Baden-Württemberg Stiftung

WIR STIFTEN ZUKUNFT

Forschungsergebnisse

Optische Technologien

der Baden-Württemberg Stiftung gGmbH

Form- und Dehnungsänderung unter thermischer Last hochdynamisch messen

Form- und Dehnungsänderung unter thermischer Last hochdynamisch messen

Die Industrie hat großen Bedarf an hochdynamischen Messsystemen, die die schnelle mikroskopische Verformung von Elektronikbauteilen unter hoher thermischer Last messen können. Denn hohe Temperaturen bzw. starke Temperaturschwankungen verursachen mehr als die Hälfte aller Baugruppenausfälle. Im Rahmen des Forschungsprojekts „HoloSkop HT“ wurde jetzt ein optisches Messsystem realisiert, das flächenhafte Verformungen bei extrem hohen Temperaturdifferenzen messen kann. Das Messsystem kombiniert dazu die Mehrwellenlängen-Holographie mit der Videoendoskopie. Das Ergebnis ist sehr vielversprechend: Sowohl die Orts- als auch die Zeitauflösung des Messsystems sind sehr hoch.

Temperaturdifferenzen von deutlich mehr als 500 K sind eine Herausforderung an eine zuverlässige Aufbau- und Verbindungtechnik (AVT) in der Mikrosystemtechnik. Eine Schlüsselkompetenz zur Entwicklung und Optimierung neuartiger Sensorik in der AVT ist die flächenhafte Messung der tatsächlichen Form- und Dehnungsänderung mit hoher Orts- und Zeitauflösung unter thermischer Last. Nur so lassen sich das Anwendungsspektrum und die Zuverlässigkeit von Sensoren und Aktoren deutlich steigern. Denn die Lebensdauer elektronischer Baugruppen wird vor allem durch die Höhe der Temperaturdifferenz und die Anzahl der thermischen Lastwechsel bestimmt.

Mikrosysteme sowie Elektronikbauteile bestehen meist aus einer Kombination verschiedener Werkstoffe, z. B. Siliziumkarbid (SiC) und Aluminiumoxid (Al2O3). Deren unterschiedliche thermische Ausdehnungskoeffizienten erzeugen mechanische Spannungen im Bauteil (Abb. 1). Die daraus resultierenden Verformungen führen nach einer endlichen Zeit zum strukturellen Versagen. Als erste Folge sind meist offene Kontakte (Risse) zu beobachten.

Messtechnik effizienter als Simulation

Bei der Simulation von Bauteilen stellt nicht nur die Abbildung der Funktionalität eine große Herausforderung dar, sondern auch die Bauteilzuverlässigkeit muss gemäß den Erwartungen berücksichtigt werden. Dafür gibt heutzutage zwar Simulationswerkzeuge, doch diese benötigen präzise Materialkennwerte. Das Problem dabei ist jedoch, dass der für die Verformung wichtige Wärmeausdehnungskoeffizient eine temperaturabhängige Größe ist. Je höher die Temperatur angesetzt wird, desto weniger Koeffizienten sind bekannt. Auch bei bekannten Werten kann bei inhomogenen Bauteilen nicht auf das reale Verhalten geschlossen werden. Somit sind Vorhersagen aus den Simulationen grundsätzlich durch Experimente zu bestätigen. Dabei genügt es nicht, mittels thermischer Lastwechsel die charakteristische Lebensdauer zu bestimmen. Aussagen über die wahren Ursachen für das Versagen eines Bauteils können nur flächenhafte Form- und Dehnungsmessungen liefern, die mit hinreichender Orts- und Zeitauflösung zusätzlich neue Materialkennwerte generieren.

Interferometrische Verformungsmessung

Bestehende Verfahren zur präzisen Verformungsmessung lassen sich in zwei Gruppen unterteilen: in Interferometrie-Verfahren für höchste Genauigkeit und in Triangulations-Verfahren für einfachere Messaufgaben.

Aus der Gruppe der triangulatorischen Verfahren wird neben den Streifenprojektions- und Lichtschnittverfahren häufig auch die digitale Grauwertkorrelation zur Messung der Form bzw. der Verformung genutzt. Die Funktionsweise eines solchen Systems entspricht der einer Stereokamera mit automatisierter Auswertung: Zwei Kameras nehmen synchron Bilder des gleichen Objekts aus leicht unterschiedlichen Richtungen auf. Anhand der Unterschiede zwischen den beiden Bildern lässt sich dann die 3D-Form bestimmen. Die Verformung des

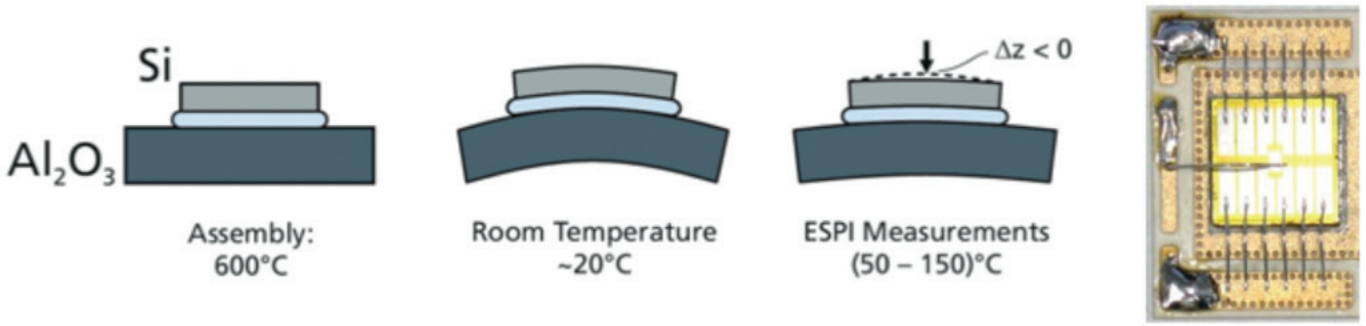


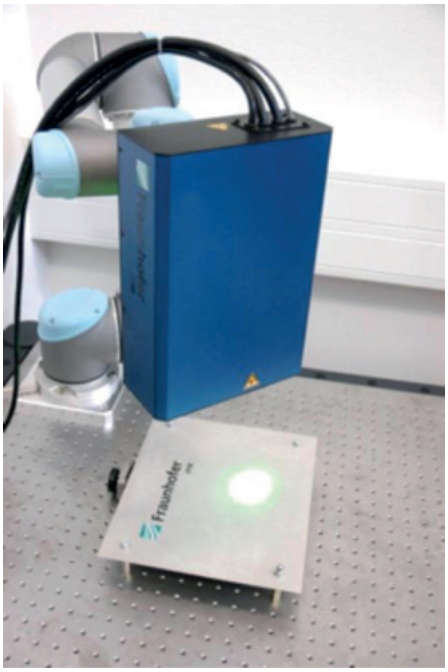
Abb. 1: Hohe Temperaturdifferenzen und thermische Lastwechsel führen bei einem Transistor zu flächenhaften Verformungen und beeinflussen somit maßgeblich dessen Lebensdauer.

Prüflings erhält man, indem man mehrere Messungen miteinander vergleicht. Die Messraten solcher Systeme sind technisch durch die maximale Bildrate der verwendeten Kameras begrenzt, sodass beispielsweise 40 Messungen pro Sekunde realisiert werden. Die erreichbaren Messgenauigkeiten begrenzen allerdings den Einsatz in der Vermessung mikroskopischer Verformungen. Moderne Systeme ermöglichen Verformungsmessungen mit Genauigkeiten im unteren Mikrometerbereich. Mit solchen Auflösungen lassen sich bereits Versagensursachen lokalisieren. Zur sorgfältigen Erschließung des Themas „Hochtemperaturtechnik“ sind die Anforderungen an die Messgenauigkeit aber mindestens um eine Größenordnung höher.

Für Messaufgaben, die höhere Präzision verlangen, kommen in der Regel interferometrische Verfahren zum Einsatz. Das sicherlich meistgenutzte Verfahren aus dieser Gruppe ist die klassische elektronische Specklemuster-Interferometrie (ESPI). Damit werden typische Verformungsmessgenauigkeiten von unter 100 nm erreicht. Klassische ESPI-Verfahren nutzen häufig zeitliche Phasenschiebe-Verfahren. Für die Erfassung aller benötigten Informationen des aktuellen Verformungszustands ist daher stets die Aufnahme einer Folge von Kamerabildern nötig. Während der Aufnahmezeit dieser Bilder muss das zu vermessende Objekt bezüglich Position und Form absolut stabil sein, da ansonsten die Messung verfälscht wird. Das heißt, dass die Messungen nur im thermisch stabil eingeschwungenen Zustand erfolgen können. Die Gesamtzeit, die für eine Versuchsreihe zur Untersuchung der mechanischen Verformung aufgrund thermischer Last benötigt wird, wird dadurch nach dem Stand der Technik extrem lang. Die Untersuchung der Folgen dynamischer thermischer Prozesse, wie Lastwechselzyklen, ist mit zeitlich phasenschiebenden ESPI-Verfahren praktisch unmöglich.

Mehrwellenlängen-Holographie mit ESPI

Die digitale Mehrwellenlängen-Holographie hat sich in den letzten Jahren als äußerst schnelles und präzises Verfahren zur 3D-Vermessung technischer Oberflächen etabliert. Genau wie die zuvor genannten ESPI-Verfahren beruht die digitale Mehrwellenlängen-Holographie auf Methoden der Interferometrie. Dazu wird Laserlicht in eine Objekt- und eine Referenzwelle aufgeteilt. Die Objektwelle beleuchtet die zu vermessende Oberfläche. Das rückgestreute Licht wird anschließend mit der Referenzwelle überlagert. Das dabei entstehende Interferenzbild wird mit einer Digitalkamera aufgenommen. Im Gegensatz zu vielen etablierten interferometrischen Verfahren wird hier ein Single-shot-Ansatz verfolgt, d. h. nur ein Kamerabild ist erforderlich, um die volle Information über die Objektwelle zu erhalten (Abb. 2). Möglich wird dies dadurch, dass die Referenzwelle nicht senkrecht auf den Kamerachip



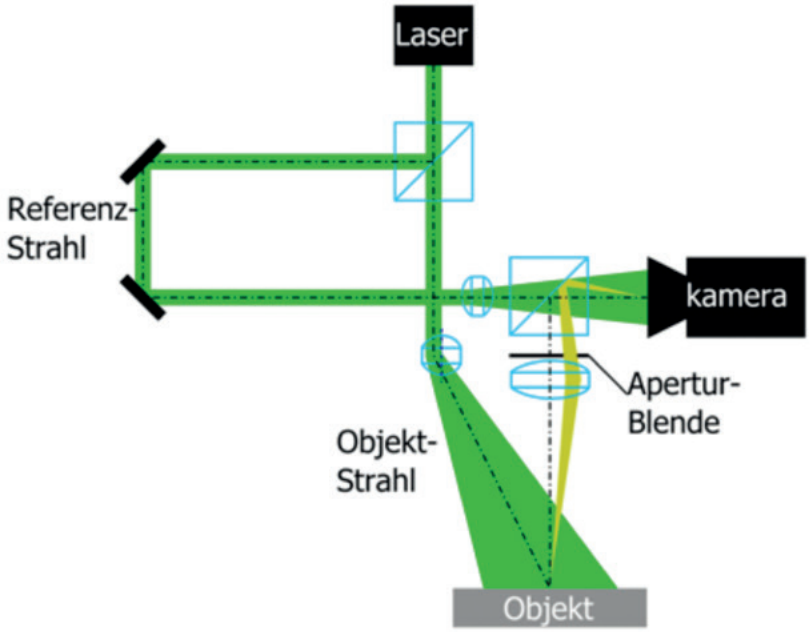


Abb. 2: Optischer Aufbau zur Single-shot-Messung kleinster Verformungen mithilfe der digitalen Mehrwellenlängen-Holographie. Links der Laboraufbau, rechts die Prinzip-Skizze.

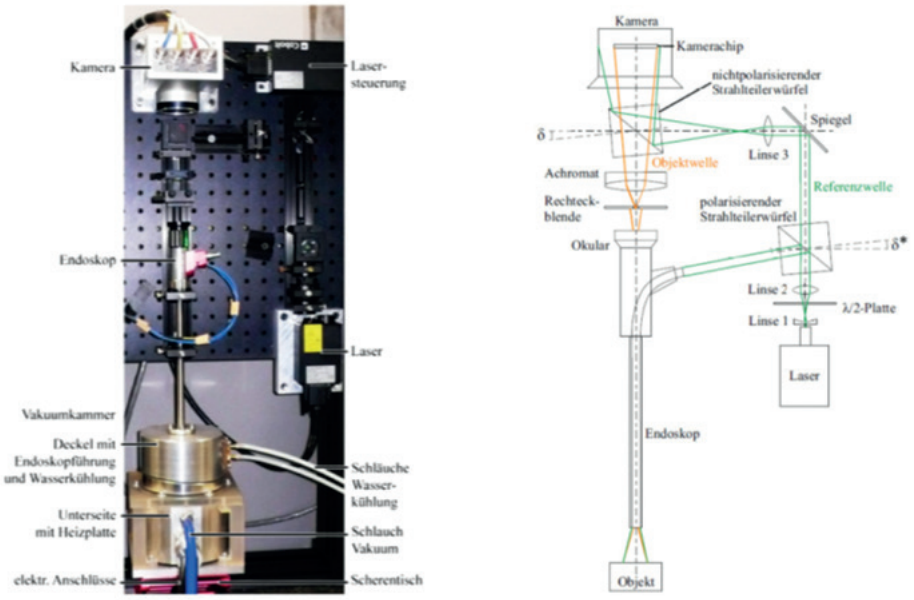


Abb. 3: Ein im Projekt HoloSkop HT entwickeltes Messsystem zur endoskopischen Verformungsmessung erfasst Verformungen mit hoher Orts- und Zeitauflösung und erlaubt somit eine Bauteiloptimierung (links der Laboraufbau, rechts die Prinzip-Skizze).

fällt, sondern unter einem kleinen Winkel. Das entstehende Interferenzmuster wird dadurch mit einer räumlichen Trägerwelle beaufschlagt und als räumlich phasengeschobenes Interferogramm bezeichnet. Die räumliche Trägerfrequenz ermöglicht die anschließende Rekonstruktion der komplexen Objektwelle durch zweidimensionale Fouriertransformation, spektrale Filterung und anschließende Rücktransformation.

Die komplexe Objektwelle enthält sowohl die Amplitudeninformation, also ein Helligkeitsbild des Objekts, als auch die Phase in jedem Bildpunkt. Die Phase trägt dabei die Information über die Form und Verformung des Objekts. Klassische ESPI-Ansätze sind in ihrem eindeutigen Messbereich in der Regel durch die Wellenlänge limitiert. Denn nur für Verformungen kleiner als die halbe Wellenlänge ist das Messergebnis eindeutig einem Verformungsweg zuzuordnen. Diese Einschränkung wird in der digitalen Mehrwellenlängen-Holographie durch die Verwendung mehrerer unterschiedlicher Wellenlängen überwunden. Der eindeutige Messbereich der Verformungsmessung wird dabei auf die sogenannte synthetische Wellenlänge erweitert. Dabei kann die synthetische Wellenlänge um mehrere Zehnerpotenzen größer sein als die beiden Einzelwellenlängen, und damit auch der eindeutige Messbereich der Verformungsmessung. Die digitale Mehrwellenlängen-Holographie erreicht so auch an rauen Oberflächen Messauflösungen bis in den Sub-µm-Bereich.

Kombiniert man die digitale Mehrwellenlängenholographie mit dem Ansatz der elektronischen Speckle-Interferometrie, so ergeben sich darüber hinaus ganz neue Möglichkeiten. Das Ergebnis sind Genauigkeiten in der Verformungsmessung im Sub-100-nm-Bereich, während der eindeutige Messbereich weiterhin in der Größenordnung von 10 µm und mehr liegen kann. Durch Verwendung sehr schneller Kameras können mit dieser Methode auch dynamische Verformungsprozesse untersucht werden.

System zur Verformungsmessung an Hochtemperaturbauteilen

Will man die eben beschriebene Messtechnik zur Messung thermisch bedingter Oberflächenverformungen einsetzen, hat man bei normaler Luftatmosphäre Probleme mit Schlierenbildung. Diese würden die empfindliche Verformungsmessung verfälschen. Daher muss man bei der Konstruktion des Messsystems beachten, dass der optische Weg durch die Temperaturänderungen nicht beeinflusst werden darf. Dazu wird das Messobjekt in einer Kammer platziert, die sich evakuieren lässt und endoskopisch für das Messsystem zugänglich ist (Abb. 3).

Typisches Messbeispiel

In einem Experiment zur optischen Erfassung der wärmeinduzierten Verformung eines Bauelements wird z. B. eine Platine (PCB-Substrat, Al2O3) mit einem darauf verlöteten elektronischen Schaltkreis (Low-profile Fine-pitch Ball Grid Array, kurz: LFBGA) thermisch belastet. Die Belastung erfolgt zyklisch zwischen Raumtemperatur und bis zu 500 °C. Die auf der Platine angeordneten elektrischen Anschlüsse ermöglichen die sofortige Erfassung von Unterbrechungen (Rissen) der Lötstellen zwischen dem Schaltkreis und der Platine. Die Temperatur der Probe wird in dieser Kammer durch Konduktion verändert. Das Aufheizen gelingt derzeit innerhalb einer Minute, wogegen die passive Kühlung einen Abkühlprozess von ca. 20 Minuten bedingt. Das Heizelement kann sich nach unten frei ausdehnen, wodurch seine Oberseite bei Temperaturänderung positionsstabil bleibt. Eine Glaskeramik mit vernach

lässigbarer thermischer Ausdehnung dient als Werkstoff für den Grundkörper und die Halterung.

In dieser Messkammer wurde der zeitliche Verlauf der gemessenen Durchbiegung eines Transistors bei einer Beschaltung mit einem Rechtecksignal mithilfe eines digitalholographischen Sensors gemessen (Abb. 4). Deutlich erkennbar ist in den Messdaten die Erhöhung der Krümmung während der jeweiligen 5 ms dauernden Bestromung des Transistors. In den anschließenden 5 ms, in denen der Transistor stromlos ist, stoppt die Verformung und bildet sich sogar teilweise zurück, bevor der nächste Schaltzyklus beginnt. Durch die hohe Messrate von 523 Bildern pro Sekunde gelang es im Projekt HoloSkop HT erstmals, räumlich und gleichzeitig zeitlich hochaufgelöste Verformungsmessungen unter realen Schaltbedingungen an Leistungselektronikkomponenten durchzuführen. Die Auswertung geschieht mit 22 Hz, die Messgenauigkeit liegt bei 10 nm.

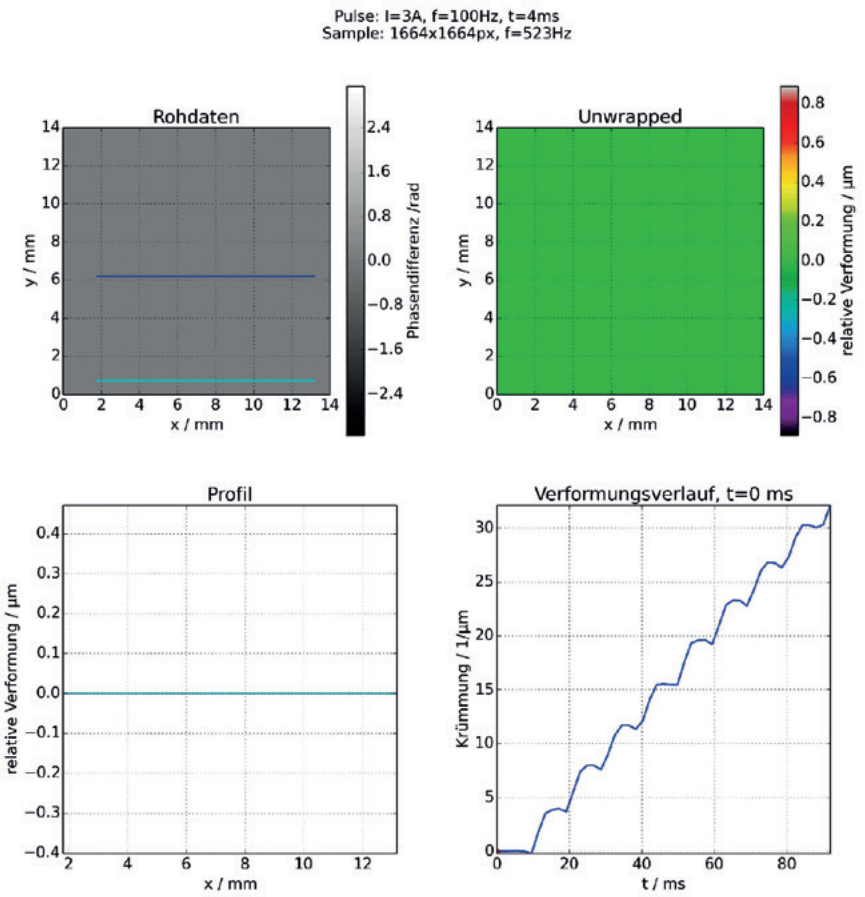


Abb. 4: Zeitlicher Verformungsverlauf der gemessenen Durchbiegung eines Transistors bei einer Beschaltung mit einem Rechtecksignal. Deutlich erkennbar ist die Erhöhung der Krümmung während der jeweiligen 5 ms dauernden Bestromung des Transistors. In den anschließenden 5 ms, in denen der Transistor stromlos ist, stoppt die Verformung und bildet sich sogar teilweise zurück, bevor der nächste Schaltzyklus beginnt.

Abbildung 5 zeigt zur gleichen Messung Profilschnitte der gemessenen Oberflächenverformung. Während der Erwärmung biegt sich das Bauteil im Maximum um 550 nm nach unten durch. Die Messunsicherheit der einzelnen Messpunkte liegt dabei deutlich unter 100 nm.

Ausblick

Mithilfe des neuartigen Konzepts lässt sich das mechanische Verhalten von Hochtemperatur-Mikrosystemen unter thermischer Last mit sehr hoher Präzision messen. Durch den großen abgedeckten Temperaturbereich bis 500 °C lassen sich z. B. Hochtemperatursensoren unter realistischen Umgebungsbedingungen prüfen. Die mechanische Verformung und die damit einhergehenden Belastungen der untersuchten Sensoren, insbesondere der mechanischen Verbindung von Sensorik und Peripherie, lassen sich mit deutlich gesteigerter räumlicher und zeitlicher Auflösung quantitativ erfassen. Das System eignet sich als wichtiges Werkzeug für weitere Entwicklungen in der Aufbau- und Verbindungstechnik.

Danksagung

Besonderer Dank der Autoren gilt der Baden-Württemberg-Stiftung gGmbH, deren Finanzierung diese Arbeit im Rahmen des Forschungsprogramms „Optische Technologien“ ermöglicht.

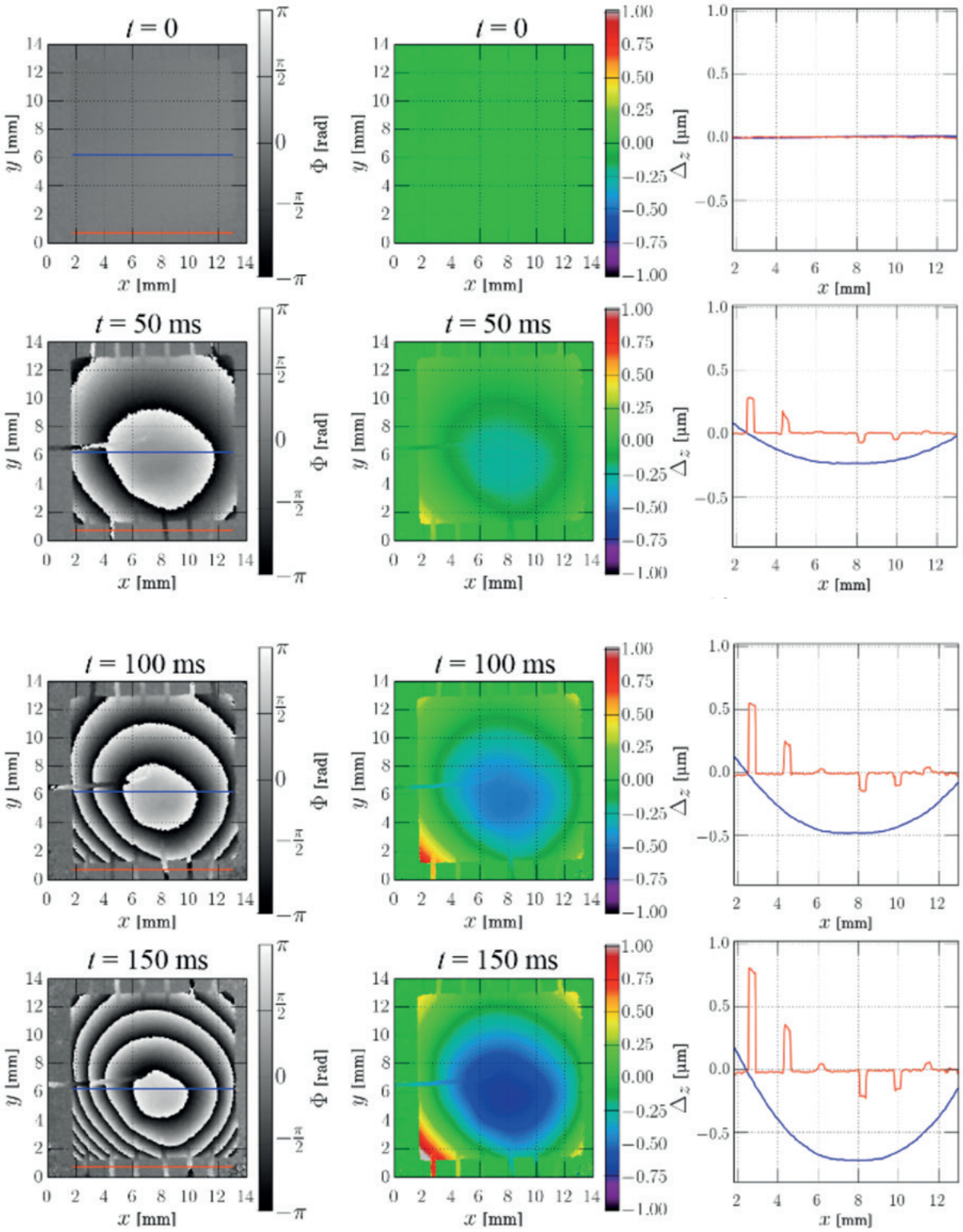


Abb. 5: Verformungsmessung eines Transistors. Schaltfrequenz 50 Hz, Messrate 523 Hz, 2,5 Mio. Messpunkten. Linke Spalte: Phasenbilder zu verschiedenen Zeitpunkten der Verformungsmessung (Wertebereich [-ϖ, ϖ]. Mittlere Spalte: Entfaltete Verformungsbilder (Höhendaten in µm). Rechte Spalte: Schnitte durch die Verformungsbilder mittig durch den Transistor (blau) und durch die Bonddrähtchen (rot) gemäß der eingezeichneten Linien in den Bildern der linken Spalte.

Literatur:

[1] Steiert, M.; Zeiser, R.; Berndt, M.: Verformungsmessung an elektronischen Bauteilen und Baugruppen mit Grauwertkorrelation und Holografie, Elektronische Baugruppen und Leiterplatten: DVS-Berichtsband 301, ISBN 978-3-87155-573-2, S. 159-165 (2014).

[2] Steiert, M.; Beckmann, T.; Fratz, M.; Berndt, M.; Wilde, J.: Neue Messverfahren zur Form- und Verformungsmessung an elektronischen Bauteilen unter thermischer Belastung, PLUS Fachzeitschrift für Produktion von Leiterplatten und Systemen, ISSN 1436-7505, Heft 3, S. 573-581 (2014).

[3] Fratz, M., Dold, S., Beckmann, T., Steiert, M., Ocklenburg, J., Tondorf, M., Berndt, M., Carl, M.: High-speed electronic speckle interferometry for the analysis of transient deformations in electronics assemblies, in Applied Optics (2015), in preparation.

[4] Fratz, M.; Carl, D.; Zeiser, R.; Berndt M.: Optische Verformungsmessungen an Mikrosystemen bei extremen Temperaturdifferenzen, Photonik 2013(6), S. 34-37 (2013).

[5] Steiert, M.; Zeiser, R.; Berndt, M.; Wilde, J.; Fratz, M.; Beckmann, T.: „Verformungsmessung von Mikrosystemen bei hohen Temperaturen mit ESPI, DIC und Holographie“, Mikrosystemtechnik Kongress / Aachen, VDE Verlag GmbH (2013).

[6] Berndt, M.; Zeiser, R.; Steiert, M.; Carl, D.; Fratz, M.: „Verformung von Mikrosystemen bei hohen Temperaturen“, Deutsche Gesellschaft für angewandte Optik / Braunschweig / PTB (2013).

[7] Steiert, M.; Zeiser, R.; Berndt, M.: „Verformungsmessung von Elektronikbauteilen bei hohen Temperaturen mittels Mehrwellenlängen-Holographie“, Fortschritte in der Werkstoffprüfung für Forschung und Praxis / Ulm / DGM, ISBN 978-3-514-00806-9, S.307-312 (2013).

[8] Steiert, M.; Hanka, K.; Zeiser, R.; Berndt, M.: Verformung von Mikrosystemen bei hohen Temperaturen, BW-Forschungstag, Stuttgart (2013).

[9] Beckmann, T.; Fratz, M.; Bertz, A.; Carl, D.: „High-speed deformation measurement using spatially phase-shifted speckle interferometry”, SPIE Photonics West 2014, Paper 9006-13 (2014).

Dr.-Ing. Markus Fratz
Fraunhofer-Institut
für Physikalische Messtechnik IPM
Heidenhofstr. 8
D-79110 Freiburg
Tel. 0761 18857-178
markus.fratz@ipm.fraunhofer.de
www.ipm.fraunhofer.de

Dr. Daniel Carl
Fraunhofer-Institut
für Physikalische Messtechnik IPM
Heidenhofstr. 8
D-79110 Freiburg
Tel. 0761 18857-549
daniel.carl@ipm.fraunhofer.de
www.ipm.fraunhofer.de

Dr.-Ing. Michael Berndt
Albert-Ludwigs-Universität Freiburg
IMTEK - AVT
Georges-Köhler-Allee 103
D-79110 Freiburg
Tel. 0761 203-7296
michael.berndt@imtek.uni-freiburg.de
www.imtek.de

Prof. Dr.-Ing. Jürgen Wilde
Albert-Ludwigs-Universität Freiburg
IMTEK - AVT
Georges-Köhler-Allee 103
D-79110 Freiburg
Tel. 0761 203-7291
juergen.wilde@imtek.uni-freiburg.de
www.imtek.de