



DAS THEMA

SONDERFORSCHUNGSBEREICH DER MATERIALWISSENSCHAFTEN

Pyramiden bilden atomare Grenzen

Forscher untersuchen, wie unterschiedliche Materialien in Mikroelektronik-Bauteilen zusammenpassen

„Struktur und Dynamik innerer Grenzflächen“:
Das ist das Thema eines an der Uni Marburg angesiedelten Sonderforschungsbereichs.

von Manfred Hitzeroth

Marburg. Immer schneller und immer kleiner, aber gleichzeitig auch immer komplizierter und selbst für die Computerexperten undurchschaubarer: Wie zuverlässig die miniaturisierten Elektronikbauteile in Smartphones oder anderen Geräten der Mikroelektronik funktionieren, das hängt auch davon ab, wie die Elektronen sich an den Schnittflächen der unterschiedlichen Bausteine verhalten. Doch diese Verhaltensweisen sind bisher größtenteils noch völlig unerforscht. Denn viele leistungsfähige experimentelle Untersuchungsmethoden aus der Festkörper- und Oberflächenphysik sind nicht einfach auf die Grenzflächen-Analyse übertragbar. Rund 80 Physiker und Chemiker der Uni Marburg erforschen in einem Sonderforschungsbereich der Materialwissenschaften seit 2013 die „Struktur und Dynamik innerer Grenzflächen“.

„Innere Grenzflächen“ sind für die Forscher Kontaktflächen zwischen zwei Materialsichten. Die elektrischen und chemischen Eigenschaften an diesen Grenzflächen unterscheiden sich grundlegend von denen in homogenen Festkörpern (siehe *Hintergrund*). Die Forscher wollen nun erreichen, dass chemische Bindungsverhältnisse, elektronische Kopplung und Energietransfer an diesen Grenzflächen mikroskopisch genau bekannt und vorhersagbar werden.

80 Prozent der Forschungsarbeiten in dem Sonderforschungsbereich betreffen bisher die Grundlagenforschung, erläutert Professor Ulrich Höfer,



Gerson Mette (Mitte) und Robert Wallauer im Labor der Photoelektronen-Spektroskopie.

Fotos: Thorsten Richter

fer, der Leiter des Sonderforschungsbereichs. So gehe es zunächst einmal darum, die auftretenden Effekte zu verstehen. Im Prinzip könnten sich daran anschließend dann Grundlagen für neue Bauelemente, etwa in der Mikroelektronik, in der Optoelektronik und in der Sensorik entwickeln. Denn gerade die Eigenschaften von modernen Bauelementen für Leuchtdioden, Displays oder Solarzellen werden entscheidend von den Grenzflächeneffekten bestimmt und immer weniger von den einzelnen Festkörpern, aus denen sie zusammengesetzt sind, erläutert Professor Höfer.

Umwandlung von Licht der Sonne in elektrische Energie

So können beispielsweise beim Aufeinandertreffen zweier Materialien völlig neue elektronische Eigenschaften auftreten. So findet in modernen Solar-

zellen der entscheidende Schritt der Umwandlung von Sonnenlicht in elektrische Energie an inneren Grenzflächen statt. Beim Aufspüren der verborgenen „Grenzsignale“ wenden die Wissenschaftler Tricks an wie die optische Frequenz-Verdoppelung, bei der eingestrahlt rotes Laserlicht an Grenzflächen umgewandelt wird und als blaues Licht wieder herauskommt. So werden sozusagen speziell die an den Grenzflächen auftretenden Phänomene beleuchtet.

Was passiert nun genau an diesen Grenzen? Wie verhalten sich beispielsweise die einzelnen Moleküle? Dass manche Materialien aus sehr unterschiedlichen atomaren Gitterstrukturen bestehen, sorgt nach Beobachtung der Forscher häufig für eine Durchmischung der Eigenschaften und komplexere Materialstrukturen. Überraschenderweise stellte es sich

bei den Experimenten aber heraus, dass es auch bei zwei Materialien, die strukturmäßig eigentlich genau zusammenpassen, keine atomar glatte Grenzfläche entstand. Ein Phänomen, das die Wissenschaftler hier entdeckten, war der Nachweis einer sieben bis zehn Atome hohen „Grenzpyramide“.

Experten aus unterschiedlichen Gebieten wie Halbleiterphysik, Oberflächenphysik und -chemie, chemische Synthese, Strukturanalyse und Laserspektroskopie kooperieren in dem SFB. In neun Projekten wurden bisher Modellstrukturen von Schichtsystemen beschrieben. Die Forscher fertigten dafür speziell präparierte Systeme her und charakterisierten deren Eigenschaften auf atomarer Ebene. In den einzelnen Projekten werden die chemische Synthese der Grenzflächenmaterialien, der Aufbau der Schichten, die spektroskopischen Un-

tersuchungen und die theoretische Modellierung verknüpft. In acht weiteren Projekten werden gezielt die opto-elektronischen Eigenschaften der Modellsysteme untersucht. Ein entscheidendes Hilfsmittel in der experimentellen Untersuchung der Grenzflächen auf der Ebene der Atome ist die Transmissions-Elektronenmikroskopie bei den Marburger Materialwissenschaftlern um Professorin Kerstin Volz. Sie macht Strukturen sichtbar, die sich im millimeter-nahen Bereich befinden.

Eigens für den Marburger SFB wurde für 1,5 Millionen Euro eine neuartige Laser-Experimentieranlage entwickelt. Mit der Technik der zeitaufgelösten Photoelektronen-Spektroskopie können die Forscher damit Vorgänge an Grenzflächen nachweisen, die sich im Milliardstel einer Millisekunde (Femtosekunde) abspielen.

ZUR PERSON

Professor Ulrich Höfer (59) wurde in Zusmarshausen bei Augsburg geboren und wuchs in Mindelheim (Allgäu) auf. Von 1977 bis 1984 studierte er Physik an der Technischen Universität München. Nach der Promotion im Jahr 1989 arbeitete er für zwei Jahre beim IBM-Forschungszentrum in Yorktown Heights, New York, in der Abteilung Laserwissenschaften. Von 1992 bis 1998 leitete er eine Gruppe am Max-Planck-Institut für Quantenoptik in Garching. 1996 habilitierte er an der TU München mit experimentellen Arbeiten zu Siliziumoberflächen. Seit 1999 ist Höfer Professor für Experimentalphysik an der Uni Marburg. Seine Forschungsschwerpunkte sind die Experimentelle Oberflächenphysik sowie die Laserspektroskopie von Oberflächen und Grenzflächen. Auf seinem Spezialgebiet, der zeitaufgelösten Photoelektronenspektroskopie, zählt Höfer weltweit zu den führenden Wissenschaftlern.



Professor Ulrich Höfer.

HINTERGRUND

Innere Grenzflächen (Internal Interfaces) sind Kontaktstellen zwischen verschiedenen Materialien. Sie haben große Bedeutung bei miniaturisierten Halbleitern, wie sie etwa in elektronischen Schaltkreisen vorkommen. Diese Halbleiter sind aus mehreren Lagen verschiedener Elemente aufgebaut, ähnlich wie ein Schichtkuchen. „Die Grenzflächen zwischen den unterschiedlichen Materialien bestimmen entscheidend, welche optischen und elektronischen Eigenschaften solche Halbleiterbauelemente aufweisen“, erläutert der Marburger Physikprofessor Ulrich Höfer. Die Bedeutung innerer Grenzflächen werde weiter zunehmen, wenn Verbundmaterialien die Eigenschaften von Metallen, klassischen Halbleitern und organischen Materialien verknüpfen, sagt Höfer voraus. Beispiele für derartige Verbundmaterialien sind neuartige Solarzellen und Biosensoren. Andere neue Materialien entstehen durch das Aufeinandertapeln verschiedener, atomar dünner zweidimensionaler Festkörper. Auch hier spielt die Wechselwirkung der Materialien über ihre Grenzflächen eine herausragende Rolle für die Eigenschaften.

Zweidimensionale Halbleitermaterialien im Fokus

Verlängerung für Sonderforschungsbereich bis 2021 · Zusammenarbeit mit Columbia University

Die Deutsche Forschungsgemeinschaft hat den 2013 gestarteten Marburger Sonderforschungsbereich SFB 1083 um weitere vier Jahre verlängert.

Marburg. Der Sonderforschungsbereich „Struktur und Dynamik innerer Grenzflächen“ tritt mit seinem Sprecher, dem Marburger Physiker Professor Ulrich Höfer, nun in eine neue Phase. „Zunächst ging es uns in erster Linie darum, die physikalisch-chemischen Phänomene an Grenzflächen zu verstehen. Jetzt wollen wir diese auch gezielt kontrollieren und für neue Anwendungen maßschneidern“, erklärt Höfer. Über einen Zeitraum von vier Jahren stehen den Forscherinnen und Forschern bis 2021 dafür weitere 10,5 Millionen Euro zur Verfügung.

Während es beim SFB-Start 2013 noch große Lücken im Verständnis von Struktur und Dynamik innerer Grenzflächen gab, wurden mittlerweile etliche Fragestellungen beantwortet. 55 Doktorarbeiten sind im Rahmen des SFB 1083 in der ersten Förderperiode (Budget: 8,7 Millionen Euro) entstanden oder kurz vor der Fertigstellung.

162 Publikationen wurden vorgelegt, allein 74 entstanden im vergangenen Jahr. Zu den Ergebnissen der ersten Förderperiode zählen Erkenntnisse, wie innere Oberflächen atomar aufgebaut sind und nach welchen Kriterien sich diese Strukturen entwickeln.

In enger Kooperation haben Chemiker und Physiker die Grundlage für eine gezielte, selektive Anbindung organischer Moleküle auf Silizium gelegt. Dadurch könnte nach Angaben Höfers ein Potenzial für das Design von Hybrid-Bauelementen entstehen. Diese würden die etablierte Halbleitertechnologie mit der Flexibilität der organischen Chemie verknüpfen.

Bereits sehr weit fortgeschritten sind die Marburger Forscher aus mehreren Arbeitsgruppen des SFB 1083 bei der Entwicklung des Prototyps eines neuartigen Lasers, mit dem sich der Wellenlängenbereich bisheriger Halbleiterlaser erheblich erweitern lässt. Dieser Laser funktioniert nun aufgrund des speziellen Designs seiner inneren Grenzflächen und der Wechselwirkung von Elektronen über die Grenzfläche hinweg.

„Auf diesem Teilgebiet unserer Forschung sehe ich momentan am konkretesten das Potenzial für ein Start-up, einer Aus-

gründung aus der Universität“, meint Höfer. Die Idee für den neuen Laser könnte aber auch von einem größeren Unternehmen als Transferprojekt von der Wissenschaft in die Wirtschaft aufgegriffen werden, meint er.

In den kommenden vier Jahren wollen Höfer und seine Kollegen ihre Erkenntnisse über innere Grenzflächen auch auf neuartige zweidimensionale Halbleitermaterialien wie Gra-

phen übertragen, für deren Entdeckung im Jahr 2010 der Nobelpreis verliehen wurde. Dieses zweidimensionale Kohlenstoffgitter und andere, komplexere zweidimensionale Materialien können einzigartige Eigenschaften vorweisen, die unter anderem die Herstellung extrem schneller Computerchips oder sogenannte Superkondensatoren zur Energiespeicherung möglich machen.

Indem die Wissenschaftler solche Schichtsysteme übereinander stapeln und deren Eigenschaften mischen, wollen sie neue Effekte und Kontrollmöglichkeiten aufspüren und dann in einem Baukastensystem den Materialwissenschaften anbieten. Auf diesem Forschungsfeld besteht auch eine neue Zusammenarbeit mit einem Forschungsverbund der Columbia University in New York.



Der Einsatz von Lasertechnologie ist Bestandteil der Forschungsarbeiten im Sonderforschungsbereich „Struktur und Dynamik innerer Grenzflächen“.