

Herstellung von Teststrukturen zur Validierung zerstörungsfreier Prüfverfahren

Beatrice BENDJUS, Bernd KÖHLER, André STRIEGLER, Frank SCHUBERT
Fraunhofer Institut für zerstörungsfreie Prüfverfahren, Institutsteil Dresden

Kurzfassung. Bei der Entwicklung neuer zerstörungsfreier Prüfverfahren und bei der Verifikation ihrer Leistungsfähigkeit für schwierige Anwendungsfälle sollten Testproben verfügbar sein, die nach Art, Lage, Größe und Menge typischen Fehlern enthalten und nach Material und Geometrie mit den Bauteilen und Komponenten identisch sind oder ihnen nahe kommen. Häufig ist dies nicht der Fall, so dass die Herstellung von Referenzproben mit definiert eingebrachten Defekten und Strukturen erforderlich ist. Dies erweist sich jedoch als besonders schwierig für höher auflösende Verfahren, da die Teststrukturen entsprechend fein und auffindbar sein müssen. Es gibt kaum Verfahren, diese in beliebigen Materialien gezielt herzustellen.

In der hier vorgestellten Arbeit wird die Strukturierung von unterschiedlichen Materialien (Silizium, Metalle, Keramik) mittels Ionenfeinstrahlanlage (Focused Ion Beam, FIB) beschrieben. Die Proben und ihre Testfehler wurden mit hochauflösenden ZfP Verfahren wie akustischer Mikroskopie (SAM), Röntgen-CT und akustischer Rasterkraftmikroskopie (AFAM) untersucht.

1. Einführung

Bei der Entwicklung neuer zerstörungsfreier Prüfverfahren bzw. ihrer Anwendung für neue Problemstellungen ist es vorteilhaft, die Methode an bekannten Referenzproben mit charakteristischen Fehlern zu testen. Hierzu gibt es eine Vielzahl an Kalibrierstandards und allgemein gebräuchlichen Vergleichsproben. Problematisch wird dieses Vorgehen bei hochauflösenden Prüfverfahren, da keine konventionellen mechanischen Bearbeitungstechnologien existieren, die definierte Strukturen im Mikrometer- und Nanometermaßstab realisieren können. Lasergestützte Verfahren bieten minimale Strukturgrößen von 50 Mikrometern und sind damit ebenfalls nicht für die Hochauflösung geeignet.

Strukturen in diesen Abmessungen lassen sich seit einigen Jahren mittels Ionenfeinstrahlanlage (Focused Ion Beam, FIB) herstellen. Bei diesen in der Regel als Zweistrahlanlagen ausgelegten Geräten gestattet der Ionenstrahl das Ab- und Auftragen von Material bei gleichzeitiger Beobachtung mit dem Elektronenstrahl. Letzteres entspricht dabei einem klassischen Rasterelektronenmikroskop (REM) und bietet im Vergleich mit einer mechanischen oder Laserbearbeitung den einzigartigen Vorteil, die Teststruktur zielgenau zu präparieren und die Herstellung fortwährend bis zum gewünschten Ergebnis überwachen zu können. Die Auflösung hinsichtlich der Strukturierung reicht dabei bis zu einigen hundert Nanometern.

Derart hergestellte Strukturen dienen bei der hier beschriebenen Arbeit der Überprüfung des Auflösungsvermögens verschiedener ZfP-Verfahren. Für die akustische Mikroskopie werden etwa 15 μm lateraler Auflösung herstellerseitig zugesagt, bei der Röntgen-CT bewegt sich dieser Wert bei 1/1000 der Probenabmessung, aber $> 5\mu\text{m}$. Die

akustische Rasterkraftmikroskopie, deren Auflösungsvermögen in dem für die Rastersondenverfahren charakteristischen Bereich von wenigen Nanometern liegt, sollte auf ihr Potential zur Detektion vergrabener Strukturen und Defekte untersucht werden. Derartige Fehler stellen vor allem in der Halbleiterindustrie ein massives Qualitätsproblem dar. Für ein klares und bekanntes Fehlerbild sind zunächst künstliche Testfehler notwendig, da die realen Defekte, wie beispielsweise Voids in Leitbahnen, statistisch verteilt und nicht zerstörungsfrei lokalisierbar sind. Auch hierfür bietet die Strukturierung mittels FIB Möglichkeiten.

2. Experimente und Ergebnisse

2.1 FIB-Strukturierung

In Abbildung 1 ist die für die hier beschriebenen Präparationen verwendete Ionenfeinstrahlanlage dargestellt.

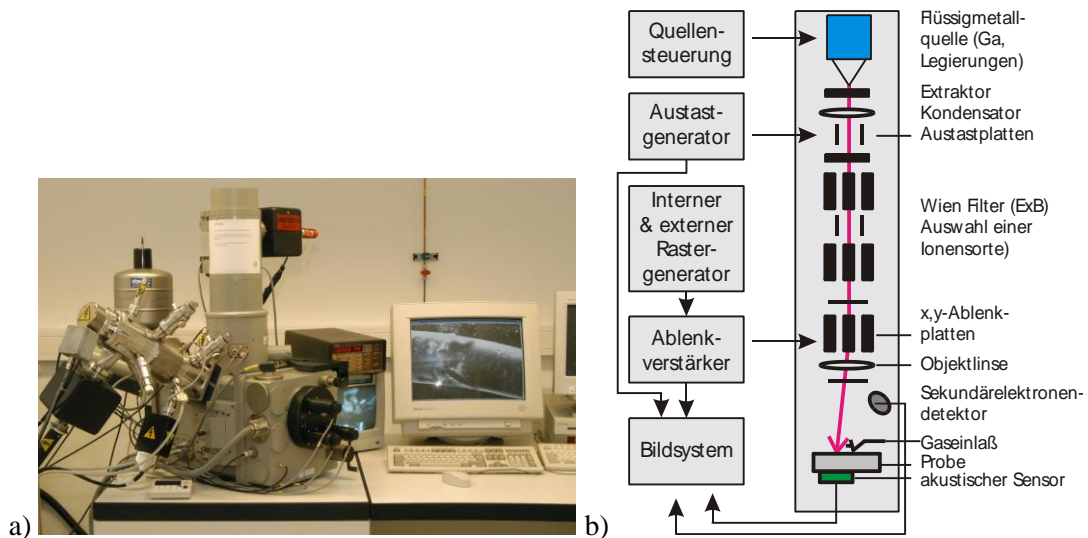


Abbildung 1. Focused Ion Beam (FIB):
a) Verwendete Zweistrahlanlage, b) Prinzipieller Aufbau der der Ionensäule.

Mittels dieser Anlage wurden beispielhaft die folgenden Teststrukturen in verschiedene Werkstoffe eingebracht. Abbildung 2 zeigt eine kleine Grabenstruktur in Keramik.

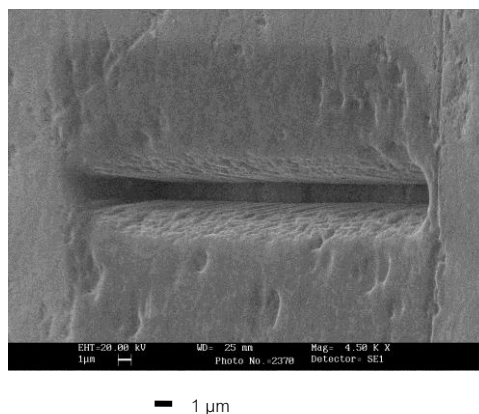


Abbildung 2. Keramik mit FIB-Teststruktur.

Aufgrund der Strahlcharakteristik und der Eigenheiten des Sputterprozesses verjüngen sich die Strukturen in Richtung Materialtiefe. Für die Herstellung einer quadratischen Ätzstruktur in einem Metall-Bauteil, wie sie in Abbildung 3 zu sehen ist, werden je nach abzutragendem Volumen einige Minuten bis einige Stunden benötigt. Die Zeitdauer skaliert linear mit dem abgetragenen Gesamtvolumen und damit mit der dritten Potenz der Linearabmessungen. Aus der Verdoppelung der Linearabmessungen resultiert somit eine 8-fach höhere Bearbeitungszeit. Die Herstellung mehrerer Testfehler oder ganzer Strukturmuster lässt sich durch die Nutzung spezieller Programme weitgehend automatisieren.

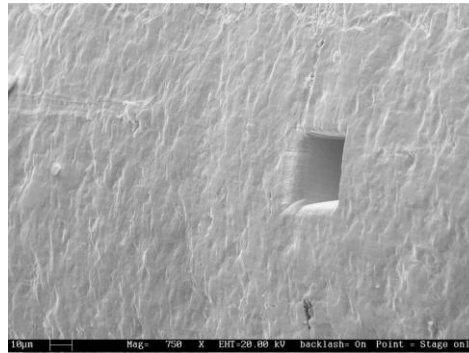


Abbildung 3. Metall mit FIB-Teststruktur (30x30x30 µm³).

Es wurden mehrere verdeckte Strukturen in Halbleitermaterialien gefertigt. Beispielhaft zeigt Abbildung 4 eine Matrix aus neun Membranen, die in eine Ausgangsmembran aus Silizium mittels FIB geätzt wurde. Die neun Membranen haben eine Dicke von 30 nm bis 270 nm.

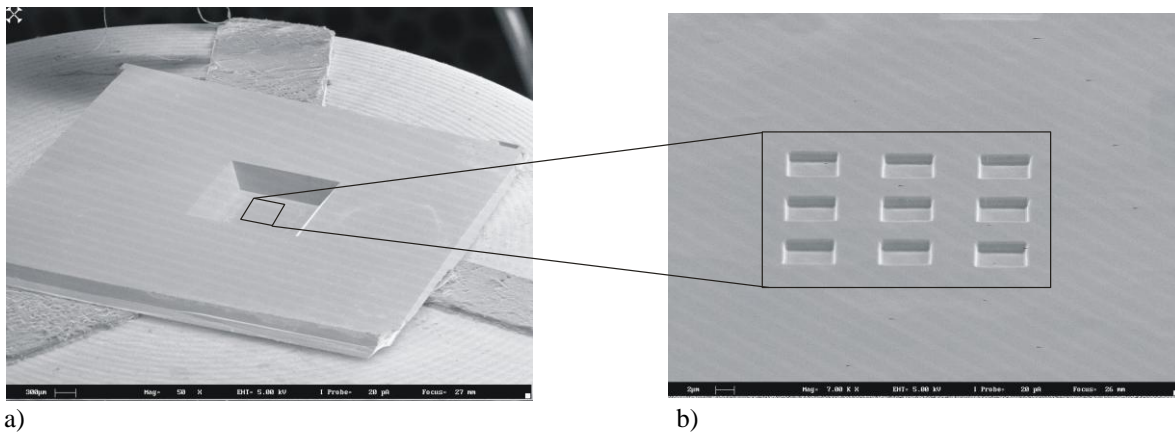


Abbildung 4. Si-Membranen: a) Silizium-Substrat mit Membran (Dicke 2-2.7 µm), b) Membrangruppe durch FIB-Abtrag in die Rückseite der Ausgangsmembran (Dicke der Einzelmembranen 30-270 nm).

2.2 SAM an Keramik

Die akustische Mikroskopie (Scanning Acoustic Microscopy, SAM) ist ein zerstörungsfreies Prüfverfahren, mit dem man tiefenaufgelöst Mikrostrukturen abbilden und Delaminationen, Poren und Risse darstellen kann. Die zu untersuchende Probe wird dabei in Tauchtechnik mit hochfrequenten fokussierten Ultraschallwellen beaufschlagt, die in das Bauteil eindringen und mit inneren Grenzflächen wechselwirken. Durch Scannen in lateraler und vertikaler Richtung können orts aufgelöste mikroskopische Bilder und

Tiefenprofile der Probe in Reflexion und Transmission erstellt werden. Der wichtigste Kontrastmechanismus ist die Änderung der akustischen Impedanz zwischen benachbarten Medien. Dieser Impedanzsprung ist bei Delaminationen, Poren und Rissen besonders groß, so dass diese mit hohem Kontrast abgebildet werden. Abbildung 5 zeigt das hier verwendete Gerät.

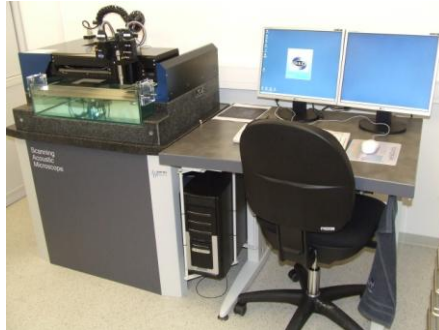


Abbildung 5. Akustisches Reflexions- und Transmissionsmikroskop EVOLUTION II der Firma SAM TEC für Prüffrequenzen von 10 – 400 MHz.

Die in Abbildung 2 dargestellte Struktur war Teil einer Gruppe von horizontalen und vertikalen Testfehlern (Abbildung 6). Die Markierung am Probenrand diente der Positionierung und dem Wiederfinden der Struktur beim Wechsel von der FIB zum Mikroskop.

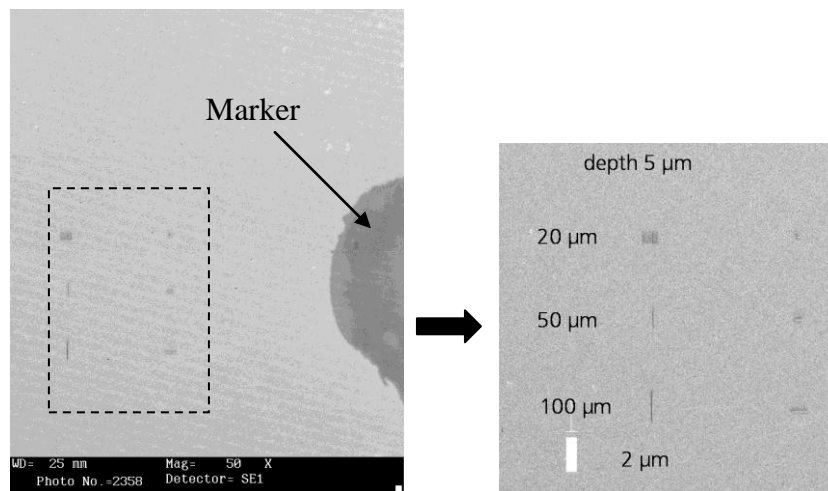


Abbildung 6. REM-Aufnahmen der mittels FIB hergestellten Teststrukturen in einer Keramik.

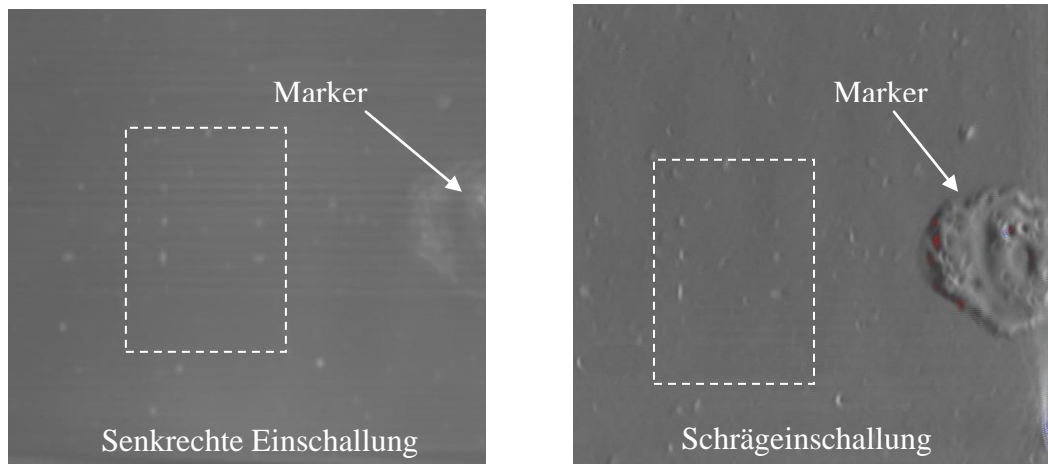


Abbildung 7. Abbildung der Teststrukturen mit akustischer Mikroskopie bei unterschiedlichen Einschallwinkeln.

In Abbildung 7 ist das Resultat der SAM-Messungen dargestellt, wobei die schräge Einschallung einen deutlichen Informationsgewinn bot.

2.3 Röntgen-CT an Metall

Bei der Röntgen-Computertomographie (CT) werden mittels Röntgen-Kegelstrahl und digitalem Detektor ca. 800 Winkelprojektionen des Prüfkörpers aufgenommen. Parallel erfolgt die Rekonstruktion des 3D-Datensatzes, dessen Grauwerte die Dichteverteilung innerhalb des Objekts repräsentieren. Die an dem in Abbildung 3 dargestellten Testfehler aufgenommenen CT-Bilder sind nachstehend in Abbildung 8 wiedergegeben. Wichtig war hierbei, dass die Fehler direkt in die Objekte eingebracht werden konnten, für die eine schnelle CT-Prüfung zu entwickeln war. Ohne Referenzfehler ist deren Leistungsnachweis nicht repräsentativ.

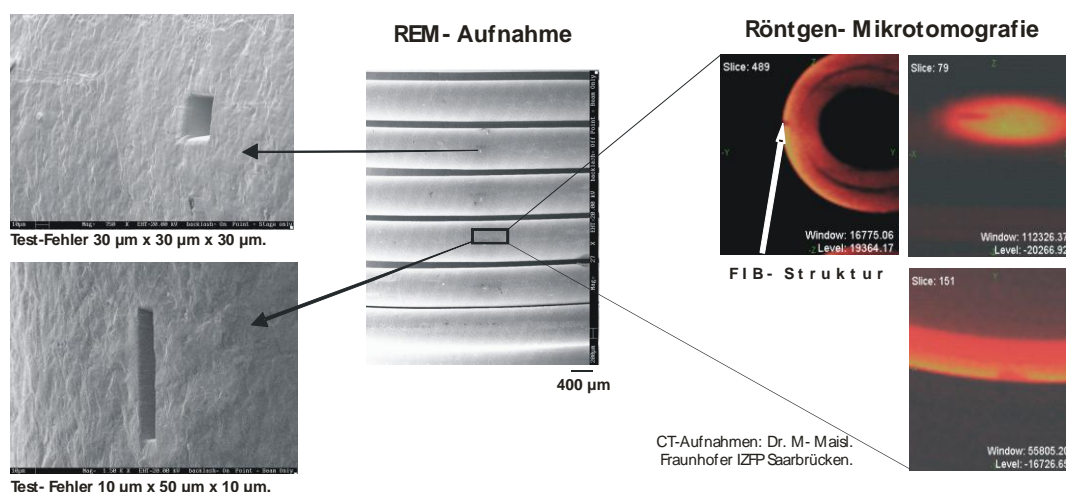
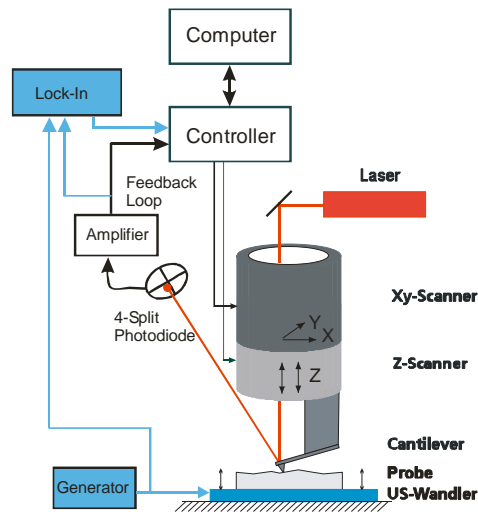


Abbildung 8. Abbildung der Teststrukturen in einem Metallbauteil mit Röntgen-CT.

2.4 AFAM an Halbleitermaterialien

Bei der akustischen Rasterkraftmikroskopie wird die Probe mit Ultraschall beaufschlagt und als Ganzes zu Schwingungen angeregt. Durch das Scannen der Oberfläche im

Kontaktmodus entsteht neben dem klassischen AFM-Höhenbild ein Ultraschallbild, welches Unterschiede in den elastischen Eigenschaften sichtbar macht. Abbildung 9 zeigt den Versuchsaufbau schematisch.



Blau:
AFAM-Komponenten

Abbildung 9. Prinzipieller Aufbau eines akustischen AFM.

Auf diese Weise sollten verdeckte Strukturen und Fehler unter der Oberfläche erkennbar sein, da sie eine Veränderung der elastischen Wechselwirkung zwischen Probe und Spitze hervorrufen. Idealerweise sollte eine entsprechende Testprobe keine oder wenig Topographie aufweisen, um im Ultraschallbild die auch dort erkennbaren topographischen Details sauber von den elastischen Merkmalen zu trennen. Aus diesem Grund schien die verwendete Silizium-Membran (Abbildung 4), in die von der Rückseite Strukturen eingebracht worden sind, besonders geeignet. Mittels AFAM wurde die sehr glatte Vorderseite untersucht. Das Ergebnis zeigt Abbildung 10.

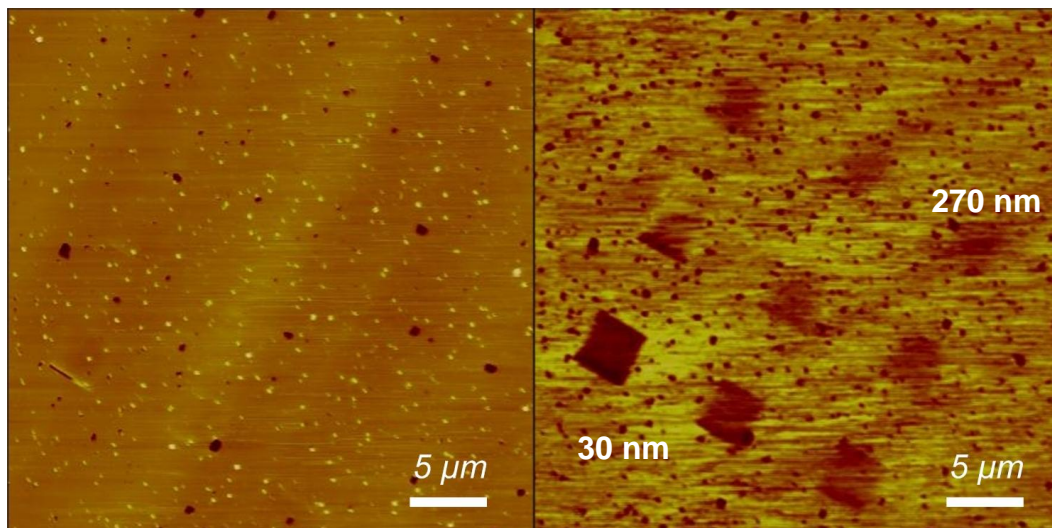


Abbildung 10. Abbildung der Membrangruppe mittels AFAM von der glatten Vorderseite der Si-Membran: Links - klassisches AFM-Topographiebild; Rechts - AFAM-Amplitudenbild.

Im Höhenbild (Abbildung 10 links) sind die unter der Oberfläche liegenden Strukturen nicht zu erkennen. Demgegenüber werden die neun mittels FIB hergestellten Membranen

im AFAM-Bild (Abbildung 10 rechts) sicher nachgewiesen. Dabei ändert sich die Amplitude in Abhängigkeit von der Membrandicke. Selbst die 270 nm dicke Membran ist noch gut erkennbar.

3. Zusammenfassung

In den dieser Arbeit zugrundeliegenden Untersuchungen wurden in verschiedene Materialien künstliche Testfehler bzw. Teststrukturen mittels FIB-Technik eingebracht, die anschließend mit ausgewählten ZfP-Verfahren charakterisiert wurden. Ziel war es, das Potential der Methoden hinsichtlich Auflösungsvermögen und Detektion verdeckter Strukturen aufzuklären. Ersteres konnte für die akustische Mikroskopie und Röntgen-CT durch die Abbildung von Strukturen mit Abmessungen von wenigen Mikrometern bestimmt werden. Mit AFAM wurde der Nachweis von Subsurface-Strukturen erbracht. Hierzu soll die Methode in Zukunft auch an realen Fehlern der Halbleitertechnik angewendet werden.