

Tastsystem zur Bestimmung der instrumentierten Eindringhärte

Th. Frank, C. Maier, M. Kermann, A. Grün, A. Cyriax, J. Patel, Th. Ortlepp
Forschungsinstitut für Mikrosensorik und Photovoltaik GmbH, Konrad-Zuse-Straße 14, D-99099 Erfurt, Deutschland

Zusammenfassung

Die mechanische Charakterisierung dünner Schichten ist für viele Anwendungen wichtig. Zur Bestimmung der Härte stehen verschiedene Verfahren zur Verfügung. Im vorliegenden Beitrag wird die Nanoindentierung beschrieben, auch instrumentierter Eindringversuch genannt. Der Eindringkörper ist eine Diamantspitze mit bekannter Geometrie, welche in die zu prüfende Oberfläche hineingedrückt wird. Aus der kontinuierlich gemessenen Kraft in Abhängigkeit vom Eindringweg können die Größen: Härte und reduziertes Elastizitätsmodul bestimmt werden. Beschrieben wird eine neue Sensoranordnung. Zwei übereinander liegende Weg-Kraftsensoren nehmen die Kennlinie auf. Dadurch, dass beide Messstrecken und die Messkraft auf einer Linie liegen, genügt die Anordnung dem „Abbeschen Komparatorprinzip“. Als Sensor wird ein siliziumbasierter 3D-Kraftsensor mit 4 Messbrücken verwendet.

Keywords: Instrumentierte Eindringhärte, Kraftsensor, piezoresistiv, Silizium, Nanoindenter

Einleitung

Die mechanische Charakterisierung dünner Schichten ist für viele Anwendungen wichtig. Zur Bestimmung der Härte stehen verschiedenen Verfahren zur Verfügung. Die Härteprüfung nach Vickers oder nach Rockwell sind in der Industrie die bekanntesten [1]. Weniger häufig verwendet wird die Universalhärte nach Martens. Bei diesem Verfahren werden während der Belastungs- und Entlastungsphase kontinuierlich die Kraft und die Eindringtiefe gemessen. Die Nanoindentierung, auch instrumentierter Eindringversuch, ist diesem Verfahren angelehnt, findet aber in viel kleinerem Maßstab statt. Der Eindringkörper ist eine Diamantspitze mit bekannter Geometrie, welche in die zu prüfende Oberfläche hineingedrückt wird. Aus der kontinuierlich gemessenen Kraft in Abhängigkeit vom Eindringweg können die Größen:

- die Härte eines Materials als Quotient der Maximallast und der projizierten Kontaktfläche,
 - der reduzierte Elastizitätsmodul und
 - das Kriechen
- bestimmt werden.

Durch den nur minimalen Eindruck ist es möglich ein Mapping zur Untersuchung der Variation der mechanischen Eigenschaften über einen größeren Probenabschnitt durchzuführen. Insbesondere können die mechanischen Eigenschaften von Korn- und Phasengrenzen bestimmt werden.

Verfügbare Messgeräte besitzen deshalb hochauflösende Kraft- und Wegsensoren. Wegen den hohen Anforderungen sind diese sehr aufwendig gestaltete und benötigen zudem sehr präzise Führungen in einem sehr steifen Gestell.

Der Beitrag stellt einen miniaturisierten Kraftwegsensor zur Bestimmung der instrumentierten Eindringhärte vor.

Das Funktionsprinzip

Der Messbereich für die Prüfkraft reicht bis 100 mN, für den Wegsensor sind maximal 5 µm erforderlich. Das Messsystem wird mit zwei kombinierten Kraft-Weg-Sensoren realisiert. Diese sind übereinander angeordnet und durchdringen sich gegenseitig. Der Eindringkörper, ein Berkovich-Diamant auf einem Stahlstab, ist am oberen Kraftsensor befestigt. Er durchdringt den unteren Kraftsensor berührungslos, welcher nur als Wegsensor verwendet wird. Der obere Sensor misst die auf den Diamanten wirkende Kraft und den von System zurückgelegten Weg, abzüglich der Eindringtiefe. Der untere Sensor und auch der nachgiebigere misst nur den Gesamtweg. Aus beiden Daten kann die gesamte Kraft-Eindringtiefe-Kurve berechnet werden. Auch der Aktor zur Generierung der Kraft kann über den unteren Sensor geregelt werden.

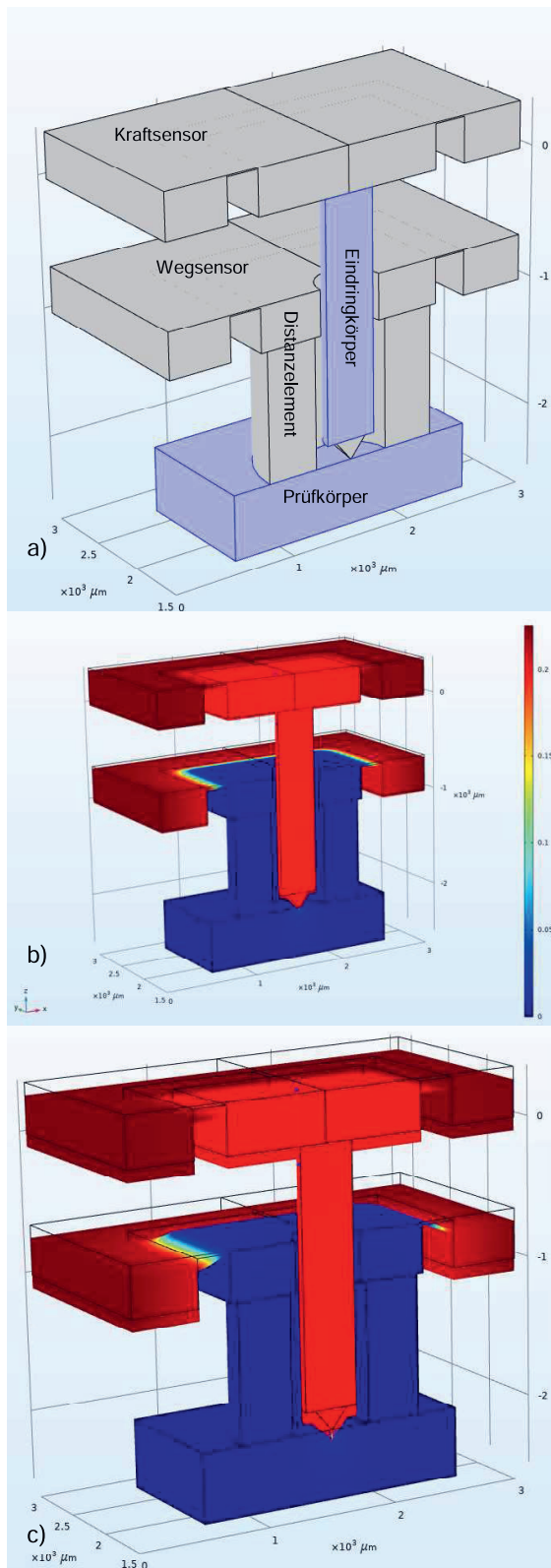


Abb. 1: Illustration des Funktionsprinzips, a) geometrischer Aufbau, b) Anfang der Bewegung, c) Abschluss des Eindringversuchs.

Der Vorteil dieser Lösung ist der kompakte und doch hoch präzise Aufbau.

Dadurch, dass beide Messstrecken und die Messkraft auf einer Linie liegen, genügt die Anordnung dem „Abbeschen Komparatorprinzip“. Benannt wurde es nach Ernst Abbe, der es als Erster beschrieben hat.

Liegen die am Prüfling zu messende Strecke und der Maßstab (Maßverkörperung) des Messgerätes nicht in einer Linie, können im Messgerät Kippfehler (sogenannte Kippfehler erster Ordnung) auftreten. Diese hängen vom Spiel der Führung quer zur Bewegungsrichtung ab und sind prinzipiell nicht zu vermeiden. Die beiden Sensoren sind ausschließlich durch ein Festkörpergelenk spielfrei geführt.

Die Kraftsensoren sind aus Silizium aufgebaut und beinhalten vier piezoresistive Messbrücken an jeder Seite einer Biegeplatte mit einem biegesteifen Zentrum. Diese können sowohl Kraft und Weg in Richtung der Eindringtiefe als auch die Verkipfung messen und so die Qualität der Messung bewerten.

Dadurch, dass die beiden Sensoren auf engem Raum angeordnet sind, werden Abweichungen, die außerhalb entstehen nahezu vollständig kompensiert. Dies sind im Wesentlichen Abweichungen in der Führung und in der Positionssteuerung.

Die Abb. 1 zeigt den prinzipiellen Aufbau des Systems „Nanoindenter“. Dieses System ist in der Lage Betrag und Winkel eines Kraftvektors zu bestimmen. Durch die Dicke der Biegeplatte wird die Empfindlichkeit auf Weg, bzw. Kraft definiert.

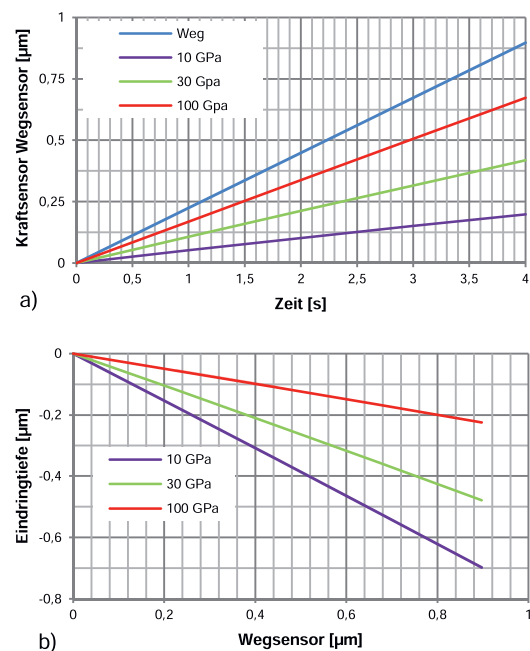


Abb. 2: Messvorgang Nanoindenter

Der Wegsensor ist in Richtung hoher Nachgiebigkeit, der Kraftsensor in Richtung hoher Stei-

figkeit optimiert. Beide Sensoren sind fest über einen Verdrahtungsträger mit einander verbunden. Das Antriebssystem ist so in der Lage beide Sensoren gleichförmig auf den Prüfkörper zu bewegen. Dabei ist im biege steifen Zentrum des Kraftsensors der Eindringkörper mit der Diamantspitze verankert. Der Wegsensor ist ein Distanzelement, welches mit dem Prüfkörper in Kontakt steht.

Der Messvorgang beginnt, sobald Diamantspitze und Distanzelement den Prüfkörper berühren. Der Wegsensor nimmt den Gesamtweg des Systems auf. Der Kraftsensor hingegen nur die Differenz aus dem Gesamtweg und der Eindringtiefe des Diamanten. Die Abb. 2 zeigt den Messvorgang am Beispiel variierender Prüfkörper hinsichtlich ihres Elastizitätsmoduls. Abb. 2a zeigt die Rohdaten bei identischer Zeitbasis. Der Weg ist bei allen Prüfungen identisch. Anschließend werden die Daten, die Differenz aus dem Gesamtweg und der Eindringtiefe des Diamanten, über den Weg aufgetragen. Zu erkennen ist die wegabhängige Eindringtiefe. Nach einer Kraftkalibrierung ist auch eine Darstellung der Eindringkraft über den Weg möglich.

Die Abb. 3 zeigt die Rohsignale des ersten unkalibrierten Messdurchgangs. Das Signal wird geglättet, wenn das Signal des Kraftsensors (Indenter) über dem Gesamtweg aufgetragen wird.

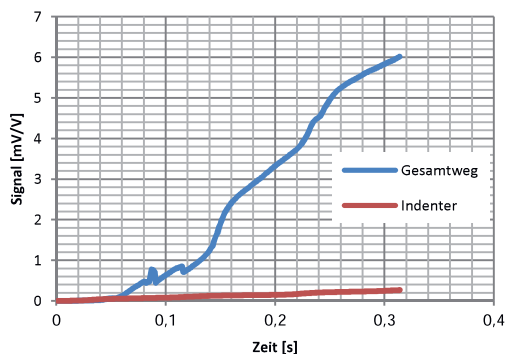


Abb. 3: Erster Messversuch ohne Kalibrierung

Aufbau Nanoindenter

Die Abb. 4 zeigt den verwendeten Aufbau des Indenter-Sensors im Detail. Auf einem Verdrahtungsträger ist von unten der Wegsensor durch Thermokompressionsbonden [2] gefügt und elektrisch kontaktiert. Wegen der guten mechanischen Eigenschaften dieses Verfahrens zeigte es sich als optimal, da neben der elektrischen Kontaktierung, eine hohe positionstreue und eine hohe mechanische Festigkeit gefordert wurde.

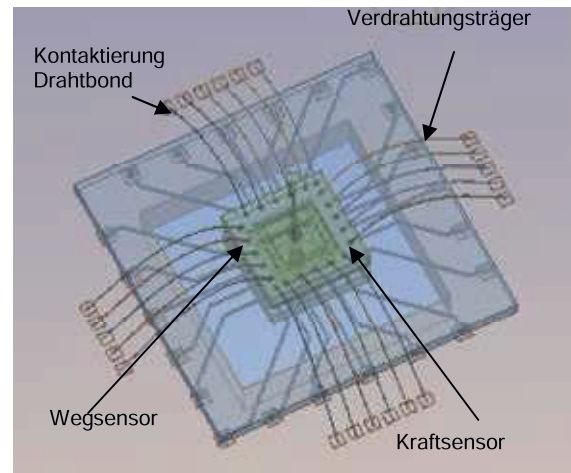


Abb. 4: Einzelheit: Aufgebaute Sensoren auf dem Verdrahtungsträger

Auf Underfill-Material konnte deshalb vollständig verzichtet werden. Die Gold-Stud-Bumps sind in der Abb. 5 gezeigt.

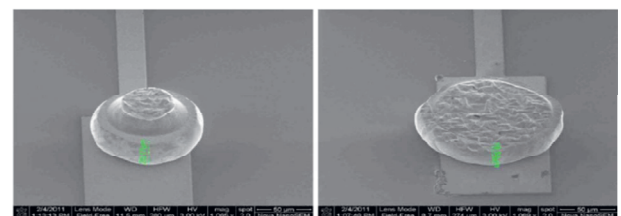


Abb. 5: Gold-Stud-Bumps, vor dem Fügen (links), nach dem Fügen (rechts)

Durch die hochohmigen in Reihe geschalteten Messwiderstände ist eine Fehleranalyse durch reine Widerstandsmessung der Schaltung nicht effektiv. Daher wurde der *Flip-Chip*-Aufbau mit 22 Kontakten mit einem Ultraschallmikroskop überprüft. Dieses Verfahren eignet sich hervorragend zur Abschätzung der Zuverlässigkeit. Ein fehlerhafter Kontakt ist in der Abb. 7 gezeigt.

Der obere Wegsensor wird auf den Verdrahtungsträger geklebt. Über ein Flip-Chip-Verfahren wird der Verdrahtungsträger auf die Trägerleiterkarte gefügt. Der Wegsensor wird über lange Drahtbondbrücken mit der Leiterkarte (PCB) verbunden, siehe Abb. 4.

In der Abb. 8 ist die am Halter montierte Leiterkarte zu sehen

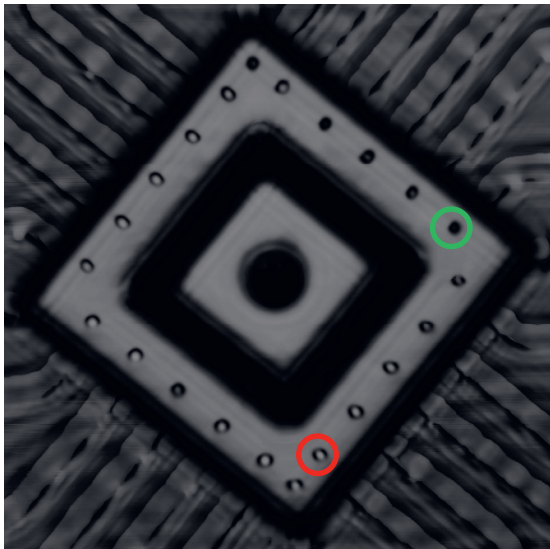


Abb. 6: Ultraschalluntersuchung zur Bestimmung der Bondqualität, eine helle Stelle bedeutet eine fehlerhafte Verbindung (rot), dunkle Stellen sind in Ordnung (grün)

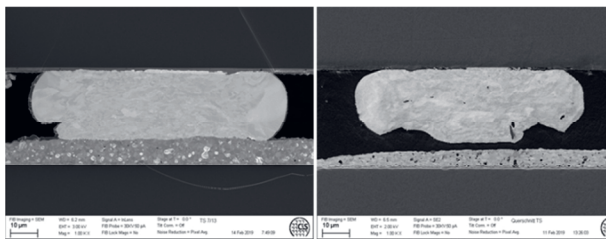


Abb. 7: Vergleich gute und unzureichende Bondung

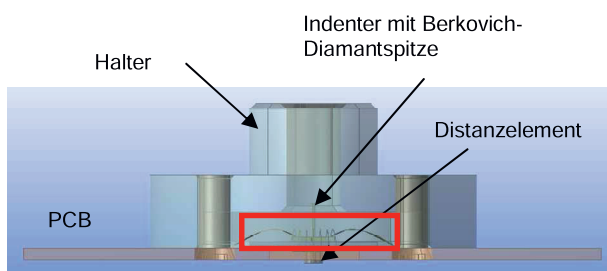


Abb. 8: Aufbau des Messsystems, Details sind in Abb. 9 gezeigt

Die Abb. 9a zeigt den realen Aufbau des Kraftsensors mit der Bohrung zur Aufnahme des Indenters mit der Berkovich-Diamantspitze. Abb. 9b zeigt den realen Aufbau des Wegsensors mit dem zylindrischen Distanzelement. Das Messsystem besitzt folgende Daten:

- Messspanne 30 mV/V
- Sensitivität 5 mV/(V μ m)
- Auflösung Weg 60 pm
- Auflösung Kraft 10 μ N

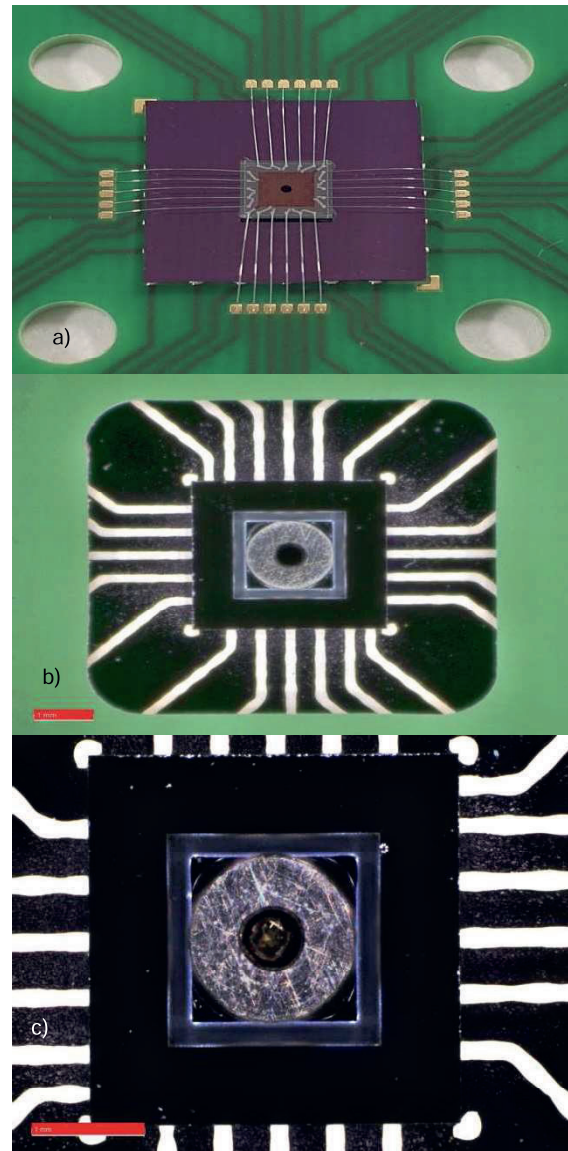


Abb. 9: a) Kraftsensor geklebt und drahtgebondet, b) Wegsensor mit Distanzelement, c) Sicht auf den Diamanten

Literaturnachweis

- [1] <https://de.wikipedia.org/wiki/Härte>
- [2] S. Lohse, R. Schachler, Thermokompressionsbonden, <https://www.finetech.de/de/wissen/technical-paper-bonding/> thermokompressionsbonden/

Danksagung

Wir danken dem Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) und dem für Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF) für die finanzielle Unterstützung der Projekte AC-Brücke (MF150187), Dumbo (MF160051), Flip-Chip-DDS (49MF180034), SISI (MF150021) und 3D-Kraftsensor (MF140005).