

Zerstörungsfreie, dreidimensional abbildende Untersuchungen für Mikrosystem-Produkte

L. Helfen, T. Baumbach, ISS

Einführung

Eine voranschreitende Erhöhung der Packungsdichte und die damit einhergehende Miniaturisierung in der Mikrosystemtechnik (MST) stellen wachsende Anforderungen an zerstörungsfreie Prüfmethode, insbesondere solche mit hoher räumlicher und guter Kontrast-Auflösung. Von wesentlichem Interesse sind dreidimensional (3D) abbildende Methoden, die eine Aussage über die räumliche Anordnung von Objektstrukturen und Fehlern zulassen.

An Synchrotronquellen ist die Computertomographie (CT) als 3D-abbildende Methode etabliert. Diese ist optimiert auf Objekte, die unter Drehung eine möglichst gleichmäßige Röntgenstrahlung bereitstellen, wie z.B. zylinderförmige Objekte bei Drehung um ihre Längsachse. Mikrosysteme sind jedoch häufig auf planaren Substraten integriert, welche üblicherweise unter Drehung sehr unterschiedliche Röntgenstrahlungen aufweisen, weshalb nicht alle Durchstrahlungsrichtung Informationen zur Objektrekonstruktion beitragen und somit Artefakte im rekonstruierten Bild entstehen.

In Zusammenarbeit mit dem europäischen Synchrotron ESRF, dem Fraunhofer Institut für Zerstörungsfreie Prüfverfahren (IZFP) und dem ISS entwickelt das Laboratorium zur Anwendung der Synchrotronstrahlung (LASY) der Universität Karlsruhe eine 3D-abbildende Röntgen-Prüfmethode [1] und die entsprechende Manipulatortechnik zur Untersuchung flacher, lateral ausgedehnter Objekte [2], wie sie typischerweise in der MST vorkommen. Mit dieser

sog. Synchrotronstrahlung-Computerlaminographie (SR-CL) sollen Technologien zur Mikrosystemherstellung und Mikrosysteme im Laufe des Entwicklungszyklus überprüft werden können. Die Entwicklung baut auf bekannten Methoden aus der medizinischen Diagnose [3] und der technischen Bauteiluntersuchung [4,5] auf, wobei die Abtastungsprozedur jedoch an die besonderen experimentellen Bedingungen an Synchrotronquellen – wie z.B. eine stationäre Quelle, parallele Strahlgeometrie und monochromatische Strahlung – angepasst ist [1].

Eine konkret gestellte Prüfaufgabe ist die 3D-Abbildung von Hybrid-Pixeldetektoren, die aus einem Sensorkristall und einer Ausleseelektronik bestehen und mittels Techniken aus der MST assembliert und elektrisch kontaktiert werden. Die Flip-Chip-Technologie spielt eine wesentliche Rolle zur Übertragung der durch die Röntgenbestrahlung entstehenden Raumladungsverteilungen in die Ausleseelektronikschaltkreise, die dann eine digitale Datenausgabe für jedes Pixel bereitstellen. Lot wird zwischen dem Substrat (im Falle von Detektoren der Sensorkristall) und dem Elektronikchip zum Aufschmelzen erhitzt, sodass sich nach dem Abkühlen feste, räumlich getrennte Lötverbindungen (solder bumps) ergeben. Besonders kritisch ist die Kombination unterschiedlicher Materialien als Sensor und Ausleseelektronik. Grund dafür ist die unterschiedliche Wärmeausdehnung, die beide Einheiten während der Abkühlphase nach dem Lötprozess unterschiedlich schrumpfen lässt. Dadurch kommt es zu mechani-

schen Spannungen in Sensor, Elektronik und Lötverbindungen, die eine Rissentstehung begünstigen und somit die Zuverlässigkeit des Detektors einschränken. Diese Problematik ist umso bedeutsamer, je größer die Detektoren in lateraler Richtung gebaut sind und umso mehr Inhomogenitäten (z.B. Poren) in den Lötverbindungen auftreten. Eine Erhöhung der Packungsdichte zum Erzielen einer verbesserten räumlichen Auflösung geht in der Regel mit einer Verkleinerung des verfügbaren Raumes für die Lötverbindung einher, sodass die Lötverbindungen mechanisch weniger belastbar sind.

Aus diesen Gründen ist die Technologie momentan begrenzt hinsichtlich der Anzahl der Verbindungen (und daher bzgl. der Anzahl der Pixel) in lateraler Richtung, was das zur Verfügung stehende Gesichtsfeld einschränkt. Ziel ist es daher, Lötverbindungen bereitzustellen, die möglichst perfekt und gleichzeitig fehlertolerant sind. Die Fehlertoleranz kann durch einen komplexen Aufbau von Metallisierungsschichten (under bump metallisation) auf Sensor und Elektronik dadurch erhöht werden, dass eine Ablösung der Lötperlen unter mechanischer Spannung von Sensor bzw. Elektronik vermieden wird.

Zerstörungsfreie 3D-Abbildungsmethoden sind daher von bedeutender Wichtigkeit als entwicklungsbegleitendes Werkzeug. Typische zu erkennende Fehler sind beispielsweise fehlende Lötverbindungen, Größenfehler, Brücken zwischen isolierten Bauteilen, Poren, Risse oder Enthaltungen. Das Erkennen solcher Fehler und die Bestimmung ihrer Positionen er-

lauben beispielsweise ein gezieltes Feintuning der Herstellungsschritte und -technologien.

In diesem Beitrag soll das Potenzial von SR-CL zur Untersuchung flacher, lateral ausgedehnter Bauteile anhand von konkreten Beispielen dargestellt werden. SR-CL ist eine Methode, die Synchrotronstrahlung mit Tomosynthese-/Laminographieprinzipien verbindet. Bekannte Vorteile von Synchrotronstrahlung hinsichtlich bildgebender Verfahren – wie z.B. eine hohe erzielbare räumliche Auflösung dank hoher Strahlintensität, monochromatische Strahlung zur Vermeidung von Strahlaufhärtung (d.h. die Änderung des Röntgenspektrums entlang des Strahlweges im Objekt) und der damit verbundenen Artefakte, hohe partielle Kohärenz zur Erhöhung des Bildkontrastes an ähnlich absorbierenden Objektstrukturen (sog. Phasenkontrast [6]) etc. – können so für die Untersuchung flacher, lateral ausgedehnter Objekte genutzt werden.

Methoden und Ergebnisse

Abb. 1 zeigt schematisch den Vergleich zwischen den experimentellen Aufbauten von Computertomographie (a) und von Computerlaminographie mit Synchrotronstrahlung (b), hier am Beispiel der ESRF-Strahllinie ID19. Der Vielschicht-beschichtete Spiegel stellt monochromatische Strahlung von der Röntgenquelle (hier ein Insertion Device) für das Experiment bereit. Das Objekt ist auf einem Rotationstisch, der im bekannten Laminographiewinkel θ zur Richtung des einfallenden Strahls steht, montiert. Dieser Rotationstisch dreht das Objekt um 360° wobei die transmittierte Strahlung an diskreten Winkelpositionen vom elektronischen Flächen-Detektorsystem (mit derzeitigen Pixelgrößen zwischen 0.3 und $40 \mu\text{m}$) als 2D-Projektionsdaten abgetastet wird. Der Grenzfall $\theta = 90^\circ$ entspricht dabei der etablierten Computertomographie. Man beachte, dass im Gegensatz zur CT die Objekte lateral größer sein können als das Gesichtsfeld des Detektors.

In einem zweiten Arbeitsschritt werden die Projektionsdaten zur Rekonstruktion (mittels gefilterter Rückprojektion) eines 3D-Bildes (z.B. des linearen Schwächungskoeffizienten μ) des Objekts genutzt. Aus diesem 3D-Datensatz können dann willkürlich gewählte Querschnitte des Objektes dargestellt werden. Eine zweite Darstellungsmöglichkeit besteht in der 3D-Wiedergabe ausgewählter Objektstrukturen (s. Abb. 3 bis 5). Die derzeit verfügbaren Detektorsysteme und Manipulatortechnik gestatten dabei eine sinnvolle Rekonstruktion von Datensätzen mit Voxelgrößen (d.h. der Pixelgrößen im 3D-Bild) bis hinunter in den Mikrometerbereich.

Für Laminographiewinkel $0^\circ < \theta < 90^\circ$ kann das Bild des Objektes schon im Prinzip nicht präzise rekonstruiert werden, da im Gegensatz zur CT mit $\theta = 90^\circ$ nicht die vollständige Objektinformation abgetastet wird [1]. Dadurch entstehen mit der Objektstruktur korrelierte Artefakte im rekonstruierten 3D-Bild, sodass z.B. zylinderförmige Objekte normalerweise bes-

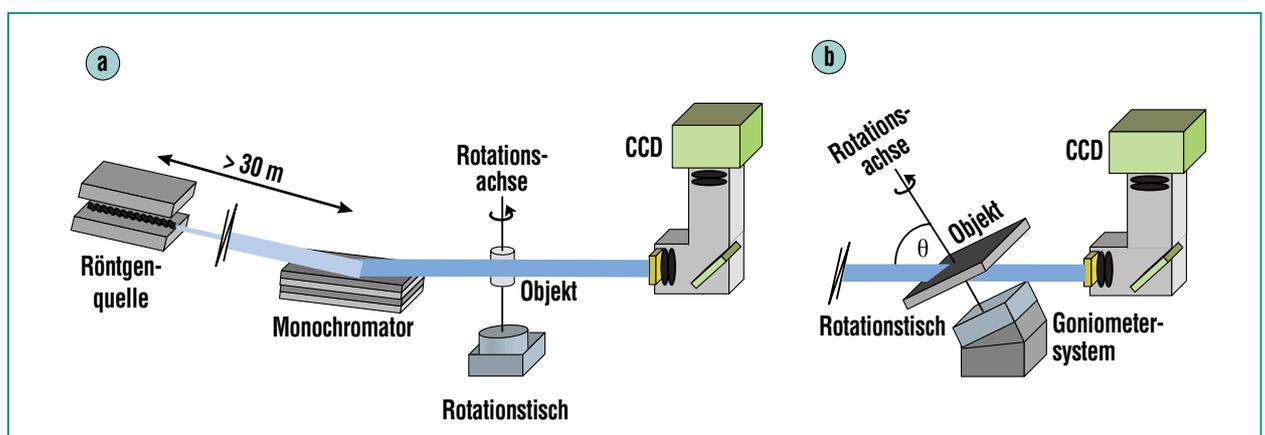


Abb. 1: Schema des experimentellen Aufbaus an Synchrotronquellen von Computertomographie (a) und Computerlaminographie (b) mit monochromatischer Strahlung. In b) entspricht die Scangeometrie für den Fall $\theta = 90^\circ$ der etablierten Synchrotron-Computertomographie.

ser mittels CT untersucht werden sollten. Für flache, lateral ausgedehnte Objekte, die durch eine senkrechte Montage auf der Rotationsachse bei allen Projektionen im Mittel eine gleichmäßige Transmission aufweisen, kann im Allgemeinen aber ein 3D-Bild mit reduzierten Artefakten (im Vergleich mit CT) rekonstruiert werden. Computergestützte Simulationen haben gezeigt, dass die Detaillierbarkeit mit den derzeit verfügbaren Detektorsystemen im Bereich eines Mikrometers liegt.

Als Beispiel einer Untersuchung mittels SR-CL sind in Abb. 2 zwei zueinander senkrechte, rekonstruierte Querschnitte eines Bauteils dargestellt. Es ist mittels Flip-Chip-Technologie auf einem Substrat mit Kupferleiterbahnen integriert. Kleine Leerräume in den Lötverbindungen sind insbeson-

dere zur Chip-Seite hin zu finden, an der Schnittstelle zur Metallisierung. Große Poren hingegen befinden sich bevorzugt zu den Kupfermetallisierungen zu dem Substrat hin. Sowohl die häufig auftretenden kleinen Poren als auch die relativ seltenen großen Poren stellen ein bedeutendes Problem für die Bauteil-Zuverlässigkeit unter Erwärmungszyklen dar, weshalb diese in der Serienproduktion vermieden werden sollten.

Eine 3D-Darstellung desselben Bauteils ist in Abb. 3 zu finden. Durch die leicht angeschrägte Wahl der Schnittebene sind links Metallisierungen am IC auf den Lötstellen hin erkennbar, rechts werden die Lötstellen etwa in ihrer Mitte durchschnitten. Dort werden durch den Schnitt die besagten Poren im Innern der Lötstellen sichtbar.

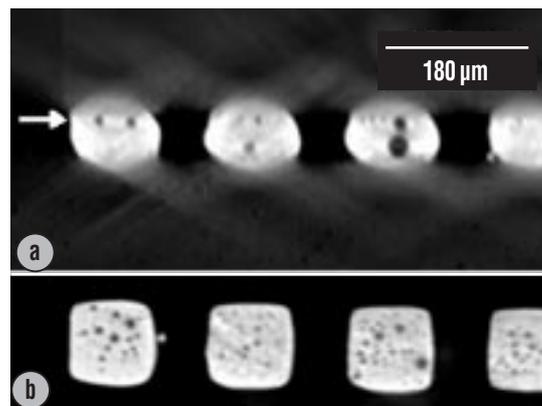


Abb. 2: Rekonstruierte Querschnitte durch eine Reihe von Lötverbindungen, senkrecht (a) und parallel (b) zur Bauteiloberfläche. Der Pfeil in Schnitt (a) zeigt die Tiefenposition des Schnitts (b) wo sich eine Vielzahl kleiner Poren befindet. Voxelgröße ist 1.4 µm, Röntgenenergie 35 keV.

Abb. 4 zeigt die 3D-Darstellung der Lötverbindungen eines Hybrid-Pixelflächendetektors für Gamma- und Röntgenanwendungen. Durch

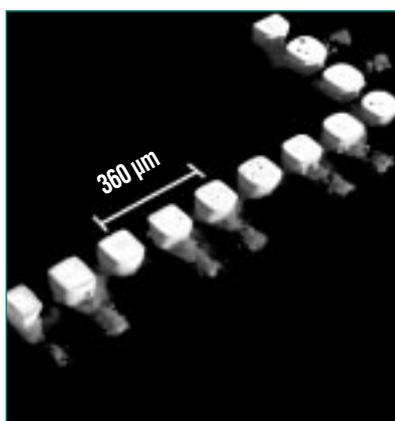


Abb. 3: 3D-Darstellung der Lötverbindungen eines Flip-Chip-Bauteils. Durch die Wahl der Schnittebene sind links die quadratischen Metallisierungen auf dem Chip sichtbar, rechts werden die Bumps in der Mitte aufgeschnitten. Voxelgröße im rekonstruierten 3D-Bild ist 1.4 µm, Röntgenenergie 35 keV.

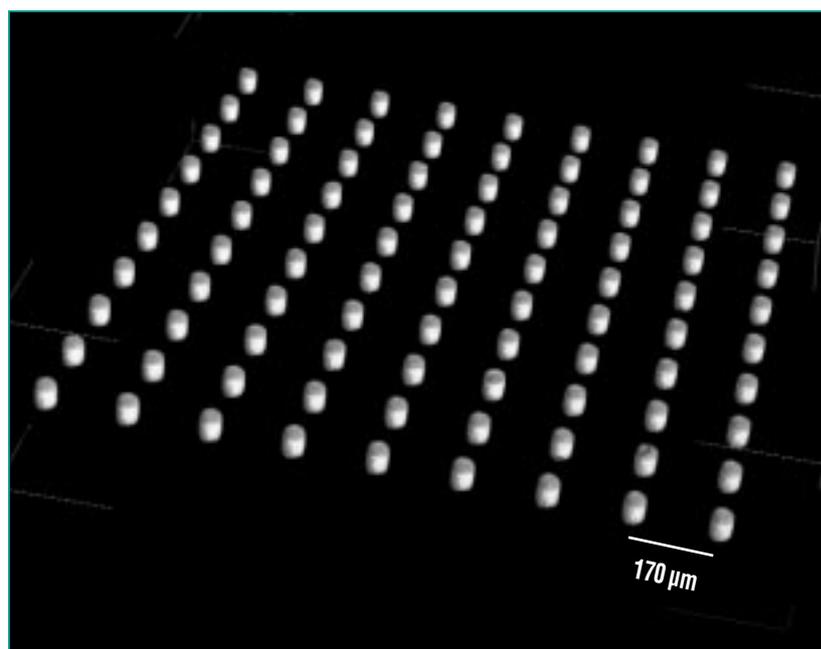


Abb. 4: 3D-Darstellung von Lötverbindungen aus dem Zentrum eines Hybrid-Pixeldetektors mit 64 x 64 Pixeln Größe, untersucht mittels SR-CL. Voxelgröße ist 1.6 µm, genutzter Röntgenenergiebereich ca. 40 bis 60 keV.

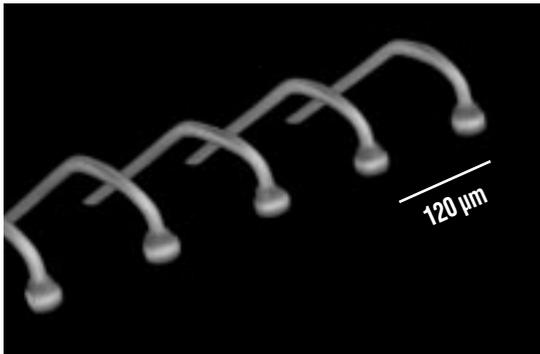


Abb. 5: 3D-Darstellung von Au-Bond-Drähten eines ICs, der zum Schutz vor mechanischen Einflüssen in einem Glob-Top vergossen ist. Voxelgröße ist 1.6 µm, Röntgenenergiebereich ca. 40 bis 60 keV.

die Verwendung eines breiten Röntgenspektrums zwischen ca. 40 bis 60 keV konnten die Projektionsdaten (900 digitale Radiographien verteilt über 360 Grad Drehwinkel) dieser Aufnahme in ca. 7 Minuten aufgenommen werden. Im rekonstruierten Bild fallen ein gutes Alignment und homogene Größe der Lötstellen auf. Im Inneren der Lötstellen sind keine Poren

identifizierbar. Der gewählte Bondprozess (AuSn reflow bonding) hat also in diesem speziellen Fall zu einer sehr zufriedenstellenden Mikrostruktur der Lötverbindungen geführt.

Als ein weiteres Beispiel aus der Aufbau- und Verbindungstechnik sind in Abb. 5 einige Bonddrähte eines drahtgebondeten Chips, der in einem Verguss aus Kunststoff (sog. Glob-Top) gegenüber äußeren Einflüssen verkapselt war, dargestellt. Sowohl die Gold-Bonddrähte als auch die Metallisierungen an der Chip-Oberseite sind erkennbar. Damit kann eine Ursachenforschung für mögliche Bauteilausfälle, bedingt durch fehlerhaftes Bonding, betrieben werden. Es besteht die Aussicht, dass mittels Phasenkontrast in Zukunft ebenfalls Bonddrähte aus Aluminium abgebildet werden könnten, was derzeit mit Laborgeräten nicht möglich ist.

Zusammenfassung

Zur Untersuchung flacher, lateral ausgedehnter Objekte, wie sie z.B. in der Mikrosystemtechnik häufig vorkommen, wurde Computerlaminographie mit Synchrotronstrahlung zur Anwendung gebracht. Die gewonnenen 3D-Bilder geben Einsicht über die räumliche Anordnung von Objektstrukturen und somit möglichen Bauteilfehlern. Durch die momentan zur Verfügung stehenden Detektorsysteme können derzeit Fehler in Bauteilen auf Größenordnungen bis hinunter zu einem Mikrometer identifiziert werden. Computerlaminographie mit Synchrotronstrahlung bietet sich somit als entwicklungsbegleitende Prüfmethode zur Validierung von Mikrosystem-Technologien und gezielten Verbesserung von Bauteilen an.

Literatur

- [1] L. Helfen, T. Baumbach, P. Mikulik, D. Kiel, P. Pernot, P. Cloetens, J. Baruchel, *Appl. Phys. Lett.* 86, 071915 (2005)
- [2] L. Helfen, T. Baumbach, D. Kiel, P. Mikulik, P. Pernot, J. Baruchel, M. Kröning, "Imaging of Micro- and Nanostructures with X-ray techniques: Applications in Microelectronics and in Micro-System Technology", *Proceedings of 16th World Conference on NDT, Aug 30 – Sep 3 2004, Montreal, Canada, ISBN 0-9736577-0-7*
- [3] J. T. Dobbins III, D. J. Godfrey, *Med. Phys. Biol.*, 48, R65–R106 (2003)
- [4] J. Zhou, M. Maisl, H. Reiter, W. Arnold, *Appl. Phys. Lett.*, 68, 3500–3502 (1996)
- [5] S. Gondrom, J. Zhou, M. Maisl, H. Reiter, M. Kröning, W. Arnold, *Nuclear Engineering and Design*, 190, 141–147 (1999)
- [6] P. Cloetens, M. Pateyron-Salomé, J. Y. Buffière, G. Peix, J. Baruchel, F. Peyrin, M. Schlenker, *J. Appl. Phys.*, 81, 5878–5885 (1997)