

Sichere Automobil Elektronik durch nanogenaues Synchrotron-Prüfverfahren

Bernd R. MÜLLER, Michael HARWARDT, Manfred P. HENTSCHEL,
Axel LANGE, BAM, Berlin
Peter ALPERN, Rainer TILGNER, Infineon Technologies, München

Kurzfassung. Die Zuverlässigkeit von elektronischen Leistungsschaltkreisen (ICs) für den Automobilbau kann durch die neuartige Synchrotron-Laue-Contrast-Radiography (SLCR) prognostiziert werden. In Zusammenarbeit mit der Infineon Technologies AG wurde das Verfahren bei BESSY an der BAMline realisiert. Dabei war es erforderlich, kleinste Verbiegungen des Silizium-Einkristall-Wafers im IC zu vermessen, weil diese Brüche der Passivierung von Leiterbahnen in der aufgebrachten Schaltung verursachen können. Dies gelingt mittels hochenergetischer, monochromatischer Synchrotron-Strahlung (55keV), die auch die gesamte Umhüllung (Polymer-Komposit und Kupfer-Kühlplatte) des ICs durchdringt. Die kohärente Streuung der Synchrotronstrahlung durch den Einkristall-Wafer ist extrem winkelabhängig, sodass im Transmissionsradiogramm des Röntgen-Detektors der lokalisierte Streuverlust als „Isokline“ erscheint. Werden solche in mehreren $0,005^\circ$ Winkelschritten innerhalb weniger Minuten akkumuliert, entsteht ein Streifenmuster, das dem Newtonscher Ringe an dünnen transparenten Schichten ähnelt. Unter wechselnder thermischer Belastung ändert sich die Krümmung des Wafers und damit die Liniendichte. Typische Krümmungsradien zwischen 5m und 50m können als neues Zuverlässigkeitskriterium ermittelt werden. Aus dem Streifenmuster lässt sich ein dreidimensionales nanometergenaues Höhenprofil ableiten.

Einführung

Elektronische Bauteile bestehen aus einer Vielzahl unterschiedlicher Materialien. Den funktionalen Kern bilden integrierte Schaltkreise (IC's), die auf einem einkristallinen Siliziumsubstrat aufgebaut sind. Ein Gehäuse schützt diesen Kern vor äußeren Einflüssen (Feuchtigkeit, Mechanik), übt jedoch selbst mechanische Spannungen auf das Substrat und die IC's aus, was zur Verformung des Siliziumsubstrats und zum Versagen des Bauteils führen kann. Für die Optimierung der Materialparameter im Hinblick auf die Reduzierung der durch das Gehäuse hervorgerufenen Deformationen werden Finite Elemente Berechnungen (FEM) durchgeführt. Die Ergebnisse der Berechnungen müssen jedoch durch Messungen an realen Bauteilen verifiziert werden. Diese Messungen ließen sich bisher im Labor mit Röntgen-Weitwinkel-Messungen nur exemplarisch an einzelnen Bauteilen lokal begrenzt durchführen. Dadurch war eine „Kalibrierung der FEM-Berechnungen“ nur unzureichend möglich, und Zuverlässigkeitsvoraussagen nur schwer möglich. Das an der BAMline [1] entwickelte neue ZfP-Verfahren der Synchrotron-Laue-Contrast-Radiography (SLCR) bestimmt die Deformation des gesamten Siliziumsubstrats in wenigen Minuten mit Nanometergenauigkeit.

Aufbau eines Leistungsbauelemente

Bei einem elektronischen Bauteil stellt das Gehäuse die Verbindung des IC's mit den äußeren Kontakten für die Verlötung mit dem Printed Circuit Board (PCB) her, und schützt es gleichzeitig gegen äußere Einflüsse (Feuchtigkeit, Mechanik). Die mechanische Wechselwirkung zwischen dem Gehäuse und dem Siliziumsubstrat (Chip) bewirkt eine Deformation des Chips und kann ein Auslöser von Fehlfunktionen des Bauteils sein [2-4]. Moderne Qualitäts- und Zuverlässigkeitsentwicklung fragt nach der Auswirkung solcher Wechselwirkungen auf die Lebensdauer der Bauelemente. Abbildung 1 zeigt den Aufbau und einige Materialparameter eines Leistungsbauelements, das Ströme bis zu 1 A schaltet. Auf den Si-Einkristall sind die Schichten, die ihn zu einem IC machen, aufgebracht, haben aber auf

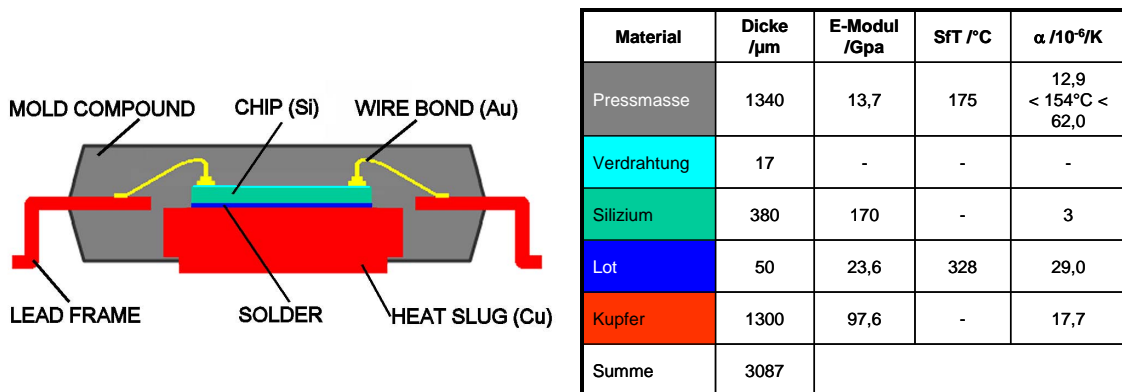


Abbildung 1: Querschnitt durch ein elektronisches Leistungsbauelement mit Materialparameter.
SfT: Stressfreie Temperatur, α : Wärmedehnungskoeffizient

Grund ihrer geringen Dicke im wesentlichen keine Auswirkungen auf die Ebenheit des Kristalls. Der Chip wird bei 328°C mit einem Bleilot [5] auf das Cu-Blech (heat slug) gelötet, um eine effiziente Wärmeableitung für den Chip zu erzielen. Der Aufbau ist bei dieser Temperatur spannungsfrei. Das ändert sich, wenn der gelötete Aufbau auf Raumtemperatur abkühlt. Wegen der unterschiedlichen linearen Wärmedehnungskoeffizienten von Kupfer und Silizium (siehe Materialkennwerte in Abbildung 1) gerät der Chip infolge des schrumpfenden Kupfers unter Druckspannung und ist konvex gekrümmt. Eine ähnliche Prozedur bedeutet die Umhüllung des Chips mit Pressmasse (glaspulvergefülltes Epoxydharz, die Glasübergangstemperatur liegt bei 154°C), die bei 175°C wasserflüssig ist und den Chip beim Abkühlen und Aushärten noch einmal unter Druck setzt.

Nach der Fertigstellung des Bauteils wirken also starke Kräfte und Momente auf den Chip, die sich in einem statischen Gleichgewicht befinden, d.h. die Summe aller Kräfte und Momente ist Null. Dieses Gleichgewicht bestimmt die Form des Chips. Die Chipform kann bei Kenntnis der Materialparameter mit Hilfe von Finite Elemente Methoden berechnet werden. Die Richtigkeit der Berechnung kann jedoch nur mittels hochgenauer ZfP-Messungen am realen Bauteil verifiziert werden, was im Folgenden vorgestellt wird.

Grundlagen des Messverfahrens

Röntgenbeugung an Kristallen

Zur Messung der Chipform nutzt man die kristalline Natur des Chips. Ein Einkristall besteht aus periodisch angeordneten Elementen (den Si-Atomen), die ein dreidimensionales Gitter aufspannen. Es gibt darin Vorzugsebenen, die Netzebenen (in Abbildung 2 zweidimensional dargestellt), auf denen sich die Atome befinden. Beleuchtet man dieses Gitter

mit Strahlung, deren Wellenlänge in der Größenordnung der Periodenlänge d , des Netzebenenabstand ist, so kann es unter bestimmten Bedingungen zu einer konstruktiven Interferenz der an den Atomen gestreuten Strahlung kommen, Diese Interferenzbedingung wird durch die sogenannte Bragg-Gleichung formuliert: Ist die in Abbildung 2 links hellgrün dargestellte Wegstrecke, die durch den Einfallswinkel Θ der Strahlung und den

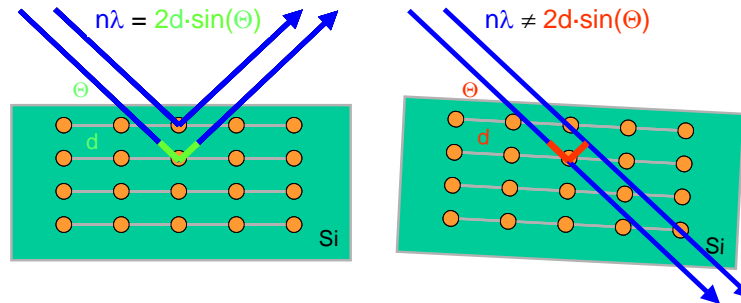


Abbildung 2: Visualisierung der Bragg-Bedingung. n : ganze Zahl, λ : Wellenlänge, d : Netzebenenabstand, Θ : Einfallswinkel.

Netzebenenabstand d im Kristall gegeben ist ein ganzzahliges Vielfaches der eingestrahnten Wellenlänge, so kommt es zu einer konstruktiven Interferenz und die Strahlung wird vom Kristall reflektiert. Wird durch Drehen des Kristalls der Einfallswinkel der Strahlung verändert (Abbildung 2 rechts), so wird die Bragg-Bedingung nicht erfüllt und es gibt keine konstruktive Interferenz und somit auch keine Reflexion. Die Strahlung kann dann, durch Absorption geschwächt, den Kristall durchdringen. Dieser Sachverhalt ist der Schlüssel für die zerstörungsfreie Messung der Chipverformung!

Synchrotron Laue Contrast Radiography (SLCR)

Das Laue-Verfahren (Max von Laue, 1879-1960) ist das älteste bekannte Röntgenbeugungsverfahren und dient der Kristallstrukturanalyse. Üblicherweise wird der Kristall mit einem weißen Röntgenstrahl (Bremsstrahlung) geringen Querschnitts beleuchtet. Auf einem Leuchtschirm hinter dem Kristall können dann mehrere Röntgenreflexe gleichzeitig beobachtet werden. Aus ihrer Lage und Intensität kann dann für das durchleuchtete Volumen die Kristallstruktur bestimmt werden.

Bei dem neuen SLCR-Verfahren wird im Gegensatz dazu parallele monochromatische Synchrotronstrahlung großen Strahlquerschnitts (ca. 5mm x 6mm) verwendet. Der Chip (übliche Dimension 4 mm x 3 mm x 0,2 mm) befindet sich dabei vollständig im Strahl. Hinter dem Chip befindet sich ein röntgen empfindliches Kamerasystem, dass die Absorption des Chips registriert (siehe Abb. 3, links oben). Bei einer willkürlichen Orientierung eines ungestörten Chips im monochromatischen Synchrotronstrahl ist in der Regel für keine der Netzebenenscharen (gelbe Striche) die Bragg-Bedingung erfüllt, so dass der hinter dem Substrat aufgestellte Detektor die durch das Bauteil abgeschwächte Strahlung empfängt. In der Radiographie sind die goldenen Bonddrähte des Bauteils gut zu erkennen (Abb. 3, links oben).

Justiert man den Chip mit seiner Flächennormale parallel zur Strahlachse, und dreht ihn dann um eine Achse senkrecht zu seiner Flächennormalen, so wird für eine bestimmte Winkelstellung die Bragg-Bedingung erfüllt. In diesem Fall wird der Röntgenstrahl vom Chip abgelenkt und gelangt nicht mehr zum Detektor (Abb. 3, links unten); die Radiographie ist dunkel.

Wie eingangs beschrieben ist ein elektronisches Leistungsbauteil aus Materialien mit unterschiedlichen linearen Wärmedehnungskoeffizienten zusammengesetzt, was zu einer erheblichen Verformung des Chips führt. Diese Verformung bewirkt, dass die Bragg-Bedingung für eine Netzebenenschar nur noch sehr lokal erfüllt ist und die Strahlung nur

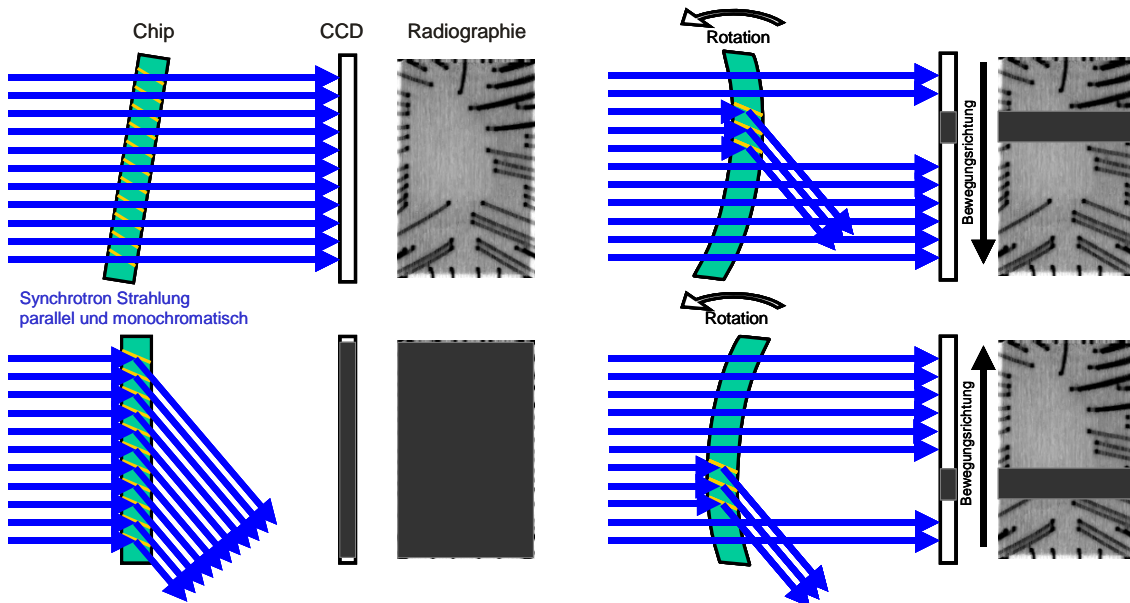


Abbildung 3: Prinzip der Synchrotron Laue Contrast Radiography. Links oben: ungestörter Kristall mit beliebiger Orientierung zum Synchrotronstrahl. Links unten: die Bragg-Bedingung ist für den ungestörten Kristall erfüllt. Rechts oben: konvex gekrümmter Kristall. Rechts unten: konkav gekrümmter Kristall.

noch partiell reflektiert wird und daher dunkle Streifen (Isoklinen = Kurven gleicher Steigung) im Radiogramm erzeugt (Abb. 3 rechts). Bei einer konvexen Chipkrümmung (vom Detektor aus betrachtet) und kontinuierlicher Drehung (mathematisch positive Richtung) des Bauteils in kleinen Winkelschritten wandern diese dunklen Streifen im Radiogramm in äquidistanten Schritten von oben nach unten (Abb. 3 rechts oben), bei gleichem Drehsinn bei konkaver Chipkrümmung von unten nach oben (Abb. 3 rechts unten).

Synchrotronstrahlung und *BAMline*

Synchrotronstrahlung entsteht, wenn energiereiche schnelle Elektronen in einem Magnetfeld abgelenkt werden. Diese Strahlung wurde von Iwanenko und Pomeranschuk (Russland) 1944 vorausgesagt und 1947 das erste Mal an einem Dipol-Magneten in einem Elektronen-Synchrotron-Beschleuniger (daher die Bezeichnung) bei General Electric in den USA beobachtet. Zunächst war sie ein unerwünschtes Nebenprodukt, da der damit verbundene Energieverlust die erreichbare Endenergie der Elektronen begrenzte. Doch bald erkannte man, dass es sich hier um eine Lichtquelle handelte, die ein kontinuierliches Energiespektrum vom infraroten bis zum harten Röntgenbereich lieferte (Abb. 4). Schwinger entwickelte 1949 einen mathematischen Formalismus, der es erlaubt, die Eigenschaften der Synchrotronstrahlung exakt zu berechnen, was eine unabdingbare Voraussetzung für die Kalibrierung von Detektoren bzw. Strahlungsquellen ist. Tomboulin und Hartmann setzten 1956 die Synchrotronstrahlung erstmals gezielt für wissenschaftliche Untersuchungen ein. Seitdem gibt es eine stetige Entwicklung dieser Strahlungsquelle sowie deren Anwendungsfelder.

BESSY in Berlin-Adlershof ist bereits die dritte Generation dieser Art Strahlungsquelle. Sie zeichnet sich durch ihre hohe Brillanz (ein Maß für die Leuchtdichte der Quelle) aus, die für eine hohe räumliche und spektrale Auflösung bei den Experimenten benötigt wird. Die BAM hat in Kooperation mit der BESSY m.b.H. und der Physikalisch Technischen Bundesanstalt (PTB) einen supraleitenden 7 Tesla Wellenlängenschieber (WLS) im

Speicherring installiert, der das in Abbildung 4 gezeigte Photonenenergie-Spektrum liefert, sowie ein Strahlrohr mit Röntgenmessplatz (die BAMline) errichtet [1]. Der nutzbare Photonenenergiebereich wurde dadurch bis weit in den harten Röntgenbereich hinein erweitert. Die verfügbare Brillanz aus dem WLS ist im Energiebereich von 5keV bis 70keV um bis

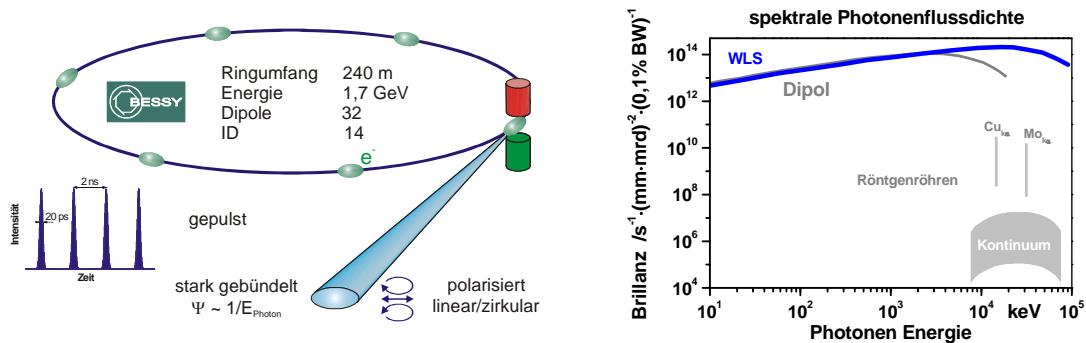


Abbildung 4: links; Prinzip eines Speicherrings für Synchrotronstrahlung, rechts; spektrale Photonenflussdichte eines Dipol-Magneten, eines 7 T Wellenlängenschieber (WLS) sowie von Röntgenröhren im Vergleich.

zu vier Zehnerpotenzen größer als die einer Drehanode.

Die BAMline ist in Abbildung 5 schematisch dargestellt, und verfügt über zwei Monochromatoren: einen Doppel-Multilayer-Monochromator (DMM) für Photonenenergien von ca. 5 keV bis 70 keV, mit einer Energiebandbreite von ca. 2% und einem Doppel-Kristall-Monochromator (DCM) mit zwei Kristallsätzen (Si(111) und Si(311)) für den Energiebereich von ca. 5 keV bis 50 keV und einer Energiebandbreite von ca. 0,2%. Mit Hilfe des biegbaren zweiten Multilayer-Spiegels des DMM lässt sich die Strahlungskeule in ihrer vertikalen Ausbreitung kollimieren bzw. auf ca. 100 μm am Probenort fokussieren. Horizontal kann die Strahlungskeule mit Hilfe des biegbaren zweiten Kristalls des DCM auf 250 μm fokussiert werden.

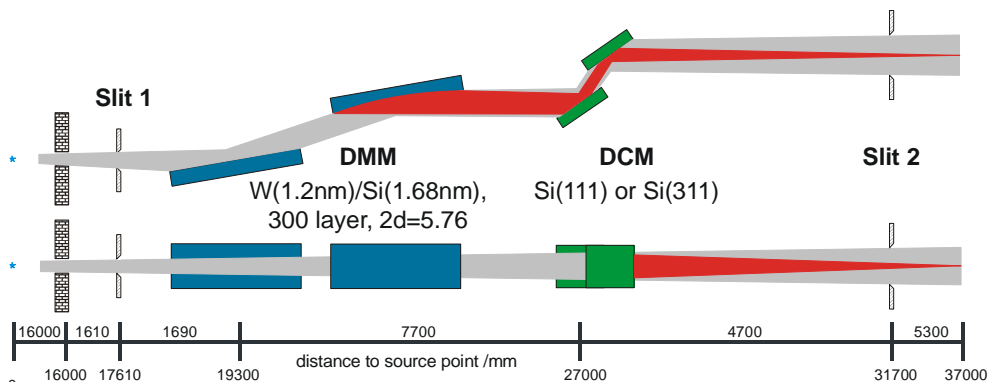


Abbildung 5: Schematische Ansicht der BAMline; oben: Seitenansicht; unten: Ansicht von oben.

Die BAMline kann in vier Modi betrieben werden. Ohne Monochromatoren liefert sie das volle Spektrum des WLS. Verschiedene Filter können zur Einschränkung der Energiebandbreite genutzt werden. Beide Monochromatoren können einzeln oder in Kombination betrieben werden.

Messungen

Das komplette Bauteil wird mit seiner Flächennormale parallel zur Achse des monochromatischen und parallelen Synchronstrahls positioniert. In keinen Winkelschritten ($\Delta\Theta = 0,01^\circ$ bis $0,001^\circ$) wird das Bauteil dann um eine Achse senkrecht zu seiner Flächennormalen gedreht. Die Belichtungszeit pro Winkelschritt beträgt ca. 2 Sekunden, der Winkelbereich ist $0,1^\circ$ bis $0,2^\circ$. Der Versuchsaufbau ist in Abbildung 6 schematisch dargestellt. Die Messzeit für ein Bauteil beträgt nur wenige Minute, sodass es sehr leicht möglich ist

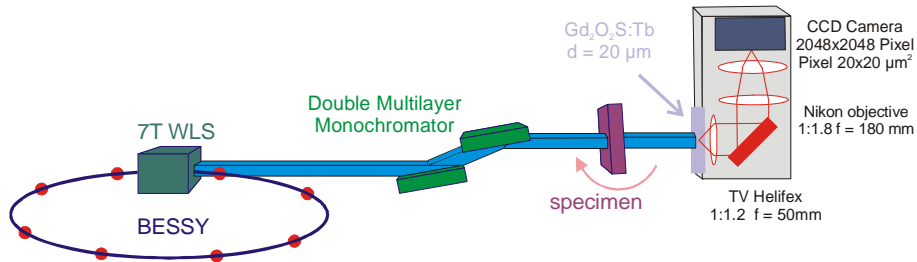


Abbildung 6: Schematische Darstellung des experimentellen Aufbaus für SLCR-Messungen an der BAM-line.

verschiedene Bauteile desselben Typs qualitativ untereinander zu vergleichen, oder dasselbe Bauteil in verschiedenen Betriebszuständen (z.B. Umgebungs- bzw. Bauteiltemperatur) zu Messen und zu vergleichen. Abbildung 7 zeigt den Vergleich zwischen zwei Bauteilen des selben Typs. Der Si-Chip im Bauteil Inf_2 ist im Vergleich zum Chip in Inf_7 stärker

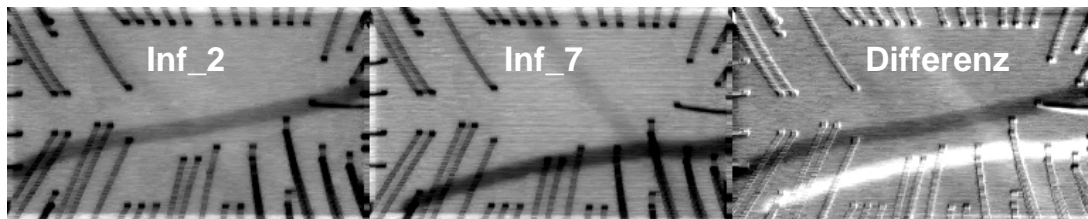


Abbildung 7: Vergleich zweier Bauteile desselben Typs. Winkelbereich: $0,2^\circ$; Schrittweite: $0,01^\circ$; Photonenenergie: 17,5 keV ($\lambda = 0,071$ nm). Rechts: Inf_7 – Inf_2. Inf_2 ist stärker gekrümmt, da der Reflexstreifen bei gleichen Winkelschritten größere Wegdifferenzen zurücklegt als bei Inf_7.

gekrümmt. In der Differenzdarstellung ist dies sehr gut zu erkennen. In Abbildung 8 ist eine vergleichende Messung desselben Bauteils bei unterschiedlichen Bauteiltemperaturen wiedergegeben. Es ist gut zu erkennen, dass die Druckspannung auf den Chip im erwärmten Bauteil geringer ist.

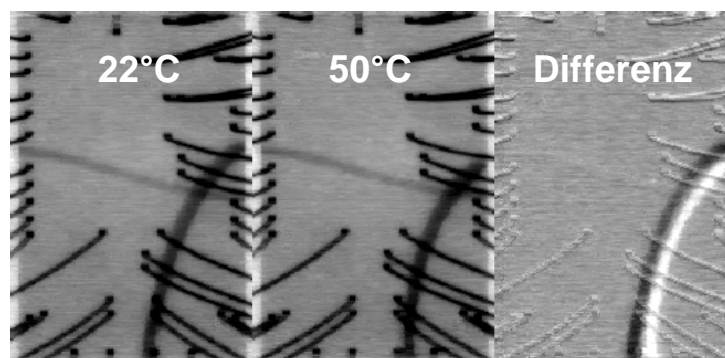


Abbildung 8: Vergleich desselben Bauteils (Inf_2) bei unterschiedlichen Bauteiltemperaturen. Winkelbereich: $0,9^\circ$; Schrittweite: $0,01^\circ$; Photonenenergie: 17,5 keV ($\lambda = 0,071$ nm). Rechts: $22^\circ\text{C} - 50^\circ\text{C}$. Der Chip im erwärmten Bauteil ist weniger gekrümmt, wie auf Grund der Materialparameter erwartet.

Ergebnis

Zur quantitativen Analyse werden alle Positionen der Isoklinen einer Messung akkumuliert. Es entsteht ein Linienmuster, das dem Newtonscher Ringen an dünnen transparenten Schichten ähnelt. Auch hier bedeutet ein enger Linienabstand eine hohe lokale Krümmung des Mediums. Abbildung 9 zeigt die Akkumulation dieser Isoklinen für einen Winkelbereich von $0,11^\circ$ (Schrittweite = $0,001^\circ$), und im Hintergrund das Radiogramm des untersuchten Bauteils. Der lokale Einfluss von Draht-Bondpunkten und Bleilot-Fehlstellen auf die Form und Dichte der Isoklinen lässt sich sehr gut erkennen (siehe Abb. 9, Bildmitte). Aus Abbildung 9 lässt sich durch zeilenweise Integration über die inversen Isoklinen-

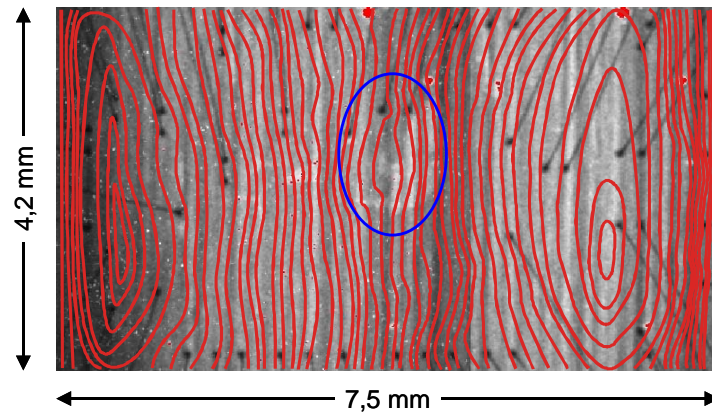


Abbildung 9: Akkumulation der Isoklinen (rote Linien) einer Messung (Photonenenergie: 55 keV, Winkelbereich: $0,11^\circ$, Schrittweite: $0,001^\circ$, Pixel-Größe: $7,2 \mu\text{m} \times 7,2 \mu\text{m}$). Im Hintergrund das Radiogramm des Bauteils. Verformungen im Bereich fehlenden Bleilots (helle Stellen im Radiogramm, durch blaues Oval in Bildmitte markiert) sowie an Draht-Bondpunkten sind gut zu erkennen.

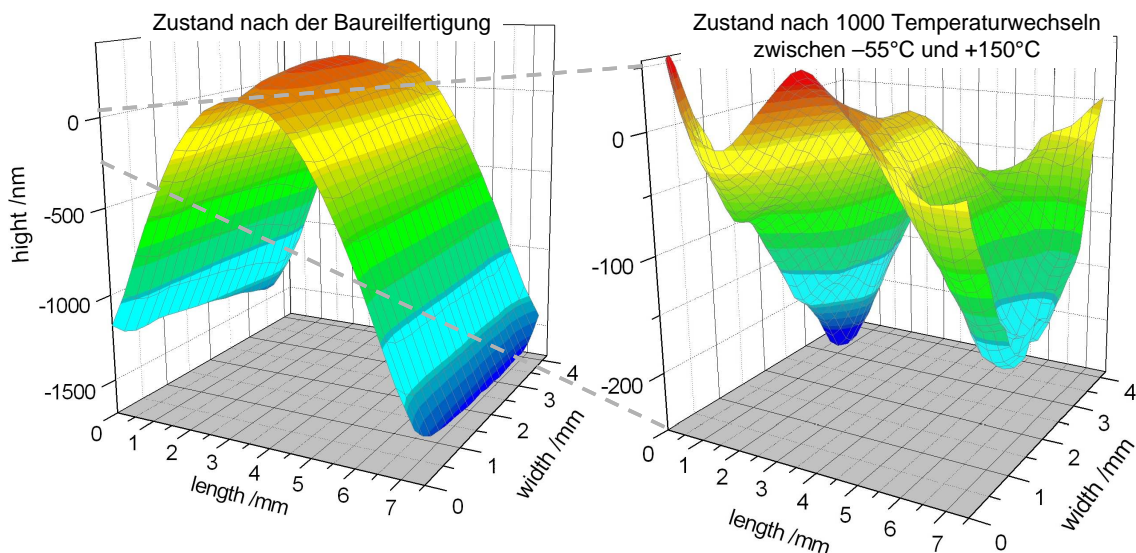


Abbildung 10: Oberflächenprofil eines Chips der Größe $7,5 \text{ mm} \times 4,2 \text{ mm} \times 0,2 \text{ mm}$. Links: nach ordnungsgemäßer Fertigung. Rechts: nach 1000 Wechseln der Umgebungstemperatur zwischen -55°C und 150°C .

Abstände ein Oberflächenprofil des Chips erzeugen. Die laterale Auflösung hängt vom verwendeten Kamerasystem ab ($0,7 \mu\text{m} \times 0,7 \mu\text{m}$ bis $10 \mu\text{m} \times 10 \mu\text{m}$) und betrug $7,2 \mu\text{m} \times 7,2 \mu\text{m}$. Die Genauigkeit der Höhenangabe hängt von der Winkelgenauigkeit des Goniometers sowie der Bestimmung der Linienbreite der Isoklinen ab und liegt bei ca. $\pm 7\%$. Abbildung 10 zeigt das Oberflächenprofil eines Chips in zwei Zuständen. Links: bei Raumtem-

peratur nach ordnungsgemäßer Lötung auf das Cu-Blech und Umhüllung mit Pressmasse. Der Chip hat eine Größe von 7,5 mm x 4,2 mm x 0,2 mm und eine Durchbiegung von ca. 1,5 μm . Rechts: nach 1000 Wechseln der Umgebungstemperatur zwischen -55°C und 150°C . Aus der „Schildkröte“ ist eine Art „fliegender Teppich“ mit hochgezogenen Ecken geworden, der nur noch eine vertikale Verformungsamplitude von knapp 300 nm aufweist. Das Lot ist hier unter dem TC-Stress degradiert, was sich auf komplementäre Weise mit akustischer Rastermikroskopie verifizieren lässt.

Die Auswirkung der Au-Drahtbondung und des Bleilot-Lunkers ist in Abbildung 9 am Verlauf der Isoklinen deutlich zu erkennen. Diese Auswirkung auf die Chipoberfläche lässt

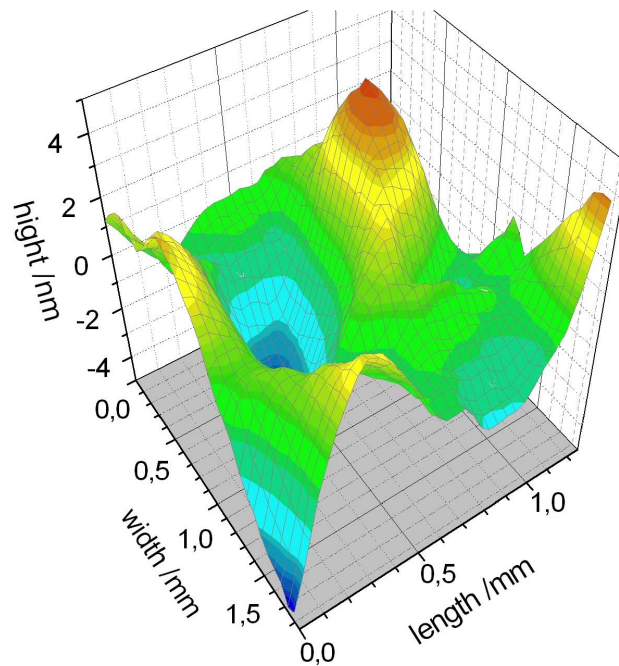


Abbildung 11: Oberflächenprofil des Chips im Bereich des Bleilot-Lunkers und der Au-Drahtbondung (siehe markierten Bereich in Abb. 9) nach Abzug eines parabolischen Untergrunds.

sich nach Subtraktion eines parabolischen Untergrundes als etwa 10 nm tiefe Mulde in Abbildung 11 mit einer Genauigkeit von ± 1 nm nachweisen. Lokale Verformungen können der Beginn späteren Materialversagens wie Riss oder Bruch sein. Diese Verformungen lassen sich wieder mit FEM berechnen und die Rissgefährdung durch Nano-Bruchmechanik abtasten. Nach einer "Kalibrierung" durch eine entsprechende Nano-ZfP wird im Prinzip auch eine virtuelle Nano-Zuverlässigkeits-Vorhersage möglich.

Referenzen

- [1] Müller, B.R., Görner, W., Hentschel, M.P., Riesemeier, H., Krumrey, M., Ulm, G. Diete, W., Klein, U., Frahm, R.; "BAMline: the first hard X-ray beamline at BESSY II", Nucl. Inst. and Meth. in Phys. Res. A, 467/468, 703-706, (2001)
- [2] P. Alpern, V. Wicher and R. Tilgner; "A simple test chip to assess chip and package design in case of plastic assembling", IEEE Trans. CPMT A17 (3) pp. 583-589 (1994); Erratum in 1995 18, 862-863
- [3] P. Alpern, H. Pape and R. Tilgner; "Schadensmechanismen bei kunststoffgekapselten integrierten Schaltungen unter Temperaturwechselbelastung", VTE 10 (1998) Heft 1, pp. 10-18
- [4] Z. Suo; „Reliability of Interconnect Structures“, Chapter in vol.8: Interfacial and Nanoscale Failure (W. Gerberich, W. Yang, Editors) Comprehensive Structural Integrity (I. Milne, R.O. Ritchie, B. Karihaloo, Editors-in-Chief) Elsevier 2003
- [5] Official Journal of the European Union, "Directive 2002/95/EC of the European Parliament and of the Council of 27 January 2003 on the restriction of the use of certain hazardous substances in electrical and electronic equipment" L37/19-23, Annex, point 7.