Kombinierter Einsatz von Scherografie und Thermografie zur Charakterisierung thermo-mechanischer Beanspruchung

Combined Shearography and Thermography Measurements of Thermo-mechanical Deformations

Erwin Hack, Eidgenössische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt, Dübendorf (Schweiz)

Manuskripteingang: 31. Januar 2002; zur Veröffentlichung angenommen: 14. März 2002.

Thermisch induzierte Verformungen und insbesondere Scherspannungen sind Schlüsselfaktoren bei Ermüdung und Ausfall von Mikrosystemen. Wir stellen einen Messaufbau vor, mit dem die Temperatur eines Prüflings mittels Thermografie erfasst und gleichzeitig seine Verformung mittels 3D-Scherografie gemessen werden. Die Scherografiekamera basiert auf einem Mehrwellenlängenprinzip. Sie wurde an die Optik eines Thermografiemikroskops angepasst, sodass beide bildgebenden Messsysteme den gleichen Objektausschnitt im gleichen quasi-stationären Betriebszustand sehen. Das System kann benutzt werden, um Systeme im Betrieb zu charakterisieren, ohne das Objekt zu zerstören. Eine erste Versuchsmessung soll das Potential verdeutlichen.

Thermo-mechanically induced deformations and stresses, especially shear stress, are key issues concerning fatigue and failure of microsystems. We report on the development of a combined set-up for measuring temperature by a thermographic camera as well as deformation gradients by 3D-shearography. The 3D-shearographic camera based on a multi-wavelength set-up is adapted to the microscope optics of a thermographic camera in order to view the same area of interest and the same state of operation of the sample under test. The measurement system works for quasi-stationary states and can be used for characterisation of test samples under real operating conditions without being restricted to destructive sample preparation. We present preliminary results of temperature distribution and thermo-mechanical deformation gradients.

Schlagwörter: Thermografie, Scherografie, Verformung, Temperaturmessung, Lasermesstechnik

1 Einleitung

Die fortschreitende Miniaturisierung in der Mikroelektronik und die Einführung von Mikrosystemen erhöhen die Anfälligkeit von Bauteilen auf mechanische Störeinflüsse. Eine höhere Integration der Halbleiter in Kombination mit größeren Chips erhöht die Anforderungen an die Wärmeableitung. Die Zuverlässigkeit der Kapselung wird umso wichtiger; thermisch induzierte Verformungen und daraus resultierende Spannungen werden zu wichtigen Mechanismen der Ermüdung.

Zur Untersuchung thermo-mechanischer Vorgänge bietet sich eine Kombination von Thermografie und Verformungsmessung an, wie sie in diesem Aufsatz beschrieben wird [1]. Scannende Infrarotdetektoren oder Thermografiekameras können die Temperaturverteilung auf der Oberfläche des zu untersuchenden Systems, aber auch den Wärmeübertrag zwischen IC und Substrat über die Lötverbindungen erfassen. Wärmeleitung und Temperaturfeld können mit der Verbindungsqualität korreliert werden – eine fehlerhafte Lötung behindert den Wärmeübertrag.

Optische Methoden der Verformungsmessung wie Digitale Speckle-Pattern-Interferometrie (DSPI) oder 3D-Scherografie [2; 3] sind auf denselben Effekt empfindlich, registrieren allerdings die mit einer Temperaturänderung einhergehende Verformung. Um Aussagen über die Lebensdauer eines Systems machen zu können, ist die Messung unter realistischen Betriebsbedingungen unabdingbar. Nur hier treten mögliche lokale Überhitzungen oder Spannungsspitzen zu Tage, die bei einer Alterungsuntersuchung bei homogener Temperatur nicht entdeckt werden.

2 Versuchsaufbau

2.1 Scherografie-Kamera

Die 3D-Scherografiekamera wurde im Brite/EuRAM-Projekt *Multi-Wavelengths Shearography* (MuWaS) entwickelt und an anderem Ort beschrieben [4; 5]. Um genügend Information über den Dehnungszustand einer Objektoberfläche zu erhalten, muss die Verformung bildgebend in drei Richtungen erfasst werden. Dies wurde erreicht, indem drei IR-Laserdioden verschiedener Wellenlänge den Prüfling aus drei verschiedenen Raumrichtungen gleichzeitig beleuchten. Diodenlaser mit Wellenlängen von 810 nm, 830 nm und 850 nm und einer Leistung zwischen 90 und 200 mW wurden verwendet. Eine Fläche von ca. $20 \times 20 \text{ mm}^2$ konnte ohne Aufweitungsoptik ausgeleuchtet werden.

Der Scherografie-Messkopf ist schematisch in Bild 1 dargestellt. Ein Objektiv mit 35 mm Brennweite (Schneider) bildet das Objekt in ein Michelson-Interferometer ab. Dieses dient als Scherelement, in dem das einfallende Licht in zwei Arme geteilt wird. Der sog. Referenzarm enthält einen Spiegel M_{ref} , der auf einem Piezoaktuator montiert ist und zur Aufnahme phasenverschobener Interferenzbilder dient.

Um zwischen zwei Scherrichtungen umzuschalten, wurde eine am ILM (Ulm) entwickelte Methode eingesetzt [6]. Über den polarisierenden Strahlteilerwürfel im Objektarm des Michelson-Interferometers wird das einfallende (45°-

polarisierte oder unpolarisierte) Licht getrennt nach waagrecht und senkrecht Polarisation auf die beiden Spiegel M_x und M_y gelenkt. Die beiden Spiegel induzieren eine Bildkipfung in x - bzw. y -Richtung. Da das Flüssigkristall-Element als schaltbare, unter 45° angeordnete $\lambda/2$ -Platte dient, kann zusammen mit dem polarisierenden Strahlteiler der Farbtrennoptik zwischen den Scherrichtungen umgeschaltet werden.

Ein zweites Objektiv bildet das Zwischenbild des Eingangsobjektivs 1 : 1 durch die Farbtrennoptik auf die CCD-Kameras ab. Horizontal polarisiertes Licht von 850 nm geht ungehindert durch den polarisierenden Strahlteilerwürfel (PBS) und den Bandpassfilter F2 auf Kamera CCD 2. Senkrecht polarisiertes Licht wird in Richtung CCD 1 gelenkt. Ein Bandpassfilter bei 810 nm (F1) lässt das Licht der entsprechenden Laserdiode passieren, wirft aber die anderen Wellenlängen dank der $\lambda/4$ -Platte Richtung CCD 3 zurück. Der entsprechende Bandpassfilter F3 lässt schließlich nur die Wellenlänge 830 nm auf CCD 3 gelangen. Diese Anordnung führt zu hohen Speckleintensitäten auf allen drei Kameras.

Die Bandpassfilter mit einer vollen Breite auf halber Höhe von $\Delta\lambda = 10 \pm 2 \text{ nm}$ und einer zentralen Transmission von 80%–90% stellen sicher, dass Licht nur einer Wellenlänge die entsprechende CCD-Kamera erreicht, und Geisterbilder der anderen Wellenlängen unterdrückt werden. Für optimalen Betrieb wurden die Diodenlaser über die Betriebstemperatur auf die zentrale Wellenlänge der Bandpassfilter abgestimmt.

Die drei synchron arbeitenden S/W-CCD-Bordkameras wurden an die RGB-Eingänge einer Farb-Bilderfassungskarte IC-PCI (Imaging Technology Inc.) angeschlossen. Damit konnten die drei Phasenbilder der drei Laser simultan aufgenommen werden. Die Steuerungssoftware wurde in einer LabVIEW-Umgebung (National Instruments) realisiert.

2.2 Thermoemissions-Mikroskop

Die Thermografiekamera ist Teil des LN2-gekühlten, scannenden Infrarotmikroskops Computherm III (EDO Barnes) im Wellenlängenbereich 3–5 μm . Das Gerät wird für Untersuchungen von mikroelektronischen Komponenten von minimal $2 \times 2 \text{ mm}^2$ Größe eingesetzt und hat eine Scanauflösung von maximal 128×128 Punkten. Wegen der relativ langen Scanzeit von 2,5 s – das ist deutlich länger als eine 3D-Scherografiemessung braucht – ist ein Einsatz nur für quasi-stationäre Temperaturverteilungen sinnvoll. Mit Hilfe eines Peltier-Elementes lässt sich die Emissivität in jedem Scanpunkt über zwei definierte Temperaturen individuell kalibrieren.

Das Thermoemissions-Mikroskop besitzt eine Hybridoptik, die einerseits die Infrarotstrahlung auf den IR-Scanner abbildet, andererseits eine Zwischenabbildung für sichtbares Licht auf ein Okular zur visuellen Überprüfung des Bildausschnitts ermöglicht. Der Scherografie-Messkopf wurde

Bild 1: Scherografischer 3D-Messkopf mit Strahlteilern (BS, PBS), Bandpass-Filtern (F1, F2, F3) und $\lambda/4$ -Platte ($\lambda/4$). Das Flüssigkristall-Element (LCD) und die polarisierenden Strahlteilerwürfel (PBS) dienen zum Umschalten zwischen zwei Scherrichtungen (Spiegel M_x bzw. M_y).

Bild 2: Messaufbau, schematisch. Die Ringlinse bildet die IR-Strahlung des Objekts auf den IR-Scanner ab. Die Strahlung der drei Laserdioden wird koaxial über einen Spiegel in den Scherografie-Messkopf abgebildet. Einzelheiten sind dem Text zu entnehmen.

Bild 3: Gesamtansicht des Messaufbaus. Unten sind die drei Laserdioden und der Probentisch erkennbar. Die Laser sind in den Ecken eines Rechtecks von $170 \times 230 \text{ mm}^2$ angeordnet.

anstelle des Okulars angebracht, wobei die Zwischenoptik angepasst werden musste. Bild 2 zeigt den Strahlengang in schematischer Darstellung. Da die Abbildungsoptik für beide Wellenlängenbereiche koaxial ist, sind beide Messsysteme auf den gleichen Prüfkörperausschnitt gerichtet und können den gleichen Betriebszustand erfassen.

Bild 3 zeigt eine Gesamtansicht des Messaufbaus.

3 Erste Ergebnisse

Die folgenden Bilder zeigen erste Ergebnisse an einer Widerstands-Heizfolie. Der Prüfkörper wurde mit konstantem Strom belastet (10 V, 0,2 A). Nachdem der Gleichgewichtszustand der Temperaturverteilung erreicht war, wurden ein Temperaturbild erfasst und die Scherografieaufnahmen gemacht. Daraus wurden die Verformungen innerhalb der Prüfkörperebene und jene aus der Ebene heraus errechnet. Bild 4 zeigt die Temperaturverteilung im Gleichgewichtszustand. Deutlich sichtbar ist der Mäander des Leiters.

Die Bilder 5 bis 7 zeigen die Verformungsgradienten aufgrund der Temperaturerhöhung, dargestellt als Phasenbilder. Nach den Beziehungen der Scherografie werden sechs Ableitungen gemessen: jede kartesische Komponente des Verformungsvektorfeldes (u, v, w) wird in Scherrichtung x bzw. y abgeleitet.

$$\frac{\partial u}{\partial x}, \frac{\partial v}{\partial x} \text{ und } \frac{\partial w}{\partial x} \text{ (Scherrichtung } x \text{)} \quad (1)$$

$$\frac{\partial u}{\partial y}, \frac{\partial v}{\partial y} \text{ und } \frac{\partial w}{\partial y} \text{ (Scherrichtung } y \text{)} \quad (2)$$

Die Umrechnung der Phasenwerte in Dehnungen wurde rechnerisch bestimmt, wobei der Einfluss der verschiedenen Wellenlängen sowie der Geometrie des Messaufbaus berücksichtigt wurden. Die Empfindlichkeit betrug 0,58, 0,81 und $0,28 \mu\text{m}/2\pi$ für die Komponenten u, v und w . Mit

Bild 4: Temperaturverteilung auf der Heizfolie. Die in 128×128 Punkten gerasterte Fläche entspricht $16 \times 16 \text{ mm}^2$.

Bild 5: u -Komponente der Verformung, abgeleitet in x - (oben) bzw. y -Richtung (unten). Das obere Bild entspricht der Querdehnung des Objekts. Da aufgrund der Scherweite Gebiete verschiedener Temperaturen verglichen werden, ist eine Bestimmung der Wärmedehnung nicht möglich.

Bild 6: v -Komponente der Verformung, abgeleitet in x - (oben) bzw. y -Richtung (unten). Das untere Bild entspricht der Dehnung in senkrechter Richtung. Da aufgrund der Scherweite Gebiete verschiedener Temperaturen verglichen werden, ist eine Bestimmung der Wärmedehnung nicht möglich.

Bild 7: w -Komponente der Verformung (aus der Ebene), abgeleitet in x - (oben) bzw. y -Richtung (unten).

einer Scherdistanz von ca. 15% des Bildausschnitts, entsprechend 3 mm, ergibt sich eine Kalibrierung der Bilder 5 bis 7 von 0,19, 0,27 und 0,09 Promille pro 2π Phasenänderung. Der Übergang zwischen schwarz und weiß entspricht dabei einem Ort ohne Verformungsänderung.

(BBW) finanziert. Der Aufsatz ist eine überarbeitete Fassung eines Vortrags [1], der an der FRINGE 2001 in Bremen gehalten wurde.

4 Zusammenfassung und Ausblick

Die ersten Ergebnisse mit dem kombinierten Einsatz von Thermografie und Scherografie sind vielversprechend. Die Anpassung des Scherografie-Messkopfs an das IR-Mikroskop ist erfolgreich, wie an der hohen Qualität der Phasenbilder (Verformungsmessung) gesehen werden kann. Eine Umrechnung auf Dehnungswerte ist beim vorgestellten Prüfobjekt aufgrund der starken Strukturierung allerdings schwierig. Auch wenn ein Einsatz für Bauteile bis zu $2 \times 2 \text{ mm}^2$ noch nicht möglich ist, so kann das System dennoch für thermo-mechanische Untersuchungen von Komponenten und Gehäusen eingesetzt werden.

Danksagung

Die Entwicklung des Scherografie-Messkopfes wurde im Brite/EuRAM-Projekt MuWaS durch die Europäische Kommission und das Schweizerische Bundesamt für Bildung und Wissenschaft

Literatur

- [1] E. Hack, „Combined Shearography and Thermography Measurements on Microelectronic Systems“, Fringe 2001, Eds. W. Osten, W. Jüptner, Elsevier, Amsterdam, 2001, pp. 41–46.
- [2] W. Steinchen, L.X. Yang, and M. Schuth, „TV-shearography for measuring 3D-strains“, Strain 32, 49–57, 1996.
- [3] Y.Y. Hung, and J.Q. Wang, „Dual-beam phase shift shearography for measurements of in-plane strains“, Opt. Lasers Eng. 24, 403–413, 1996.
- [4] R. Kästle, E. Hack, and U. Sennhauser, „Multi-wavelength shearography for quantitative measurements of 2D strain distributions“, Appl. Optics 38, 96–100, 1999.
- [5] E. Hack, „Mehrwellenlängen-Scherografie für die zerstörungsfreie Prüfung und Dehnungsmessung“, tm (2002) im Druck
- [6] T. Siebert, and B. Schmitz, „A new shearing setup for simultaneous measurement of two shear directions“, SPIE, Vol. 3637, 225–230, 1999.

Dr. phil. Erwin Hack, Eidgenössische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt, EMPA, Überlandstraße 129, CH-8600 Dübendorf, E-Mail: erwin.hack@empa.ch