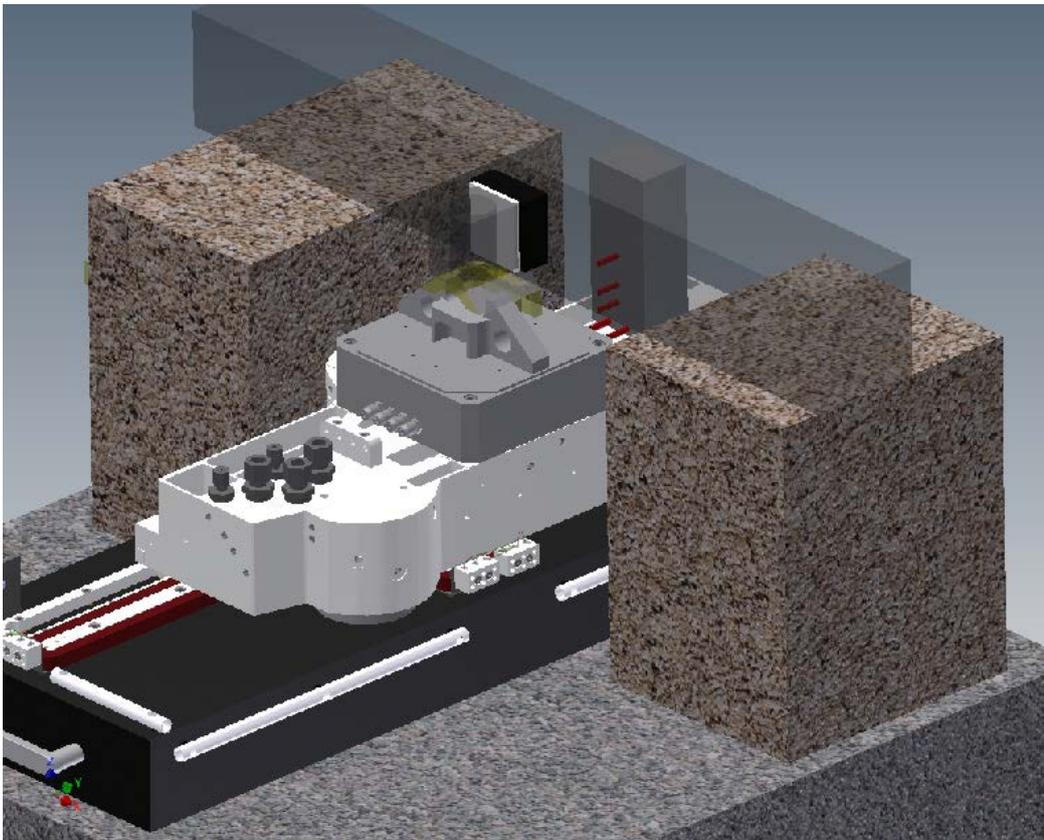


Hochgenaue und rückverfolgbare AFM-Messungen an Halbleitern und Stufennormalen

Positionieren im Sub-Nanometer-Bereich



Die Rasterkraftmikroskopie (AFM) ermöglicht Oberflächenmessungen höchster Auflösung bis auf atomare Level und dringt damit in Bereiche vor, die sich mit Lichtmikroskopie nicht mehr auflösen lassen. Das Verfahren arbeitet berührungslos, gemessen werden Kräfte zwischen einer sehr dünnen Messspitze und der Objektoberfläche, die dann Aufschluss über die Topografie, die chemische Oberflächenbeschaffenheit, Defekte etc. geben können.

Anwendungen für diese Methode finden sich sowohl in der Forschung als auch in der Produktion. Zu den typischen Einsatzbereichen gehören z. B. Life Science Technologien ebenso wie die Materialforschung oder die Halbleiterinspektion. Präzision bei der Positionierung von Messspitze und Probe sind hier obligatorisch, da nur so eine hohe Ortsauflösung erreicht werden kann. Piezobasierte Positioniersysteme sind für diese Scan-Anwendung gut geeignet, da sie nicht nur mit Auflösungen im Subnanometerbereich arbeiten, sondern auch eine hohe Dynamik bieten.



Abb. 1 CAD Zeichnung des hochauflösenden Mess-AFM mit 6-Achsen-Piezotisch von PI (Bild: PTB)

Die Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB) entwickelt zurzeit ein „Low Noise metrological AFM“, mit dem die Rasterkraftmikroskopie noch einmal in neue Dimensionen vorstoßen wird (Abb. 1).

So sollen mit dem neuen System rückführbare Messungen von Stufennormalen durchgeführt werden, die zur Einstellung von anderen AFMs verwendet werden. Auch quantitative Untersuchungen an Halbleiterproben zur Bestimmung von Critical Dimensions, d. h. kleinster noch abbildbarer Strukturen, sollen mit seiner Hilfe realisierbar sein. Dabei kommen je nach Anwendung zwei Messverfahren zum Einsatz: der Flächenscan und die sogenannte „Single Point Probing“ Methode.

Zwei Messverfahren: Flächenscan oder Single Point Probing

Beim Flächenscan wird die AFM-Spitze (das an der Spitze atomar dünne Tip) mit konstanter Frequenz und Amplitude zur Schwingung angeregt und auf Arbeitsabstand an die Probe heran gefahren. Die Probe wird unter dem Tip bewegt. Ändert sich während des Scans der Abstand, verschieben sich auch Frequenz und Amplitude der Tip-Schwingung. Die Position der Probe wird in Richtung der z-Achse so nachgeregelt, dass die Schwingung konstant bleibt. Damit liefert dann die Variation der z-Position zusammen mit den für die Ortsauflösung relevanten x- und y-Koordinaten die Topografie-Informationen für die Probenoberfläche.

Da dieser Flächenscan selbst bei höchster Präzision bei steilen Strukturen nur sehr wenig Informationen über den Kantenbereich liefert, kommt mit der „Single Point Probing“ Methode ein weiteres Messverfahren zum Einsatz: Um eine Stufe exakt zu messen, fährt die Positioniereinrichtung langsam eine bereits entdeckte Stufe an den Tip heran (Abb. 2). Bewegungsrichtung ist dabei die Normale zur Oberfläche der Stufe, d. h. man benötigt drei aktive Achsen für die Probenverstellung.

Aufgenommen wird dabei die „Kraftkennlinie“, die sich aus der Änderung von Frequenz, Amplitude und Phase der Tip-Schwingung an der jeweiligen Stelle der Stufe ermitteln lässt. Die Messung wird an weiteren Punkten wiederholt, sooft bis die ganze Stufe gemessen ist.

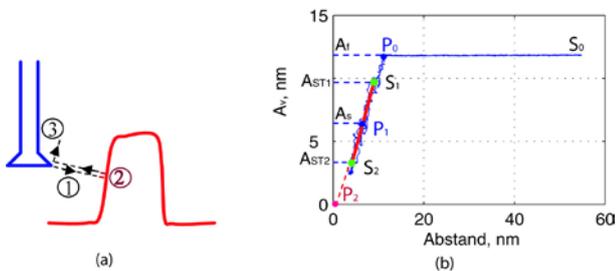


Abb. 2 Die „Single Point Probing“ Methode: Bewegung einer Stufenstruktur der Probe gegenüber der AFM-Spitze (a), und aufgenommene Kraft-Weg-Kennlinie an einem Punkt der Stufe (b) (Bild: PTB)

Dieses Messverfahren arbeitet zwar relativ langsam, liefert jedoch sehr genaue Informationen über topografisch steile Bereiche. Es eignet sich beispielsweise auch für quantitative Messungen an Halbleiterstrukturen mit sehr geringen Abmessungen von 10 bis 20 nm.

An das für den Proben-Scan eingesetzte Positioniersystem stellen beide Messverfahren extrem hohe Anforderungen, vor allem was die Auflösung betrifft. Sie muss im Sub-Nanometer-Bereich liegen, da das beim Scannen eingesetzte Positioniersystem die Ortsauflösung liefert. Gleichzeitig sind die Anforderungen an die Dynamik hoch, denn je schneller der Scan in z-Richtung verfährt, desto schneller ist auch die Positionierung in x- und y-Achse möglich. Das verkürzt nicht nur die Messdauer, sondern reduziert auch die Drift, die sich zeitabhängig vergrößert. Die hohe Dynamik kommt damit auch der Genauigkeit zugute.

Parallelkinematik

Bei der Positionierung entschied sich die PTB aus diesen Gründen für ein piezobasiertes Nanopositioniersystem (Abb. 3). Das parallelkinematische System von PI ist ausgelegt für Verfahrrwege von 12 μm in drei linearen Achsen, ermöglicht eine Positionierung besser als 0,1 nm und bietet damit für den Einsatz im neuen AFM beste Voraussetzungen.

Dabei spielt nicht nur die Reproduzierbarkeit eine Rolle, sondern vor allem auch die absolute Genauigkeit, da mit dem AFM quantitative Messungen durchgeführt werden sollen. Diese sehr hohe Bewegungsauflösung ist nur möglich, weil es bei der Bewegung der Piezoantriebe keine klassischen mechanischen Komponenten gibt, die Reibung oder mechanisches Spiel besitzen.

Da das sechssachsige Positioniersystem zudem kompakte Abmessungen hat, lässt es sich auch gut im AFM integrieren und sorgt zum einen für die exakte Positionierung der Probe im Messbereich sowohl in x- und y- als auch in z-Richtung. Zum anderen dienen die drei rotatorischen Achsen zur Kompensation parasitärer Winkelfehler. Unterstützt wird die große Positioniergenauigkeit außerdem durch die hohe Resonanzfrequenz des Gesamtsystems von über 1,4 kHz (bei 300 g Last), was die Messung gut von externen, akustischen Störungen entkoppelt.



Abb. 3 Sechssachsiges, piezobasiertes Positioniersystem für die Probe (Bild: PI)

Sensorik

Die PTB setzt bei dem neuen Rasterkraftmikroskop externe differentielle Interferometer ein, um extrem hochauflösend die Bewegungen zwischen dem AFM-Antastsystem und der Probe auf dem sechssachsigen Positioniersystem direkt in allen sechs Freiheitsgraden bestimmen zu können.

Damit spielen auch zwischen der bewegten Plattform des Piezotisches und der Probe auftretende Störungen wie Drift oder elastische Verspannungen keine Rolle mehr, da sie vom Interferometer direkt gemessen werden, was sich ebenfalls positiv auf die Linearität der AFM-Messung auswirkt. Darüber hinaus liefern die Interferometer Messsignale höchster Auflösung [10 pm] und Linearität bei sehr hoher dynamischer Bandbreite.

Die Interferometersignale werden über einen seriellen Datenstrom an den von PI stammenden Digital-Controller vom Typ E-712 übertragen. Dieser Controller lässt sich perfekt auf das Positioniersystem abstimmen und enthält eine komplexe Fehlerkompensation des sechssachsigen Systems. Der Controller bietet fein abgestimmte Linearisierungsalgorithmen für extrem gleichmäßigen Lauf und erlaubt schnelle Vorschubbewegungen mit maximaler Kraft.

Der gemeinsame Einsatz von Parallelkinematik und interferometrischer Messung aller sechs Freiheitsgrade ermöglicht eine Korrektur von ungewolltem Übersprechen der Bewegung (z. B. durch externe Krafteinwirkung) in eine andere Achse, die über entsprechende Algorithmen im Controller in Echtzeit aktiv ausgeführt wird.

Vor allem die direkte Positionsmessung an der Position des AFM-Antastsystems ist mit den kapazitiven Sensoren, die im Tisch integriert sind, nicht möglich. Diese sind aber für die Initialisierung vor Beginn der Messung wichtig:

Bei der Initialisierung werden zunächst die absolut messenden internen kapazitiven Sensoren des Piezotisches verwendet, um eine definierte Startposition anzufahren. Dann wird der Regelkreis des Piezotisches über die externen Interferometer geschlossen. Diese sind rückführbar auf PTB-Standards, aber messen nur Bewegungen und keine absoluten Positionen.

Auch das Umschalten zwischen interner (kapazitiver) und externer (interferometrischer) Istwert-Erfassung ist mit dem Digital-Controller E-712 (Abb. 4) möglich. Auf diese Weise lässt sich eine hochpräzise Messung der Oberflächentopographie realisieren.



Abb. 4 Digitaler Piezocontroller für mehrere Achsen. Auch das Umschalten zwischen interner (kapazitiver) und externer (interferometrischer) Istwert-Erfassung ist möglich (Bild: PI)

Bei der PTB ist man von der gewählten Lösung überzeugt und zurzeit wird das neue AFM aufgebaut. Dabei konnte man sich auch beim Antrieb für die „Grob“-Annäherung der Messspitze an die Probe von den Vorteilen piezobasierter Antriebslösungen überzeugen. Treibende Kraft ist hier ein sogenannter Schreittrieb. Diese NEXLINE[®] Antriebe erzeugen den Vortrieb durch die Kombination von Längs- und Scherpiezos, also Piezoaktoren mit unterschiedlichen Bewegungseigenschaften. Entsprechend angesteuert sind damit dann sowohl Klemm- als auch Schubbewegungen realisierbar, die an den Gang eines Vierfüßlers erinnern.

Dieser Antrieb wird genutzt, um vor Beginn der Messung die AFM-Spitze auf Arbeitsabstand an die Probe heranzufahren. Damit kann die AFM-Spitze über den gesamten Weg von mehreren Millimetern mit Nanometer-Genauigkeit verfahren werden. Nach der Annäherung muss der Antrieb sehr stabil stehen, um keine zusätzlichen höherfrequenten Schwingungen zwischen dem Kopf und dem Sechssachs-Positioniersystem zu erzeugen, die vom Positioniersystem nicht mehr vollständig ausgeglichen werden können.

Über die PTB

Die Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB), Braunschweig und Berlin, ist das nationale Metrologie-Institut mit wissenschaftlich-technischen Dienstleistungsaufgaben. Sie betreibt Grundlagenforschung und Entwicklung in der Metrologie als Basis für alle ihre Aufgaben in den Bereichen Bestimmung von Fundamental- und Naturkonstanten, Darstellung, Bewahrung und Weitergabe der gesetzlichen Einheiten des SI, Sicherheitstechnik, Dienstleistung und Messtechnik für den gesetzlich geregelten Bereich und die Industrie sowie für den Technologie-Transfer.

Die eigene Grundlagenforschung unter Anwendung neuester Technologien versetzt die PTB langfristig in die Lage, die weltweit anerkannte Kompetenz in der Metrologie zu sichern und auszubauen. Sie ist durch Kooperationen mit Universitäten, anderen Forschungseinrichtungen und der Industrie in die deutsche Forschungslandschaft eingebunden. Mit ihren internationalen Projektpartnern sichert die PTB langfristig die Vergleichbarkeit und Zuverlässigkeit von Messergebnissen überall auf der Welt.

Über PI

In den letzten vier Jahrzehnten hat sich Physik Instrumente (PI) mit Stammsitz in Karlsruhe zum führenden Hersteller von Positioniersystemen mit Genauigkeiten im Nanometerbereich entwickelt. Das privat geführte Unternehmen ist mit vier Sitzen in Deutschland und fünfzehn ausländischen Vertriebs- und Serviceniederlassungen international vertreten.

Über 850 hochqualifizierte Mitarbeiter rund um die Welt versetzen die PI Gruppe in die Lage, fast jede Anforderung aus dem Bereich innovativer Präzisionspositioniertechnik zu erfüllen. Alle Schlüsseltechnologien werden im eigenen Haus entwickelt. Dadurch kann jede Phase vom Design bis hin zur Auslieferung kontrolliert werden: die Präzisionsmechanik und Elektronik ebenso wie die Positionssensoren.

Die dafür benötigten piezokeramischen Elemente werden bei der Tochterfirma PI Ceramic in Lederhose gefertigt, einem der weltweit führenden Unternehmen auf dem Gebiet aktorischer und sensorischer Piezoprodukte.

Die PI miCos GmbH in Eschbach bei Freiburg ist spezialisiert auf flexible Positioniersysteme für Ultrahochvakuum-Anwendungen sowie parallelkinematische Positioniersysteme mit sechs Freiheitsgraden und Sonderanfertigungen.

Autor



Dipl.-Physiker Gernot Hamann, Leiter Key Account Management bei Physik Instrumente (PI)