

Avogadro-Konstante neu bestimmt

Im Rahmen des Avogadro-Projekts der PTB, das zur Neudefinition der Masseinheit Kilogramm beitragen soll, konnten die Messungen an Silicium mit natürlicher Isotopenzusammensetzung abgeschlossen werden. In einem Folgeprojekt mit angereichertem ^{28}Si soll nun die Messunsicherheit weiter gesenkt werden.

Das Kilogramm ist die letzte Größe im Internationalen Einheitensystem SI, die durch einen makroskopischen Körper – das Urkilogramm – definiert wird. Alle anderen Einheiten werden auf atomare Prozesse, Molekül-Eigenschaften oder Naturkonstanten zurückgeführt. Gelingt es, die Atome in einem Siliciumkristall der Masse 1 kg mit höchster Präzision zu zählen, so könnte man die Definition der Masseinheit an die Fundamentalkonstante „Avogadro-Konstante“ anknüpfen.

Für die Untersuchungen wurde ein hochreiner Silicium-Einkristall benutzt, der von der Firma Wacker-Siltronic hergestellt wurde. Die molare Masse des Kristalls wurde am Institut für Referenzmaterial und Messungen der Europäischen Union (IRMM) in Geel massenspektrometrisch bestimmt (relative Messunsicherheit $4 \mu\text{g}/\text{mol}$). In der PTB fanden folgende Messungen statt: Der Gitterparameter des Materials wurde an den Kristall-Längensstandard der PTB angeschlossen (Messunsicherheit $0,012 \text{ fm}$), die Masse der 1-kg-Siliciumkugel – hergestellt im australischen Metrologieinstitut – mit dem nationalen Massestandard verglichen (Messunsicherheit $19 \mu\text{g}$), der Kugeldurchmesser (92 mm) und damit auch das Kugelvolumen mit Hilfe eines speziell für diese Anwendung entwickelten sphärischen Fizeau-Interferometers aus vielen einzelnen Messungen bestimmt (Messunsicherheit $2,7 \text{ nm}$) sowie die Dicke der Oxidschicht mit Hilfe der Ellipsometrie ermittelt (Messunsicherheit $0,36 \text{ nm}$). Besondere Aufmerksamkeit wurde der

Bestimmung von Art und Anzahl der Defekte im Kristallmaterial gewidmet: Viele auswärtige Forschungseinrichtungen unterstützten die Untersuchungen in der PTB.

Die Messergebnisse sind in der Avogadro Database beim BIPM abgelegt. Aus den Bestimmungen von Dichte, molarer Masse, Verunreinigungen und Gitterparameter ergibt sich folgender Wert für die Avogadro-Konstante:

$N_A = 6,022\,135\,4(18) \cdot 10^{23} \text{ mol}^{-1}$. Dieser Wert ist mit allen bisher veröffentlichten Ergebnissen dieser Methode im Einklang, aber fast $1 \cdot 10^{-6}$ kleiner als der CODATA-Wert 1998, der auf den Ergebnissen des Wattwaagenexperiments im National Institute of Standards and Technology (NIST) beruht. Diese Diskrepanz muss bis zu einer endgültigen Definition der Einheit Kilogramm noch geklärt werden.

Ein schwerwiegendes Problem bei den Messungen an Silicium mit natürlicher Isotopenzusammensetzung ist die relativ ungenaue Kenntnis der molaren Masse. Dies schlägt sich in der Gesamt-Messunsicherheit von $2,9 \cdot 10^{-7}$ nieder. In einem internationalen Projekt mit angereichertem ^{28}Si soll die Messunsicherheit um den Faktor 10 verringert werden.



Briefmarke der italienischen Post, herausgegeben 1956 zum 100. Todestag von Amedeo Avogadro. Im Text die Definition der Basiseinheit Mol, hier bezogen auf gasförmige Stoffe.

Weitergehende Informationen von P. Becker
Fax (05 31) 592-60 15
E-Mail:
peter.becker@ptb.de

Halbleiterinseln: Vom künstlichen Atom zum Molekül

Unter Nutzung von Selbstorganisationsprozessen konnten erstmals Halbleiterstrukturen mit zwei gestapelten, nanometergroßen Inseln hergestellt und in ihren elektrischen Transporteigenschaften charakterisiert werden. Diese Strukturen sind so winzig, dass sie (Quanten-)Eigenschaften wie Atome aufweisen, und stellen einen Schritt in Richtung auf ein neues Quantennormal für die Einheit Ampere dar.

Der Fortschritt in der modernen Elektronik, der mit ständig kleiner werdenden Schaltungen einher-

geht, muss in absehbarer Zeit eine Grenze überwinden: Sobald die Strukturen nur noch wenige Nanometer klein sind, gelten nicht mehr die Gesetze der klassischen Physik, sondern die der Quantenmechanik. Derart winzige Schaltungselemente sind auch für die Präzisionsmesstechnik von großer Bedeutung: In ihnen können einzelne Elektronen besser manipuliert werden als bisher – eine Voraussetzung für einen neuen Standard der Stromstärkeinheit Ampere, der auf dem Abzählen von Elektronen beruht.

Fortsetzung auf Seite 2

Halbleiterinseln: Vom künstlichen Atom zum Molekül

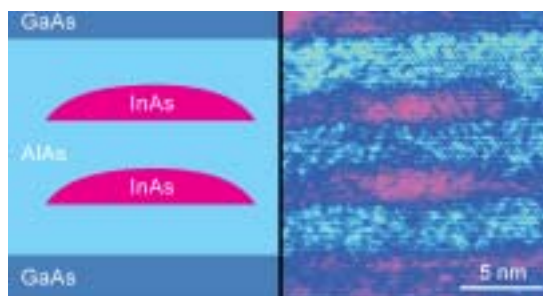
(Fortsetzung von Seite 1)

Beim Wachstum von Halbleiterkristallen nutzt man einen Selbstorganisationseffekt, der winzige, wenige Nanometer große „Inseln“ hervorbringt. Bei geschickter Nutzung des Effekts lassen sich die Inseln sogar stapeln, und sie zeigen dann im Experiment interessante neue Eigenschaften. Die selbstorganisierten Halbleiter-Inseln werden dazu in die Barriere einer resonanten Tunneldiode eingebettet. Mit dieser Technik ist es nun erstmals gelungen, resonante Tunneldioden mit zwei gestapelten Nanoinseln aus Indiumarsenid herzustellen und ihre Eigenschaften beim elektrischen Transport zu beobachten.

In den Strukturen stellen die beiden Inseln gewissermaßen Emitter und Kollektor eines Transistors dar. Sequentielle quantenmechanische Tunnelprozesse bestimmen, wie ein Stromfluss von der angelegten Spannung abhängt. Da die Quanteninseln – ähnlich wie Atome – für 0-dimensionale Systeme typische diskrete Energiezustände besitzen, werden keine Stufen, sondern scharfe Stromspitzen beobachtet. Sie zeigen nahezu keine Verbreiterung bei Temperaturerhöhung, da sie nicht mehr von der Verteilung der energiereichsten Elektronen in den hochdotierten dreidimensionalen Bereichen abhängen. Ein neuer Freiheitsgrad ergibt sich, wenn man die beiden Nanoinseln koppelt: Macht

man die trennende Zwischenschicht dünner, nimmt die Kopplung zu und im Extremfall überlagern sich die Elektronenwellenfunktionen der beiden Inseln. Es entsteht quasi ein Nanoinsel-Molekül. Dies konnte in Zusammenarbeit mit der Abteilung Nanostrukturen der Universität Hannover über den Einfluss einer geänderten Spinaufspaltung der Elektronen in einem Magnetfeld nachgewiesen werden.

Mit den Untersuchungen eröffnet sich auch eine Perspektive für Strukturen mit mehr als zwei vertikal gekoppelten Quantenpunkten. Ein praktischer Vorteil, nämlich die Verringerung eines unerwünschten Untergrundstroms durch die nun insgesamt dickere Barriere, hat sich bereits jetzt ergeben.



Schematische Schnittzeichnung von zwei gestapelten Halbleiter-Quantenpunkten (links) und Transmissions-Elektronenmikroskop-Aufnahme einer resonanten Tunneldiode (rechts)

Weitergehende Informationen von K. Pierz
Fax: (05 31) 592-24 12
E-Mail:
klaus.pierz@ptb.de

Großes Reflektometer für die EUV-Lithographie

Mit einem weltweit einzigartigen Reflektometer kann die PTB jetzt Spiegel von EUV-Lithographie-Systemen mit Abmessungen bis zu 50 cm charakterisieren.

In der Halbleiterfertigung ist es zur photolithographischen Erzeugung immer kleinerer Strukturen nötig, Strahlung mit immer geringerer Wellenlänge einzusetzen. Um Bauelemente mit Strukturbreiten von weniger als 50 nm herzustellen, plant die Halbleiterindustrie ab 2007 den Einsatz von Lithographie mit extrem ultravioletter Strahlung (EUVL) bei einer Wellenlänge von 13,5 nm.

Die PTB, die sich mit ihrem Synchrotronstrahlungslaboratorium am Berliner Elektronenspeicherring BESSY II im letzten Jahrzehnt zum europäischen Zentrum für EUV-Radiometrie entwickelt hat, unterstützt die Industrie bei der Entwicklung der benötigten Komponenten und Messverfahren. Am Strahlrohr für weiche Röntgenstrahlung führt sie mit 13-nm-Strahlung die erforderlichen „At-wavelength“-Messungen zur Charakterisierung von Spiegeln, Maskenblanks und Masken für das europäische EUVL-Programm durch. Dabei erreicht sie beispielsweise bei der Messung des Reflexionsgrades von Mo/Si-Multilayerspiegeln eine relative Unsicherheit von nur 0,14 % – ein internationaler Bestwert, der kürzlich durch Vergleichsmessungen bestätigt wurde.

Die Carl Zeiss SMT AG, enger Kooperationspartner der PTB, bereitet zurzeit die Fertigung von EUVL-Spiegeln als Komponenten eines industriellen

„ α -Tools“ vor. Um diese Spiegel mit Abmessungen bis zu 50 cm und einem Gewicht von bis zu 50 kg zu charakterisieren, hat die PTB in Zusammenarbeit mit Carl Zeiss und mit Förderung des BMWA ein neues Reflektometer aufgebaut und im November 2002 in Betrieb genommen. Der weltweit einzigartige Messplatz wird dazu dienen, EUVL-Spiegel, -Maskenblanks und -Masken hinsichtlich ihres Reflexionsgrades und der Homogenität der Multilayer-Schichtdicke zu charakterisieren – letzteres mit einer angestrebten relativen Unsicherheit von $1 \cdot 10^{-4}$.



Das neue EUV-Reflektometer. Im Hintergrund die geöffnete Tür des Vakuumschraubs mit 2 m Durchmesser, im Vordergrund auf einem Montagegestell die Mechanik zur Spiegelpositionierung, mit der auch große und schwere Spiegel auf 10 μ m und 0,01° genau ausgerichtet werden können.

Weitergehende Informationen von F. Scholze,
Fax: (030) 63 92-50 82,
E-Mail:
frank.scholze@ptb.de

Präzise Erzeugung ultrakleiner Ströme

Ein neues Gerät erzeugt hochgenau und über lange Zeit hinweg kleinste Stromstärken und ermöglicht eine wesentlich verbesserte Kalibrierung von Messgeräten im Pikoampere-Bereich.

Die Messung kleiner Stromstärken wird in vielen Bereichen, etwa in der Halbleiterindustrie oder in der medizinischen Messtechnik, immer wichtiger. Zum Beispiel werden in der medizinischen Strahlendiagnostik und -therapie zur Messung der Strahlenbelastung üblicherweise Dosimeter verwendet, die die Ionisation eines Gases ausnutzen. Dabei werden sehr kleine Ströme im pA-Bereich gemessen. Die Genauigkeit der Messung ist für eine genaue Festlegung der Dosis entscheidend.

Für die Überprüfung und Kalibrierung solcher Dosimeter und anderer Pikoamperemeter benötigt man Normalstromquellen, die mit hoher Genauigkeit über einen langen Zeitraum konstante kleine Stromstärken liefern. Eine wichtige Methode für die Erzeugung sehr kleiner Stromstärken beruht auf dem Laden bzw. Entladen eines Kondensators. Legt man an einen Kondensator mit der Kapazität C eine zeitlich linear ansteigende bzw. fallende Spannung dU/dt an, so fließt ein Strom $I = C \cdot dU/dt$. Durch Messung der Kapazität und der zeitlichen Ableitung der Spannung lässt sich der erzeugte Strom auf die Einheiten der Kapazität, der Spannung und der Zeit zurückführen.

In der PTB wurde eine neue Stromquelle dieses Typs für höchste Genauigkeiten entwickelt und gebaut. Um auch solche Messgeräte kalibrieren zu können, die über lange Zeiten mitteln, wurde ein Spannungsrampengenerator entwickelt, der auf einem elektronischen Integrator basiert. Er erlaubt kontinuierliche Messzeiten von bis zu 35 Minuten, wobei die relative Schwankung der Spannungsrampe unter $1 \cdot 10^{-5}$ bleibt.

Mit dem neuen Gerät lassen sich beliebige Stromstärken von 10 pA bis herab zu 0,1 fA erzeugen. Die Unsicherheit beträgt bei 1 pA nur 0,01 % und bei 10 fA immer noch 0,05 %.

Zurzeit wird diese Kalibriertechnik an einen namhaften deutschen Hersteller von Dosimetern transferiert. Eine noch größere wirtschaftliche Bedeutung kann die Methode in der Halbleiterindustrie erlangen. Hier gehört die Messung kleinster Ströme im fA-Bereich, die als unerwünschte Leckströme in den Zellen moderner Speicherbauelemente auftreten, zu den typischen Anforderungen an ein modernes Pikoamperemeter. Die Kalibrierung solcher Geräte ist mit dem neuen Verfahren zuverlässiger und genauer geworden.

Weitergehende Informationen von G.-D. Willenberg
Fax: (05 31) 592-21 05
E-Mail: gerd-dietmar.willenberg@ptb.de



Messgeräte für sehr kleine Stromstärken können mit Hilfe eines Luftkondensators und eines elektronischen Rampengenerators kalibriert werden.

Neuer Messplatz für die Qualitätskontrolle von Wafern

Im PTB-Laboratorium am Berliner Elektronenspeicherring BESSY II wurde ein Messplatz in Betrieb genommen, an dem mit Röntgenfluoreszenzanalyse kleinste Verunreinigungen auf Siliciumwafern ermittelt und die Zusammensetzung von nanometerdünnen Schichten analysiert werden können.

Die energiedispersive Röntgenfluoreszenzanalyse (RFA) ist ein physikalisches Verfahren, mit dem simultan und zerstörungsfrei mehrere Elemente gleichzeitig analysiert werden können. Dabei wird die Probe mit Röntgenstrahlung angeregt und die entstehende, elementspezifische Fluoreszenzstrahlung mit einem energiedispersiven Halbleiterdetektor nachgewiesen. Die Methode dient unter anderem zur Ultraspurenanalytik bei der Qualitätskontrolle von Trinkwasser, Nahrungsmitteln und Halbleiteroberflächen.

Die Halbleiterindustrie setzt zur Kontrolle von Waferoberflächen routinemäßig das Verfahren der Totalreflexions-RFA (TRFA) ein. Dabei trifft der Röntgenstrahl unter einem so kleinen Winkel auf die Probe, dass er an der Oberfläche total reflektiert wird. Verwendet man zur Anregung monochromatisierte Undulatorstrahlung, wie sie in der Synchrotronstrahlungsquelle BESSY II in Berlin erzeugt wird, lassen sich selbst Elemente niedriger Ordnungszahl (C bis Al) noch bis zu einer Grenze von einem Pikogramm nachweisen. Das entspricht einer Nachweisgrenze von etwa 10^8 Fremdatomen je cm^2 für 200 mm große, mit einem VPD-Verfahren behandelte Siliciumwafer.

Diese Ultraspurenanalytik erfordert Reinraumbedingungen, um sicherzustellen, dass die Waferproben beim Einbringen in die Analysekammer

Weitergehende Informationen von B. Beckhoff,
Fax: (030) 63 92-50 82,
E-Mail:
burkhard.beckhoff@ptb.de

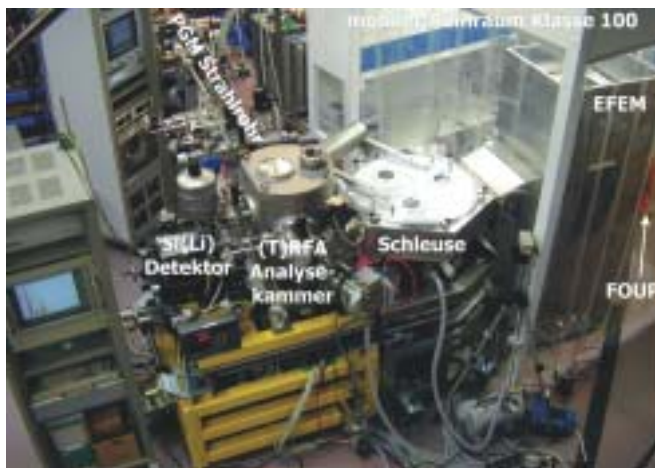
Fortsetzung auf Seite 4

Neuer Messplatz für die Qualitätskontrolle von Wafern

Fortsetzung von Seite 3

nicht zusätzlich merklich kontaminiert werden. Der neue Messplatz für referenzprobenfreie (T)RFA, der Ende 2002 im PTB-Labor bei BESSY II in Betrieb genommen wurde, gestattet es, bis zu 300 mm große Waferscheiben automatisiert und kontaminationsarm einzubringen. Die Methode, die in Zusammenarbeit mit der Halbleiterindustrie entwickelt worden ist, soll zur Qualitätskontrolle von neuen Wafer-Reinigungsverfahren eingesetzt werden.

Darüber hinaus wird der Messplatz dazu dienen, die chemische Zusammensetzung von nanometerdünnen Mehrschichtsystemen zu analysieren. Durch Variation der Anregungsenergie kann die Feinstruktur der Röntgenabsorptionskante untersucht werden. Damit lassen sich Verbindungen leichter Elemente unterscheiden, die sich lediglich in Nanogramm-Mengen auf den Waferoberflächen befinden.



Der neue Messplatz am Plangittermonochromator-Strahlrohr (PGM) der PTB bei BESSY II. Ein Robotersystem (EFEM) befördert die Wafer aus ihren Standardtransportbehältern (SMiF oder, wie hier, FOUP) in eine Schleuse. Von dort werden sie mit einem Vakuumroboter in die (T)RFA-Analysekammer transportiert.

Gutes Zeugnis für die PTB

Die PTB, als Ressortforschungseinrichtung des Bundes, wurde umfassend evaluiert – mit ausgezeichnetem Ergebnis.

Der Abschlussbericht der international besetzten Evaluationskommission wurde am 16. Dezember 2002 dem Bundesminister für Wirtschaft und Arbeit übergeben und vom Kommissionsvorsitzenden Prof. Hartmut Weule, Universität Karlsruhe, der Öffentlichkeit vorgestellt.

Nach einjähriger Arbeit bescheinigte die Kommission der PTB, dass sie ihre zentrale Mission, Fortschritt und Zuverlässigkeit in der Messtechnik für Gesellschaft, Wirtschaft und Wissenschaft zu gewährleisten, mit großen Nutzen für die deutsche Wirtschaft und Gesellschaft verfolge und erfülle. Daher sollten auch alle künftigen Aktivitäten der PTB konsequent an dieser Mission ausgerichtet werden. Die Fachkompetenz und die Qualität der Arbeiten der PTB-Mitarbeiter seien „summarisch betrachtet“ exzellent.

Die fachliche Ausrichtung der PTB entspricht – so das Urteil der Kommission – weitgehend den gegenwärtigen Anforderungen. Zwei Aufgabengebiete sollten wegen ihrer stark zunehmenden Bedeutung neu konzipiert und ausgebaut werden: „Metrologie in der Chemie“ und „Metrologische Informationstechnik“. Zur Verwertung der Forschungsergebnisse müssten die Anmeldung von Patenten und der Technologietransfer weiter konsequent gefördert werden.

Wegen der hoheitlichen Aufgaben der PTB und ihrer Neutralität seien die Rechtsform als zentrale staatliche Einrichtung sowie die Grundfinanzierung beizubehalten; ebenso der 60 %ige Anteil des Ressourceneinsatzes für Forschung und Entwicklung. Als Veränderungen fordert die Kommission – im Sinne von mehr Eigenverantwortlichkeit der PTB – die Einführung eines Globalhaushalts und

eine Aufstockung des Sachmittelletats, die Übernahme der in der Wirtschaft bewährten Leitungsorganisation in Form von Aufsichtsrat und Vorstand sowie die Beendigung der jährlichen Stellenstreichungen von 1,5 %.

Unerlässlich für die strategische Aufgabenplanung der PTB seien die systematische und permanente Erfassung der Kundenanforderungen und die Analyse langfristiger Entwicklungen in Wirtschaft und Gesellschaft sowie regelmäßige Fachbegutachtungen aller wissenschaftlichen Aktivitäten durch internationale Experten. Als sehr gut wird die wissenschaftliche Einbindung der PTB in das nationale, europäische und internationale Umfeld beschrieben. Der Aufbau eines internationalen Netzwerks kooperierender nationaler Metrologieinstitute sei weiter voranzutreiben.

Am Ende des Jahres will die Kommission die Umsetzung ihrer Empfehlungen überprüfen.

Der vollständige Evaluationsbericht ist über die Pressestelle der PTB oder die Webseiten der PTB und des BMWA verfügbar.

(<http://www.ptb.de/>, unter Presse/ Aktuelles)

(<http://www.bmw.bund.de/>)



Prof. Hartmut Weule (r.) übergibt Minister Wolfgang Clement den Abschlussbericht der Evaluationskommission.

Links: Prof. Ernst O. Goebel, Präsident der PTB

PTBnews 03.1

Deutsche Ausgabe

März 2003

ISSN 1611-1621

Herausgegeben von der
Physikalisch-Technischen
Bundesanstalt (PTB)
Braunschweig und Berlin

Chefredakteur Jens Simon

PTB, Bundesallee 100

38116 Braunschweig

Telefon: (05 31) 592-30 06

Fax: (05 31) 592-30 08

E-Mail: ptbnews@ptb.de

Webseite: <http://www.ptb.de/>