

Klaus-Jürgen Wolter, Martin Oppermann, Henning Heuer, Bernd Köhler, André Striegler, Frank Schubert, Udo Netzelmann, Peter Krüger und Norbert Meyendorf

## **Zerstörungsfreie Prüfverfahren für strukturintegrierte elektronische Systeme – Forderungen und Möglichkeiten**

Für die Sicherheit und Zuverlässigkeit elektronischer Systeme im Langzeitbetrieb – z.B. in Faserverbundwerkstoffe integrierter Sensorsysteme – ist es notwendig, neuartige Methoden zur zerstörungsfreien Prüfung (ZfP) zu entwickeln. Diese müssen mit Volumenauflösungen besser als ein Mikrometer Voxel (Voxel: Volumenelement) arbeiten.

Der Beitrag gibt einen Überblick über den gegenwärtigen Entwicklungsstand und stellt Tendenzen zukünftiger Entwicklungen dar. Verschiedene mikroskopische Verfahren auf der Basis von Ultraschall, Röntgenstrahlen, Laserfluoreszenz und Infrarotlicht, optische Nahfeldtechniken, Nano-Raman-Mikroskopie, akustische Rasterkraftmikroskopie und andere Techniken werden vorgestellt und anhand von Beispielen erläutert.

### **1. Motivation**

Die Geschwindigkeit der Entwicklung neuer integrierter Schaltkreise wird auch in Zukunft sehr hoch sein. Dabei wächst die Integrationsdichte, die Dimensionen werden kleiner und die Anzahl der Ein-/Ausgabe-Schnittstellen wird größer. Diesen Trend beschreibt das Moore'sche Gesetz. Dem gegenwärtigen Entwicklungsstand entsprechen Strukturgrößen von 75 nm; in einigen Jahren werden Strukturgrößen von 25 nm und weniger erreicht sein.

Die Aufbau- und Verbindungstechnik muss dieser Entwicklung folgen. Strukturen kleiner als ein Mikrometer werden benötigt, um aus hochintegrierten Mikrochips elektronische Systeme herstellen zu können. Für die Beherrschung einer großen Anzahl Kontakte, geringer Abstände, großer Leistungsaufnahme und hohen Frequenzen ist daher die Entwicklung neuer Aufbau- und Verbindungstechniken notwendig. Diese Forderungen sind in verschiedenen technologischen Entwicklungsplänen publiziert, z.B. IPC-Roadmap 2004/2005 [1, 2] und iNEMI Technology Roadmaps, 2004 Edition [3]. Um zukünftigen Ansprüchen zu genügen, müssen Nanometer-Dimensionen beherrscht werden. Neue Aufbau- und Verbindungstechniken mit erheblichem Potential sind z.B. System-on-Chip (SoP), Multi-Chip-Module (MCM), System-in-Package (SiP) und System-on-Package (SoP).

Mit zunehmender Miniaturisierung gewinnen Schädigungsprozesse, Materialveränderungen und Defekte – wie Transport-Phänomene, Rekristallisation, Volumenänderungen und Kirkendall-Voidbildungen – an Bedeutung und verlangen neue Technologien. Abbildung 1 zeigt einige dieser Phänomene. Um solche Defekte detektieren zu können, werden neue Inspektionstechniken, neue

Testanlagen und neue Erkenntnisse über physikalische und chemische Effekte im Nanometer-Bereich benötigt. Für die Sicherheit und Zuverlässigkeit von elektronischen Systemen ist besonders bei Langzeitanwendungen notwendig, neuartige Methoden zur zerstörungsfreien Prüfung zu entwickeln. Dies gilt sowohl für die Entwicklung von zuverlässigen Technologien als auch für die 100%-Produktprüfung.

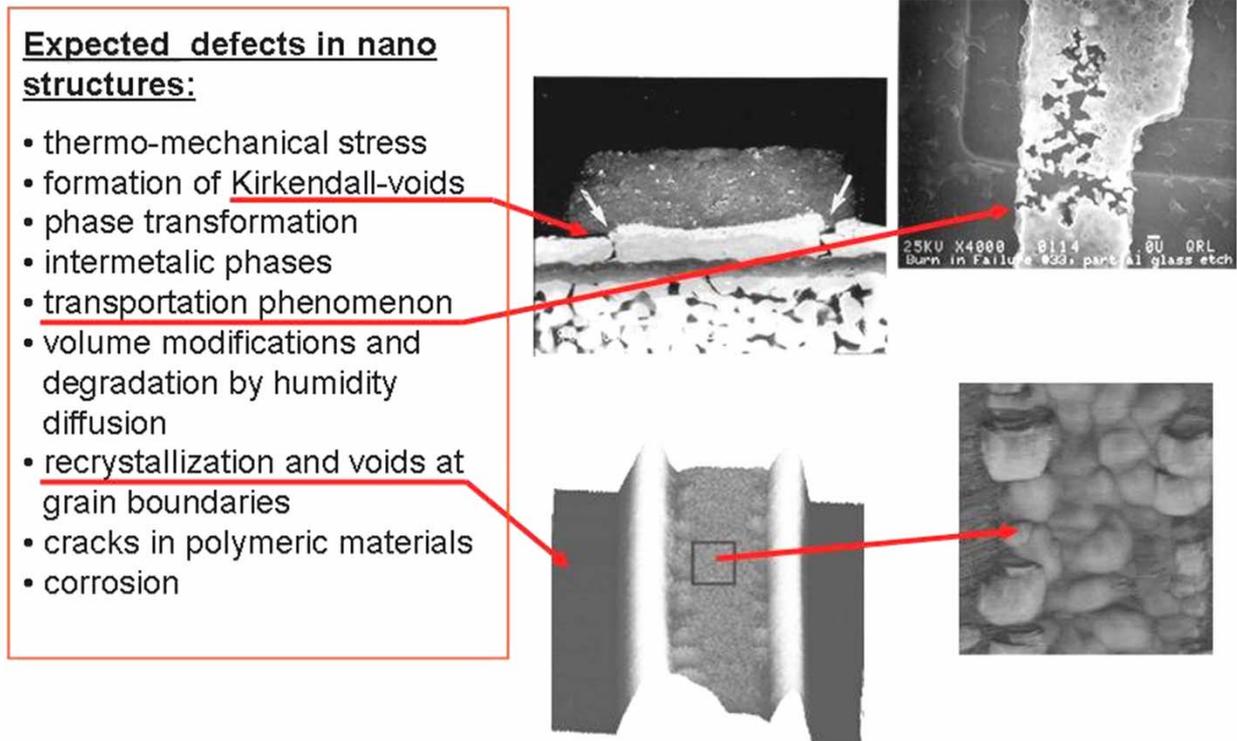


Abb. 1: Herausforderungen an die Nano-ZfP [4]

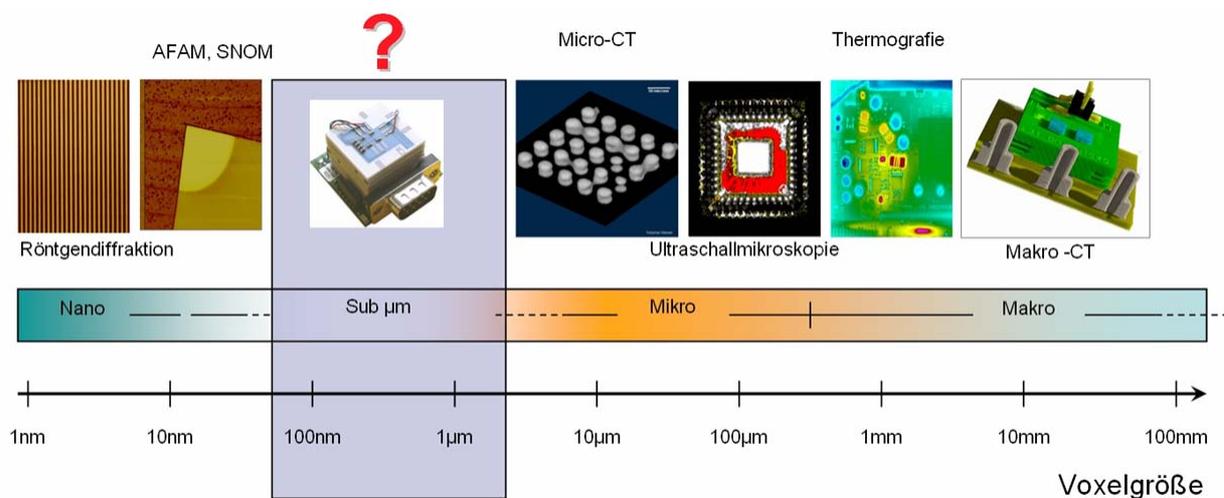


Abb. 2: Lücke zwischen derzeit verfügbaren ZfP-Methoden

Abbildung 2 zeigt verschiedene bildgebende Verfahren mit ihrem jeweiligen Auflösungsvermögen. Die technologische Lücke im Bereich zwischen etwa 100 nm und 10 µm stellt die Nano-ZfP vor besondere Herausforderungen.

## **2. Trends in der Mikro- und Nano-ZfP**

### **2.1 Neue Entwicklungen in der Röntgen-Computertomographie**

Die Röntgen-Computertomographie (CT) ist ein Verfahren zur Gewinnung dreidimensionaler Informationen über komplexe Strukturen mit Hilfe einer größeren Anzahl zweidimensionaler, unter verschiedenen Aufnahmewinkeln gewonnener Radiographien. Aufgrund der Fortschritte der Computertechnik – insbesondere auf dem Gebiet der Algorithmen – ist die CT heute ein leistungsstarkes, bezahlbares, schnelles Verfahren und geeignet, eine Vielzahl ausgedehnter Objekte zu inspizieren. Für viele Prüflinge, z.B. aus gegossenem Aluminium, stellt die CT das Mittel der Wahl dar. Ihre Anwendung wird gegenwärtig durch die Geschwindigkeit der Datengewinnung begrenzt. Aktuelle Entwicklungen im Rahmen der Fraunhofer-Gesellschaft widmen sich diesem Problem, um die CT auch als Werkzeug für die prozessintegrierte Prüfung anbieten zu können.

Qualitativ hochwertige dreidimensionale Abbildungen von Objekten können mittels Axialer 3D-CT gewonnen werden, für die nur eine einzige Drehung des Prüflings erforderlich ist. Allerdings ist die Methode für die topographische Abbildung flacher Objekte – beispielsweise von Leiterkarten – wenig geeignet. Bei großen Längenunterschieden ist der Dynamikbereich gegenwärtig verfügbarer Röntgendetektoren zu gering. Das Fraunhofer-Institut für Zerstörungsfreie Prüfverfahren, Institutsteil Dresden (IZFP-D), hat geometrische Messaufbauten entwickelt, um diese Längenunterschiede zu kompensieren. Die CT ist somit als Werkzeug für die dreidimensionale Inspektion von hochintegrierten Leiterkarten verfügbar. Dies gilt im klassischen Sinne, aber auch für die Chip-Verdrahtung. Als Nebeneffekt erlaubt dieser Messaufbau höchste Auflösungen für ausgedehnte Objekte ohne begrenzende Artefakte, wie sie von der herkömmlichen CT-Bildgebung bekannt ist. Eine neu entwickelte Methode erlaubt zudem, Qualitätsprüfungen über einen weiten Auflösungsbereich durchzuführen – von Mikrolötstellen im Bereich von einigen Mikrometern bis zu einigen 10 Mikrometern pro Voxel bei klassischen Leiterkarten.

Typische Probleme bei der Qualitätsprüfung von Lötstellen sind Vorhandensein und Größenverteilung von Poren. Mit dreidimensionalen Methoden können die räumliche Lage der Fehlstellen bestimmt und dadurch die Ergebnisse der bisher genutzten, zweidimensionalen Techniken weiter verbessert werden. Das Erkennen kritischer Fehler erhöht die Zuverlässigkeit der Erzeugnisse; die Bewertung von Poren als „unkritisch“ verbessert die Produktionsausbeute.

Die Prüfung der Leiterkarte auf zuverlässiges Funktionieren des Aufbaus kann in der Überwachung von Ausrichtung und Vollständigkeit der einzelnen Ebenen, aber auch der Form von Makro- und Mikro-Kontaktierungen bestehen. Abbildung 3 zeigt eine relativ großflächige, aber sehr dünne keramische Leiterkarte (5" im Quadrat, mit einer Dicke von etwa 500 µm, mit insgesamt 16 Schaltkreisen von etwa 3/4" Größe). Das entwickelte Verfahren ist in der Lage, jeden einzelnen Schaltkreis dreidimensional und mit ausreichender Auflösung zu prüfen, um die Ausrichtung und Größe jeder der fünf Lagen zu bewerten ohne die Leiterkarte als Ganzes zu zerstören. Die Unterscheidung der Ebenen ist extrem gut. Diese Methode ist geeignet, Leiterkarten jeglicher Größe mit großer Auflösung zu untersuchen, wenn spezielle Punkte hohen Zuverlässigkeitsanforderungen genügen müssen.

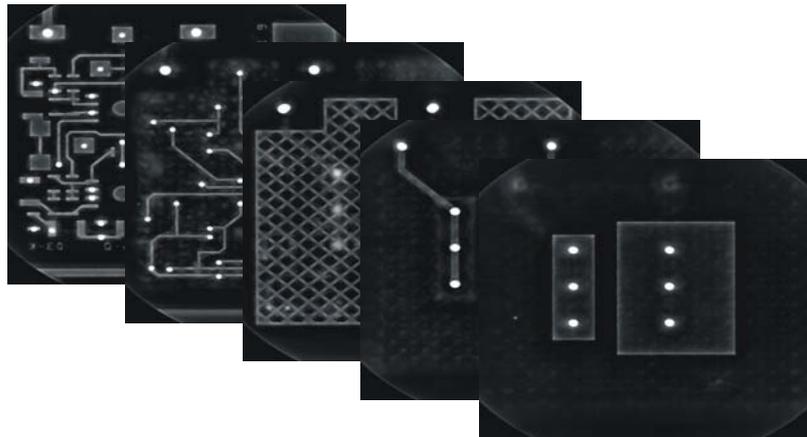


Abb. 3: Ebenen einer keramischen Mehrebenen-Leiterkarte (PCB: printed circuit board) mit einer Dicke von 500  $\mu\text{m}$  und einer Kantenlänge von etwa 15 mm; zu einem Feld aus 16 Elementen zusammengesetzt

## 2.2 Ultraschallmikroskopie

Die Ultraschallmikroskopie ist ein eingeführtes Verfahren, um interne Mikrostrukturen nicht-transparenter Festkörper sowie von Beschichtungen zu analysieren. Sie wird vielfach genutzt, um Risse und oberflächennahe Defekte in unterschiedlichen Materialien nachzuweisen. Bildgewinnung und -interpretation hängen in großem Maße von der Prüffrequenz und den Materialeigenschaften ab. Höchstauflösende Ultraschallmikroskope (SAM: Scanning Acoustic Microscopes) arbeiten im GHz-Bereich. Damit können Auflösungen im  $\mu\text{m}$ -Bereich erzielt werden; die Eindringtiefe ist jedoch sehr begrenzt. Prüfprobleme bei der Aufbau- und Verbindungstechnik verlangen eine Untersuchungstiefe im Bereich von 1 mm, so dass mit niedrigeren Frequenzen gearbeitet werden muss.

In Abhängigkeit von der konkreten Aufgabe – Flip-Chip, verkapselte Chips, Enthaltungen bei Klebeverbindungen, entweichende Unterfüller etc. – werden zumeist Wandler in einem Frequenzbereich zwischen 10 MHz und 150 MHz genutzt. Die Fokuslänge der Wandler muss dem Problem angepasst werden. Die Signalinterpretation gestaltet sich wegen des Auftretens verschiedener Wellenmoden, Modenkonversion und Mehrfachreflexionen in der Struktur häufig schwierig. Durch Modellierung der Wellenphänomene kann ein besseres Verständnis der Situation gewonnen werden.

Auf der Basis der Elastodynamischen Finiten Integrationstechnik (EFIT) wurde ein numerisches Modell des Ultraschallmikroskops entwickelt. EFIT diskretisiert die Integralform der elastodynamischen Grundgleichungen und ermöglicht damit einen stabilen, leistungsstarken und flexiblen Zeitbereichsalgorithmus auf einem zeitlich und räumlich gestaffelten Gitter. Für achsensymmetrische Probleme ist eine spezielle Version in zylindrischen Koordinaten (CEFIT) verfügbar. CEFIT bildet die Grundlage des Modells für das Ultraschallmikroskop. Abbildung 4 zeigt zur Demonstration der komplexen Wellenphänomene die Wechselwirkung eines fokussierten 25 MHz-Ultraschallimpulses mit einem wassergefüllten, kugelförmigen Hohlraum knapp unterhalb der Oberfläche eines festen Substrats (Zink). Mehr Beispiele und Details finden sich in [5].

Die Bilder in der obersten Reihe zeigen die im Wasservorlauf auf die Oberfläche zulaufende Wellenfront. Das erste Bild in der mittleren Reihe lässt die primäre P-Welle im Moment des Auftreffens auf die Oberfläche erkennen. Anschließend werden die reflektierte P-Welle, die in den

Festkörper eindringende P-Welle sowie an der Kugel gestreute und modenkonvertierte Wellen sichtbar. In gefüllten Hohlraum treten Mehrfachreflexionen auf, welche Sekundärechos erzeugen, die zurück bis zum Wandler übertragen werden.

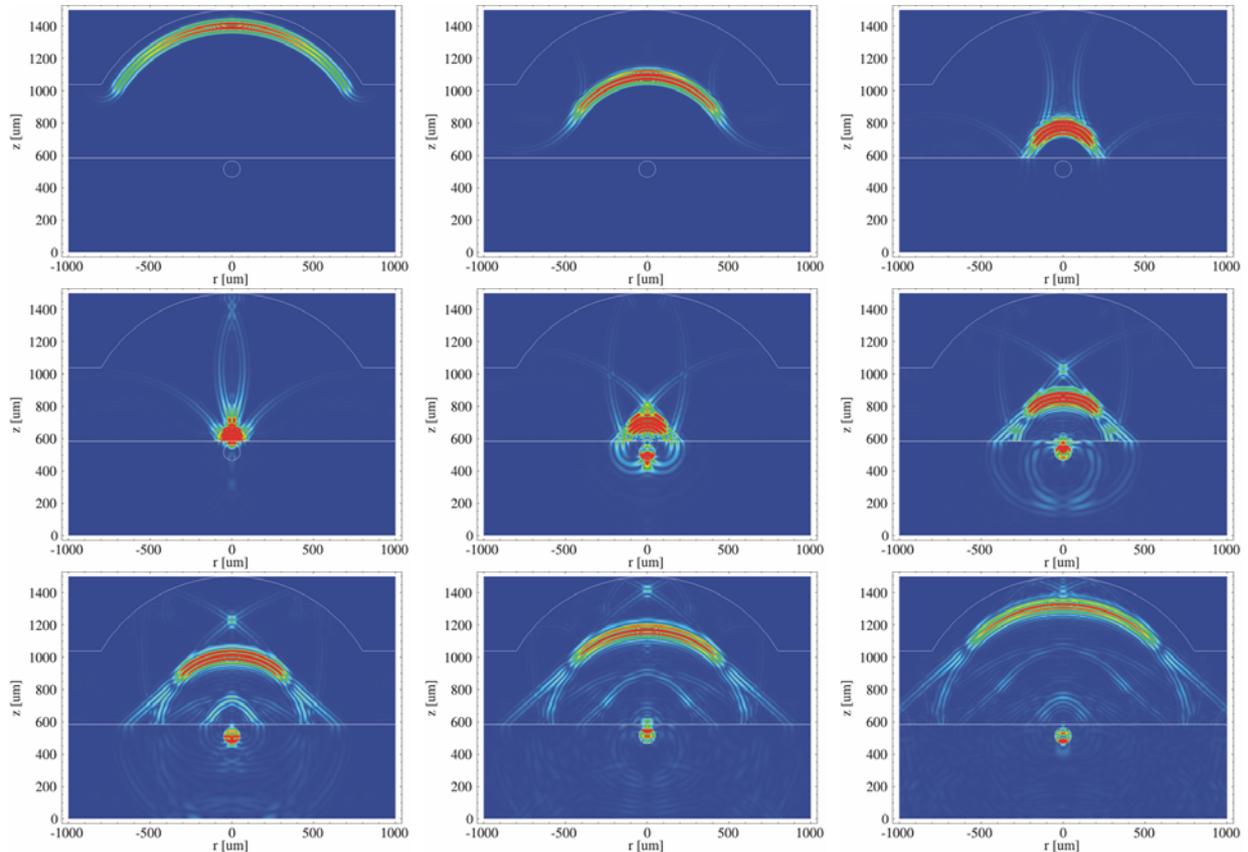


Abb. 4: CEFIT-Simulation der akustischen (Reflexions-)Mikroskopie für einen 70  $\mu\text{m}$  unter der Oberfläche liegenden, wassergefüllten, sphärischen Lunker von 100  $\mu\text{m}$  Durchmesser. In den Aufnahmen wird der Betrag der Teilchengeschwindigkeit auf einer linearen Grauwertskala abgebildet (Reihenfolge der Zeitsequenz: von links nach rechts, dann von oben nach unten)

Das hier dargestellte Modell eines Ultraschallmikroskops kommt nicht nur bei der Identifikation der aufgenommenen Signale zum Einsatz, sondern wird auch für den Entwurf der Wandler und die Optimierung seiner Parameter verwendet. Dazu können auch verschiedene Linsengeometrien berücksichtigt werden.

### 2.3 Akustische Nahfeldtechniken (AFAM)

Das Auflösungsvermögen der konventionellen Ultraschallmikroskopie wird durch die akustische Wellenlänge begrenzt. Auflösungen unterhalb der Wellenlänge können mit Nahfeld-Techniken erzielt werden, z.B. der Akustischen Rasterkraftmikroskopie (AFAM); AFAM basiert auf der Rasterkraftmikroskopie (AFM) [6, 7]. Zusätzlich regen horizontal oder vertikal verlaufende Schwingungen der Probenoberfläche Biege- und Drehschwingungen der Messnadel (Cantilever) an. Die Probenoberfläche wird durch den Cantilever abgetastet. Dabei entsteht ein (Ultraschall-)Bild, das die elastische Wechselwirkung zwischen Probe und Cantilever beschreibt. Das Ultraschallbild entsteht gleichzeitig mit dem Topographiebild.

Der in dem Ultraschallbild dargestellte Kontrast hängt von dem lokalen elastischen Verhalten der Probenoberfläche ab. Dicht unter der Oberfläche befindliche Voids, Einschlüsse oder Risse modifizieren die elastische Wechselwirkung zwischen Oberfläche und Cantilever. Entsprechend können aus den Ultraschallbildern Informationen über verdeckte Strukturen gewonnen werden. Diese Informationen sind im allgemeinen von Topographieinformationen überlagert, die ebenfalls im Ultraschallbild enthalten sind. Die untersuchten Testbeispiele zeigten nur klar interpretierbare topographische Informationen. Weitere Experimente bewiesen das Potential von AFAM für verdeckte Strukturen.

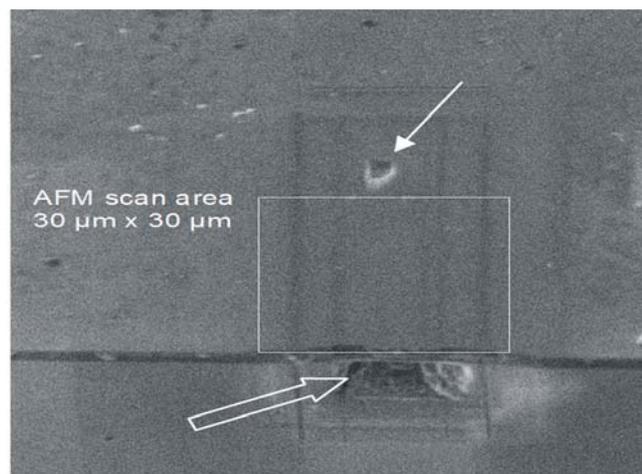


Abb. 5: Rasterelektronenmikroskopie (SEM) einer Probe aus Silizium mit einem von der Seite gebohrten Loch (hohler Pfeil). Die Seitenwand des Loches neigt sich leicht zur Oberseite und weist einen kleinen Durchbruch auf (Pfeil). Die als schwarze Linien sichtbaren, aufgespritzten Markierungen dienen der besseren Orientierung.

Abbildung 5 demonstriert das SEM-Bild einer Probe, bei der mittels FIB-Technik ein oberflächennaher Hohlraum (Kanal) mit zur Oberfläche abnehmenden Abstand erzeugt wurde, ohne die Scanfläche zu verändern [8]. Abbildung 6 stellt das Ergebnis der AFAM-Messung dar.



Abb. 6: AFM(links)- und AFAM(rechts)-Bilder der Probe. Die Anregungsfrequenz beträgt 685 kHz, die Scanfläche  $30 \times 30 \mu\text{m}^2$ , die z-Skalen 300 nm in der Topographie und 10 V im AFAM-Bild. Die Kante des Wafers liegt unterhalb der unteren Linie der Scanfläche.

Im AFAM-Bild (Abbildung 6, rechts) ist die Beeinflussung des Messsignals durch die Dicke der Probe, die über dem Bohrkanal erzeugt wurde, als signifikant größere Amplitude (hellere Fläche) zu erkennen. Die Dicke nimmt von oben nach unten zu. Entsprechend nähern sich die effektive Steifigkeit und die AFAM-Amplitude den Werten von Flächen ohne verdecktem Hohlraum an.

Es ist bemerkenswert, dass die simulierte Fehlstelle durch die einige 100 nm starke Deckschicht hindurch abgebildet wird. Diese Eindringtiefe übersteigt den in der Literatur diskutierten Wert für die Reichweite des Spannungsfeldes (dreifacher Kontaktradius [9]) deutlich und lässt hoffen, dass AFAM zu einem Werkzeug für die zerstörungsfreie Prüfung ausgewählter Fragestellungen der Aufbau- und Verbindungstechnik entwickelt werden kann.

## 2.4 Optische Nahfeldtechniken und Nano-Raman-Spektroskopie

Optische Techniken reichen von der optischen Mikroskopie für die visuelle Inspektion, über die Weißlicht-Interferometrie für die Oberflächenanalyse bis zur spektroskopischen Ellipsometrie für die komplexe Oberflächencharakterisierung. Sie werden in der mikro- und nanotechnologischen Fertigung angewendet. Ihre nichtzerstörende Funktionsweise und ihre Einfachheit haben sie zu unverzichtbaren Hilfsmitteln in Forschung und Produktion gemacht. Entscheidende Fortschritte in der Nano-Lithographie und Mikro-Fabrikation sowie zunehmend geringere Dimensionen in der Halbleiterherstellung und Datenspeicherung erweitern die Möglichkeiten und Aufgaben optischer Techniken zur Vermessung von Strukturen an der Oberfläche und im Volumen. Nach der „International Technology Roadmap for Semiconductors“ (ITRS) 2004 besteht eine der Schlüsselaufgaben für die nächsten Jahre darin, für den Bereich von 45 nm und darunter eine strukturelle und elementare Analyse zu ermöglichen. Mit der Bewältigung dieser technologischen Herausforderung könnten metrologische Techniken in den Produktionsprozess integriert werden.

Wegen der Diffraktion ist eine optische Auflösung von Strukturen, die kleiner als die halbe Wellenlänge sind, unmöglich. Um der Forderung aus der nanotechnologischen Produktion nach einer erhöhten Auflösung in der optischen Metrologie zu entsprechen, werden Nahfeldtechniken untersucht, z.B. die Optische Nahfeldmikroskopie (NSOM, in Europa auch als SNOM bekannt). NSOM ist als optische bildgebende Technik mit einer Auflösung unterhalb der Wellenlänge bekannt. Sie wird vielfach in der Nanophotonik, in der Biomedizin und den Materialwissenschaften eingesetzt. Die am meisten gebräuchliche Technik nutzt metallbeschichtete Faserspitzen mit einer Nano-Apertur an der Spitze. Im Transmissionsmodus fällt das Licht durch diese Nano-Apertur und beleuchtet die Probe lokal. Im Sammelmodus werden optische Signale von der Probe lokal an der NSOM-Spitze akkumuliert. Diese Nano-Apertur ermöglicht, die Auflösungsgrenze nach dem Beugungsgesetz deutlich zu unterschreiten. Mittels NSOM kann eine örtliche Auflösung zwischen 50 nm und 100 nm erzielt werden. Mit einem Rückkopplungsmechanismus ist NSOM in der Lage, sowohl eine hochauflösende topographische als auch optische Abbildung der Probe zu liefern. Der einzigartige Zugriff auf optische Signale mit Nanometer-Auflösung bietet viele Möglichkeiten für eine zerstörungsfreie Nano-Charakterisierung und Metrologie von Werkstoffen.

Seit mehreren Jahren wird die Raman-Spektroskopie als leistungsstarkes Werkzeug für die Untersuchung molekularer Schwingungen und Rotationen genutzt. Dabei kann die Raman-Streuung als unelastische Kollision des einfallenden Lichts mit den Molekülen verstanden werden. Die Wechselwirkung zwischen dem einfallenden Licht und der Schwingungs-/Rotationsenergie der Moleküle verursacht eine spektrale Verschiebung im gestreuten Licht. Spezifische Moleküle weisen einzigartige Merkmale in der spektralen Verschiebung auf.

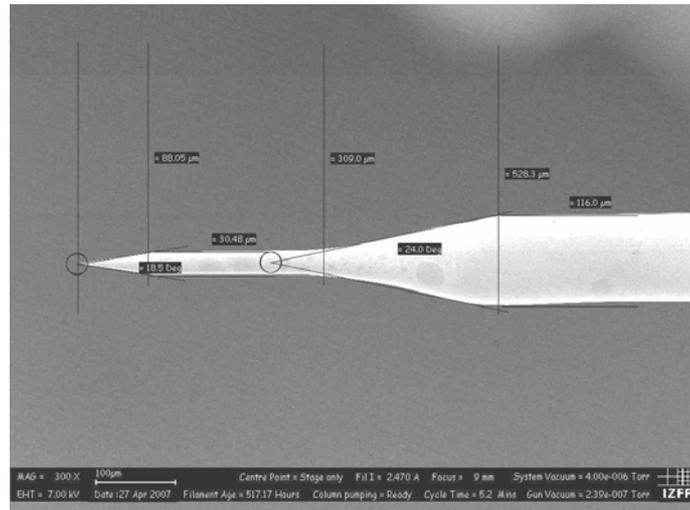


Abb. 7: Geätzte Faserspitze, genutzt als optische Nahfeld-Messspitze. Form und Schärfe der Messspitze können den speziellen Anforderungen des Testkörpers und des Messaufbaus individuell angepasst werden.

Durch Untersuchung der Raman-Verschiebung ist es möglich, die chemische Zusammensetzung der Probe zu analysieren. Diese Verschiebung wird ebenfalls durch mikromechanische Spannungen des Materials und lokale Deformationen beeinflusst. Deshalb ist es durch Messung der Raman-Verschiebung möglich, die Spannungsverteilung in der Probe zu ermitteln. Übliche ramanspektroskopische Techniken verwenden Laserstrahlen mit großen Projektionsflächen, was die erreichbare Auflösung begrenzt. Um eine große räumliche Auflösung der Materialeigenschaften zu erzielen, nutzen Mikro-Raman-Techniken Linsen mit großer Apertur, wie sie in der Materialanalyse entwickelt und eingesetzt werden. Mittels Mikro-Raman-Techniken können Auflösungen von einigen Mikrometern erzielt werden. Eine noch größere Auflösung wird benötigt, um die Anforderungen aus den zunehmend kleineren Abmessungen in Nanomaterialien und der Nano-Fabrikation zu erfüllen.

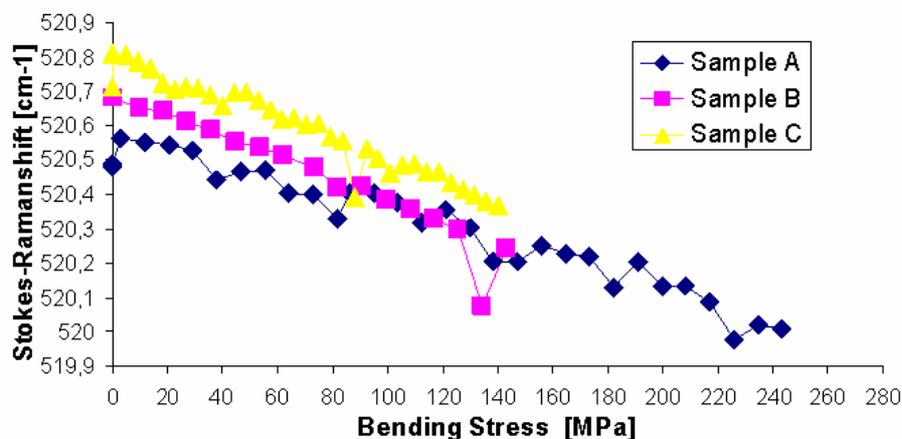


Abb. 8: Korrelation zwischen Raman-Verschiebung und der Spannung, die durch eine definierte Biegung eines Silizium-Plättchens erzeugt wurde.

Methoden wie AFM und NSOM können in Kombination mit der Raman-Spektroskopie genutzt werden, um die räumliche Auflösung bis in den Nanometer-Bereich zu verbessern. Neben des viel größeren Auflösungsvermögens weist die Nano-Raman-Spektroskopie einen weiteren fundamentalen Unterschied im Vergleich zur Mikro-Raman- und konventionellen Spektroskopie auf: Wegen des großen Feldgradienten in der Umgebung der Messspitze liefert die Nano-Raman-Spektroskopie weitaus mehr Informationen als Mikro-Raman-Techniken. Ein solcher Ansatz ist also äußerst viel versprechend, um die technischen Anforderungen an eine strukturelle und elementare Analyse wie in ITRS 2004 aufgelistet zu erfüllen.

## 2.5 Thermische Mikroskopie und hochauflösende Thermographie

Thermische Techniken bieten aufgrund mikroskopischer Wärmeflüsse einen einzigartigen Kontrastmechanismus [10]. Es existieren mikroskopische thermische Techniken, bei denen die Auflösung durch einen hoch fokussierten Laserstrahl bestimmt wird, der lokale Temperaturschwankungen auslöst. Diese Temperaturschwankungen werden durch Infrarot-Sensoren, durch temperaturabhängige optische Reflexionseigenschaften oder mittels thermisch induzierter akustischer Wellen detektiert. Der Kontrast wird durch Änderungen der Wärmeausbreitung, durch thermische Widerstände oder anhand veränderter Geometrien des Wärmeflusses bestimmt. Eine spezielle Eigenschaft dieser Art der thermischen Bildgebung besteht in der Möglichkeit, thermische Tiefenprofile anzulegen (sub- $\mu\text{m}$  bis 1 mm). Mit der Änderung der thermischen Diffusionslänge ändert sich die Tiefeneindringung. Die laterale Auflösung ist begrenzt auf etwa 1  $\mu\text{m}$ , wenn optische Anregung benutzt wird, oder einige 10 nm, wenn modulierte Elektronenstrahlen zum Aufwärmen eingesetzt werden. Typische Anwendungen betreffen die Detektion von Mikrorissen und die Bestimmung thermischer Widerstände an Schnittstellen. Ein kommerzielles Instrument auf der Basis der photothermischen Radiometrie ist das ALADIN-Mikroskop.

Rasterwärmemikroskopie ist eine Technik mit begrenzter Geschwindigkeit der Bildgebung. Die Wärmediffusion verläuft langsam und das Abtasten beansprucht Zeit. Deshalb besteht eine Tendenz in der Kombination von Infrarotkameras und aktiver Wärmezufuhr. Nach einem 5 ms langen Blitz wurde das Infrarotbild in Abbildung 9 nach 45 ms Messzeit gewonnen.

Photoakustische Techniken haben sich als sensitiv gegenüber Eigenspannungen erwiesen und können möglicherweise als Alternative zu existierenden Lösungen entwickelt werden [11].

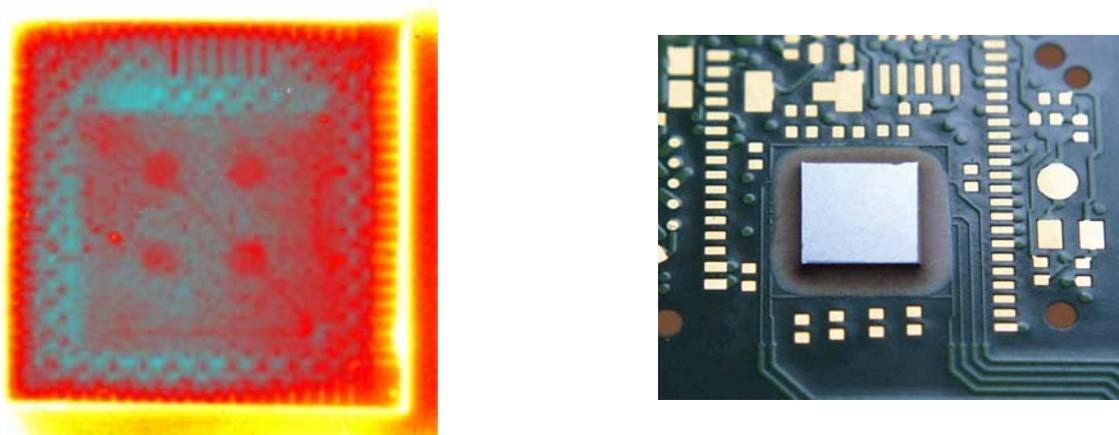


Abb. 9: Gepulste Thermographie (10 mm x 10 mm) einer mikroelektronischen Komponente (rechts). Nur durch zusätzliche thermische Anregung werden interne Details sichtbar.

### 3. *Nanoeva* und *ISL-LOD*

Das IZFP-D und das Zentrum für Mikrotechnische Produktion (Z $\mu$ P) der Technischen Universität Dresden haben am 1. März 2007 *Nanoeva* gegründet, das "Center for Non-Destructive Nano Evaluation of Electronic Packaging". Dessen Aufgabe besteht in der Entwicklung von ZfP-Methoden für die kommenden Herausforderungen an die Fehlerprüfung in der Aufbau- und Verbindungstechnik. *Nanoeva* steht als Partner der Elektronikindustrie und von Forschungsinstituten überall dort bereit, wo es um die Entwicklung und Anwendung zerstörungsfreier Prüfverfahren, um Dienstleistungen und um Aus- und Weiterbildung geht. Garanten für den Erfolg sind die renommierten Wissenschaftler aus den Partneereinrichtungen. Gegenwärtig sind im Rahmen von *Nanoeva* Techniken zur Röntgenmikroskopie und Röntgentomographie, Ultraschallmikroskopie, Rasterkraftmikroskopie, zur optischen Mikroskopie und zur geometrischen Oberflächencharakterisierung verfügbar.

Einem ähnlichen Ziel dient ein gemeinsames Labor des IZFP-D mit dem Stepanov-Institut für Physik der Weißrussischen Akademie der Wissenschaften – das Internationale Wissenschaftliche Labor für Optische Diagnostik (*ISL-LOD*). In seinem Fokus stehen sowohl die Charakterisierung von Mikro- und Nanostrukturen, als auch die Entwicklung und Anwendung von Nanowirkstoffen für die ZfP.

#### Literatur

- [1] IPC, „IPC INTERNATIONAL TECHNOLOGY ROADMAP – Electronic Interconnect Trends and Issues“, Vol. 1, 2004/2005
- [2] IPC, „IPC INTERNATIONAL TECHNOLOGY ROADMAP – Electronic Interconnect Related Drivers“, Vol. 2, 2004/2005
- [3] iNEMI – International Electronics Manufacturing Initiative, „Technology Roadmaps“, 2004 Edition
- [4] Fachverband Electronic Components and Systems im ZVEI, „Produktionstechnik für eine Aufbau- und Verbindungstechnik für die Nanoelektronik“, ZVEI – Zentralverband Elektrotechnik- und Elektronikindustrie e.V., Frankfurt/M., 2005
- [5] F. Schubert, B. Koehler, P. Zinin, „Numerical time-domain simulation of wave propagation and scattering in acoustic microscopy for subsurface defect characterization“ Testing, Reliability, and Application of Micro- and Nano-Material Systems III, edited by R. E. Geer, N. Meyendorf, G. Y. Baaklini, B. Michel, Proceedings of SPIE, Vol. 5766 (2005) 106-116
- [6] G. Binnig, C. F. Quate and Ch. Gerber, „Atomic Force Microscope“, Phys. Rev. Lett. Vol. 56 (1986), pp. 930
- [7] U. Rabe and W. Arnold, „Acoustic microscopy by atomic force microscopy“, Appl. Phys. Lett. Vol. 64, (1994), pp. 1493
- [8] A. Striegler, N. Pathuri, B. Köhler, B. Bendjus, „Visibility of Buried Structures in Atomic Force Acoustic Microscopy“. Conference Quantitative Nondestructive Evaluation (QNDE), 30.07.-04.08.2006 (Portland, USA), American Institute of Physics, Melville (New York, USA), Ed. by D. O. Thompson and D. E. Chimenti, AIP Conference Proceedings 894 (2007), p. 1572
- [9] K. I. Johnson, „Contact Mechanics“, Cambridge University Press (1985)

- [10] J. Hartikainen, J. Jaarinen and M. Luukkala, „Microscopic Thermal Wave Non-destructive Testing“, in: „Optical and Electron Microscopy“, Vol. 12, eds. T. Mulvey and C. J. R. Stupard, (Academic Press, London 1991), 313 (1991)
- [11] U. Netzelmann, „Abbilden mit thermischem Kontrast: Mikrothermographie und ihre Anwendung“, Proc. Workshop „Imaging und Bildverarbeitung für die Qualitätssicherung in der Oberflächentechnik“, EFDS Europäische Forschungsgesellschaft Dünne Schichten e.V., Dresden 2006

[19.02.08]

Anschrift der Autoren:

Prof. Dr. Norbert Meyendorf  
Fraunhofer-Institut für Zerstörungsfreie Prüfverfahren (IZFP-D)  
Institutsteil Dresden  
Maria-Reiche-Str. 2  
D – 01109 Dresden  
[www.izfp-d.fraunhofer.de](http://www.izfp-d.fraunhofer.de)