie wie der Pharmazie genutzt wird, kann als Beispiel dienen.

In jüngerer Zeit spielen molekulare Materialien und Hybride aus verschiedenen organischen und anorganischen Komponenten eine zunehmend wichtige Rolle für elektronische und photonische Bauelemente. So werden bereits heute dünne Filme aus organischen Molekülen oder Makromolekülen verwendet, um neuartige organische Licht emittierende Dioden, Feldeffekttransistoren oder Solarzellen herzustellen.

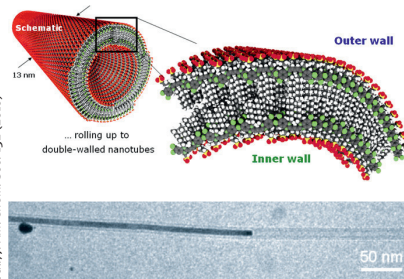
Die Entwicklung gedruckter, mechanisch hoch flexibler elektronischer und photonischer Bauelemente steckt noch in den Anfängen, aber die

Fortschritte der letzten Jahre sind sehr viel versprechend.

Detailliertes Verständnis als Voraussetzung

Die Grundlage dafür ist ein detailliertes Verständnis der Struktur und Dynamik molekularer Systeme von atomaren bis zu makroskopischen Längenskalen, sowie der Zusammenhänge mit ihren elektronischen und optischen Eigenschaften.

Eine zentrale Rolle spielen Hybrid-systeme aus Elektronen-Donoren und -Akzeptoren, aber auch zwischen supramolekularen Strukturen einerseits und ausgedehnten anorganischen Festkörpern andererseits.



Quelle: D.M. Eisele et al., J. Am. Chem. Soc. 132 (2010)

Photo-induziert gewachsener kristalliner Silbernanodraht in einem aktiven selbstaggregierten nanotubulären Farbstoff-Templat

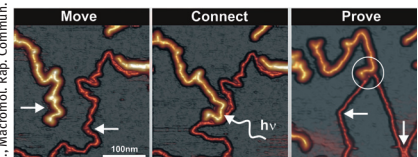
Schwierigkeiten und Herausforderungen

Die etablierten theoretischen Modelle der Physik anorganischer Leiter und Halbleiter sind allerdings nicht ohne weiteres auf organische Materialien und organisch-anorganische Hybrid-systeme übertragbar. Insbesondere weil sich etwa die dielektrischen und optischen Eigenschaften, die Ladungsträgerbeweglichkeiten wie auch die Elektron-Phonon-Kopplung in organischen und anorganischen Leitern und Halbleitern zum Teil drastisch unterscheiden. Außerdem ist es nicht einfach möglich,

die Eigenschaften von Hybrid-systemen aus denen der sie aufbauenden Komponenten vorherzusagen, wenn die Strukturgrößen vergleichbar mit typischen Abklinglängen für elementare Anregungen und Wechselwirkungen sind. Genau das ist aber bei der zunehmenden Miniaturisierung der Fall, wenn die Grenzen zwischen Molekül, Material und Bauelement verschwinden.

Neben der oben skizzierten zunehmenden Verkleinerung von Strukturgrößen in Materialien („top-down“) wird der Ansatz verfolgt, Funktionselemente aus einzelnen Atomen und (Makro-)Molekülen („bottom-up“) aufzubauen. Demonstrierte Beispiele sind Dioden und Transistoren auf Basis einzelner konjugierter Moleküle.

Mit den heutigen Möglichkeiten, einzelne Atome und Moleküle gezielt auf Oberflächen zu manipulieren, können einzelne Funktionselemente gezielt aufgebaut werden. So lassen sich einzelne lineare Makromoleküle an frei wählbaren wohl definierten Stellen chemisch verknüpfen, wobei die Stärke der Bindung anschließend in-situ mechanisch getestet werden kann. Die untere Abbildung verdeutlicht dies.



Quelle: J. Barrig et al., Macromol. Rap. Commun. 31 (2010)

„Move – Connect – Prove“ – Sequenz zur kovalenten Verknüpfung eines einzelnen synthetischen Polymers mit einer doppelsträngigen DNA-Kette.

Damit können in einem ersten Schritt einzelne neue molekulare Hybrid-systeme hergestellt und untersucht werden, während darauf folgend diese dann in größere Systeme integriert werden. Selbstorganisationsprozesse spielen hier eine wichtige Rolle, damit der Weg zurück vom einzelnen molekularen Funktionssystem zum makroskopischen System beschritten werden kann.