

Verformung und Schädigung von Werkstoffen der Aufbau- und Verbindungstechnik

Steffen Wiese

Verformung und Schädigung von Werkstoffen der Aufbau- und Verbindungstechnik

Das Verhalten im Mikrobereich



Springer

Dr.-Ing. Steffen Wiese
Fraunhofer-Center für
Silizium-Photovoltaik CSP
Walter-Hülse-Str. 1
06120 Halle
Deutschland
stw.post@googlemail.com

ISBN 978-3-642-05462-4 e-ISBN 978-3-642-05463-1
DOI 10.1007/978-3-642-05463-1
Springer Heidelberg Dordrecht London New York

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

© Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2010

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt. Die dadurch begründeten Rechte, insbesondere die der Übersetzung, des Nachdrucks, des Vortrags, der Entnahme von Abbildungen und Tabellen, der Funksendung, der Mikroverfilmung oder der Vervielfältigung auf anderen Wegen und der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen, bleiben, auch bei nur auszugsweiser Verwertung, vorbehalten. Eine Vervielfältigung dieses Werkes oder von Teilen dieses Werkes ist auch im Einzelfall nur in den Grenzen der gesetzlichen Bestimmungen des Urheberrechtsgesetzes der Bundesrepublik Deutschland vom 9. September 1965 in der jeweils geltenden Fassung zulässig. Sie ist grundsätzlich vergütungspflichtig. Zuwiderhandlungen unterliegen den Strafbestimmungen des Urheberrechtsgesetzes.

Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürften.

Einbandentwurf: WMXDesign GmbH, Heidelberg

Gedruckt auf säurefreiem Papier

Springer ist Teil der Fachverlagsgruppe Springer Science+Business Media (www.springer.com)

Vorwort

Dieses Buch ist aus den Bedürfnissen universitärer Forschung und Lehre entstanden. Der Autor beschäftigt sich seit ca. 15 Jahren mit den Fragen des werkstoff- und bruchmechanischen Verhaltens von Weichloten in kleinstvolumigen Kontakten der Mikroverbindungstechnik in der Elektronik. In dieser Zeit erreichte ihn eine große Anzahl von Anfragen - vor allem von Doktoranden, aber auch von Ingenieuren aus der Industrie - aus welchen die grundsätzlichen Verständnisprobleme bei der Behandlung von Schadensfällen bzw. der Beurteilung der Zuverlässigkeit (mikro-)elektronischer Aufbauten offensichtlich wurden. Ausgehend von diesem konkreten Beratungsbedarf entstand die Idee, wesentliche Grundlagen dieses interdisziplinären Gebietes in einem Buch zusammenzufassen.

Im Mittelpunkt des Buches stehen Zuverlässigkeits- und Lebensdauerfragen in Zusammenhang mit mikroskopisch kleinen Bauteilstrukturen, wie sie für die Mikroelektronik und Mikrosystemtechnik typisch sind. Diesem zentralen Thema nähert sich das Buch über eine systematische und detaillierte Darstellung des mikrostrukturellen Aufbaus von Werkstoffen, der Werkstoffverformung sowie des Verlaufes von Materialschädigungen, die letztlich den Ausfall von Bauteilstrukturen herbeiführen. Hierbei werden besonders die Beziehungen zwischen diesen drei Säulen der thermomechanischen Zuverlässigkeit aufgezeigt, um so zu einer verständlichen und übersichtlichen Darstellung von Ursache-Wirkung-Beziehungen zu gelangen, welche Voraussetzung für ein rationales Verständnis der Auswirkung der Miniaturisierung von Bauteilstrukturen ist. Eine konkrete Vorstellung des abstrakten Begriffes der miniaturisierten Bauteilstrukturen als auch das Verständnis für die Besonderheiten einer technologisch bedingten Zuverlässigkeitsproblematik werden dabei zunächst in einem vorangestellten Kapitel durch eine Beschreibung des Gebietes der Aufbau- und Verbindungstechnik der Mikroelektronik vermittelt. Abschließend widmet sich das Buch in mehreren Kapiteln konkreten auf die Werkstoffforschung im Mikrobereich bezogenen Themen, in denen spezielle experimentelle Untersuchungsmethoden, konkrete Versuchsergebnisse als auch sich daraus ergebende Schlussfolgerungen bezüglich der Werkstoffmodellierung und der entwicklungsbegleitenden Werkstoffuntersuchung dargestellt werden. Dabei wird besonders der Werkstoffuntersuchung im Mikrobereich viel Platz eingeräumt und an vielen konkreten Beispielen werden ihre methodischen Besonderheiten gegenüber der klassischen Werkstoffprüfung erläutert.

Das Buch hat das Ziel, einer breiten Gruppe von Nichtexperten (Studenten, Doktoranden, Entwicklungsingenieure, Quereinsteiger) den Einstieg in die Problematik der Schadensfälle und Zuverlässigkeit elektronischer Aufbauten zu ermöglichen und so viel Hintergrundwissen an Grundlagen- und Spezialkenntnissen zu vermitteln, dass der Leser in die Lage versetzt wird, Projekte zu planen und zu leiten, Fachartikel zu verstehen und ihre Ergebnisse in Bezug auf die eigenen Zuverlässigkeitsprobleme richtig einzuordnen.

Ein großer Teil des Buches widmet sich der Thematik der Prüfmaschinen (klassisch und im Mikrobereich). Zu diesem Thema existiert kaum (klassische Werk-

stoffprüfung) bzw. keine Literatur (Werkstoffprüfung im Mikrobereich). Der Nutzen für den Leser besteht darin, dass er einen tiefen Einblick in die spezielle Problematik der Werkstoffprüfung im Mikrobereich bekommt. Besonders für Entwicklungsingenieure in der Industrie, die über die Anschaffung von Prüftechnik entscheiden müssen, als auch für Doktoranden/Wissenschaftler, die spezielle Messungen vornehmen wollen, sind diese kritischen und gegenüber Firmenprospekten neutralen Darstellungen hilfreich.

Die Art der Darstellung ist so gehalten, dass eine unnötige Mathematisierung bei der Erläuterung der verschiedenen Sachverhalte vermieden wurde. Mathematische Terme wurden nur an solchen Stellen eingesetzt, an denen die Komplexität eines Sachverhaltes eine entsprechende Abstraktion verlangt. Dies soll die Zugänglichkeit auch für Leser aus mathematikfremden Studienrichtungen (z.B. Chemie, Materialkunde, Wirtschaftsingenieurwesen) erleichtern. Gleichzeitig wurden für die Erläuterung allgemeiner Sachverhalte stets solche Beispiele ausgewählt, die im konkreten Anwendungsfeld elektronischer Aufbauten in der Mikroelektronik zu finden sind, um so die zu vermittelnden Sachverhalte für Praktiker in der Industrie fassbar zu machen.

Das Buch, welches aus einer Habilitationsschrift hervorgegangen ist, entstand am Institut für Aufbau- und Verbindungstechnik der Elektronik an der Technischen Universität Dresden, Fakultät Elektrotechnik und Informationstechnik. Besonders möchte ich mich bei Prof. Dr.-Ing. habil. K.-J. Wolter für seine Bereitschaft bedanken, mich an seinem Institut aufzunehmen und mir dort Bedingungen einzuräumen, welche ich für meine wissenschaftliche Forschung benötigte.

Herrn Prof. Dr. rer. nat. habil. B. Michel vom Fraunhofer Institut für Zuverlässigkeit und Mikrointegration, Berlin und Herrn Prof. Dr. rer. nat. habil. W. H. Müller von der Technischen Universität Berlin danke ich für ihre gutachterliche Tätigkeit sowie für die vielen kritischen, aber immer fruchtbaren wissenschaftlichen Diskussionen, die wir in den vergangenen Jahren geführt haben.

Ohne die Unterstützung durch die Mitarbeiter des Institutes wären die sehr umfangreichen experimentellen Untersuchungen nicht möglich gewesen. Mein Dank gilt in diesem Zusammenhang vor allem den Doktoranden meiner Arbeitsgruppe Herrn Dr.-Ing. M. Röllig, Herrn Dipl.-Ing. M. Müller, Herrn Dipl.-Ing. K. Meier, Herrn Dipl.-Ing. R. Metasch, Herrn Dipl.-Ing. S. Schindler.

Im Zusammenhang mit der Erstellung des Manuskriptes gilt mein besonderer Dank Frau C. Hasenauer für die sorgfältige Anfertigung der Zeichnungen.

Die Untersuchungen wurden durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft (Förderkennzeichen WI 2030/1-1 und WI 2030/1-2) gefördert. Der DFG sei ausdrücklich für die von ihr gewährte finanzielle Unterstützung gedankt, ohne die die Anfertigung dieser Arbeit nicht möglich gewesen wäre.

Inhaltsverzeichnis

1	Problematik	1
1.1	Ausfälle in elektronischen Aufbauten	1
1.2	Rolle der Werkstoffuntersuchung im Entwicklungszyklus	4
1.3	Werkstoffverhalten und Miniaturisierung	8
1.4	Verformungsverhalten von Metallen	10
1.4.1	Bedeutung	10
1.4.2	Verformungsverhalten	12
1.5	Untersuchungsmethoden	15
1.6	Ziel der Arbeit	17
2	Untersuchungsgegenstand	19
2.1	Zusammenhang zwischen Gegenstand und Methodik der Untersuchung	19
2.2	Wesen und Entwicklung des Untersuchungsgegenstandes	22
2.2.1	Begriff der Aufbau- und Verbindungstechnik der Elektronik	22
2.2.2	Inhalt der Aufbau- und Verbindungstechnik der Elektronik	23
2.2.3	Entwicklung der Aufbau- und Verbindungstechnik der Elektronik ..	24
2.3	Architektur elektronischer Aufbauten	27
2.3.1	Grundkonzept und Aufbauhierarchie.....	27
2.3.2	Erste Verbindungsebene	29
2.3.3	Zweite Verbindungsebene	41
2.3.4	Architekturentwicklung	55
2.3.5	Strukturabmessungen in elektronischen Aufbauten	59
2.4	Thermisch-mechanische Problematik elektronischer Aufbauten	61
2.4.1	Ursachenherkunft	61
2.4.2	Grundlegende physikalische Ursachen	63
2.4.3	Aspekte der Architektur- und Entwicklungskonzeption	65
2.4.4	Werkstoffphysikalische Seiteneffekte	68
2.4.5	Belastungsszenarien	68
3	Struktur metallischer Werkstoffe	71
3.1	Zusammenhang zwischen Verformung und strukturellem Aufbau	71
3.2	Struktureller Aufbau	73
3.2.1	Strukturebenen	73
3.2.2	Atomarer Aufbau	78
3.2.3	Werkstoffgefüge	83
3.3	Legierungen	94
3.3.1	Formen von Legierungen	94
3.3.2	Eutektische Systeme	95
3.3.3	Systeme mit intermediären Phasen	99
3.3.4	Andere Systeme	100
3.3.5	Drei- und Vielstoffsysteme	103

3.4 Gefügeausbildung bei Erstarrung von Legierungen	104
3.4.1 Entstehung des Erstarrungsgefüges	104
3.4.2 Erstarrungsgefüge von Sn-Basis-Loten	113
3.5 Gefügeveränderung	134
3.5.1 Gefügeveränderung durch thermische Belastung	134
3.5.2 Gefügeveränderung durch thermisch-mechanische Belastung	139
4 Elastische Verformung	143
4.1 Phänomenologie der elastischen Verformung	143
4.2 Physikalischer Hintergrund der elastischen Verformung	144
4.2.1 Verzerrung des Kristallgitters	144
4.2.2 Nichtlinearität der elastischen Verformungsreaktion	146
4.3 Beschreibung der elastischen Verformung	147
4.3.1 Elastizitätsmodul	147
4.3.2 Die Querkontraktionszahl	151
4.3.3 Der Schubmodul	152
4.3.4 Der Bulkmodul	152
4.3.5 Richtungsabhängigkeit der elastischen Konstanten	153
4.3.6 Temperaturabhängigkeit der elastischen Konstanten	156
5 Plastische Verformung	157
5.1 Phänomenologie der plastischen Verformung	157
5.1.1 Erscheinungsformen	157
5.1.2 Verformungsmechanismenkarten	158
5.2 Kinetik der plastischen Verformung	160
5.2.1 Versetzungsbewegung	160
5.2.2 Versetzungskinetik	164
5.2.3 Bedeutung der Kinetik der Versetzungsbewegung für die Beschrei- bung und Charakterisierung der plastischen Verformung	172
5.3 Niedertemperaturplastizität	174
5.3.1 Merkmale	174
5.4 Hochtemperaturplastizität	179
5.4.1 Merkmale	179
5.4.2 Beschreibung des zeitabhängigen Verformungsverhaltens	182
5.4.3 Grundmechanismen	185
5.5 Wechselverformung	201
5.5.1 Merkmale	201
5.5.2 Beschreibung der Wechselverformung	203
5.5.3 Mechanismencharakteristik bei Wechselverformung	207
5.5.4 Materialgedächtniseffekte	211

6	Schädigung	213
6.1	Technische Ursachen von Ausfällen	213
6.2	Materialphysik der Schädigung	215
6.2.1	Problematik der Ursacheninterferenz	215
6.2.2	Wichtige nichtmechanische Schädigungsmechanismen	216
6.2.3	Mechanismen der mechanischen Schädigung von Werkstoffen	219
6.3	Modellierung der Materialschädigung	235
6.3.1	Problematik der Schädigungsmodellierung	235
6.3.2	Bruchmechanische Konzepte	236
6.3.3	Empirische Ermüdungsmodelle	261
6.3.4	Kontinuums-Schadensmechanik	269
7	Experimentelle Untersuchungsmethoden	273
7.1	Problematik der experimentellen Untersuchung	273
7.2	Entwicklung, Ziele und Verfahren der klassischen Werkstoffprüfung ..	275
7.2.1	Historische Entwicklung	275
7.2.2	Verfahren und Ziele	276
7.2.3	Entwicklung miniaturisierter Versuche	280
7.3	Werkstoffprüfung für stark miniaturisierte Proben	282
7.3.1	Grundproblematik	282
7.3.2	Besonderheiten der Prüfmaschinen für miniaturisierte Proben	283
7.4	Probekörper für miniaturisierte Versuche	306
7.4.1	Ziele der Probengestaltung	306
7.4.2	Idealisierte Bulkproben	309
7.4.3	Idealisierte Mikroproben	312
7.4.4	Reale Mikroproben	318
7.5	Realisierungen von Prüfmaschinen für miniaturisierte Proben	323
7.5.1	Prüfmaschinenkonzepte	323
7.5.2	Kleinlastprüfmaschinen	325
7.5.3	Prüfmaschinen für Scherversuche an kleinvolumigen Kontakten ...	333
7.5.4	Ring-Pin-Prüfmaschinen für Lot in Durchkontaktierungen	346
8	Experimentelle Ergebnisse	349
8.1	Bewertung des Datenmaterials	349
8.2	Einstoffsystem - Zinn	350
8.2.1	Auswahl des Datenmaterials	350
8.2.2	Elastische Eigenschaften	351
8.2.3	Instantanplastische Verformung	353
8.2.4	Kriechverhalten	355
8.3	Zweistoffsystem mit Mischkristallbildung - Zinn Blei	356
8.3.1	Auswahl des Datenmaterials	356
8.3.2	Elastische Eigenschaften	359
8.3.3	Instantanplastische Verformung	361
8.3.4	Kriechverhalten	369

8.3.5 Rissausbreitungsverhalten	379
8.4 Zweistoffsystem mit Teilchenhärtung - Zinn Silber	386
8.4.1 Auswahl des Datenmaterials	386
8.4.2 Elastische Eigenschaften	388
8.4.3 Instantanplastische Verformung	390
8.4.4 Kriechverhalten	394
8.5 Dreistoffsystem mit Teilchenhärtung - Zinn Silber Kupfer	418
8.5.1 Auswahl des Datenmaterials	418
8.5.2 Elastische Eigenschaften	419
8.5.3 Instantanplastische Verformung	422
8.5.4 Kriechverhalten	425
8.5.5 Rissausbreitungsverhalten an Flip-Chip-Kontakten	445
9 Schlussfolgerungen und zukünftige Herausforderungen	447
9.1 Mechanik und Werkstoffphysik für die Elektronik	447
9.2 Der Größeneffekt in Werkstoffstrukturen elektronischer Aufbauten	450
9.2.1 Ausgangspunkt	450
9.2.2 Auswertung des Datenmaterials an Sn-basierten Loten	452
9.2.3 Bezug zur Werkstoffstruktur der Lotlegierungen	458
9.2.4 Schlussfolgerungen bezüglich der Mikrofügetechnologien	460
9.3 Modelle - Schnittstelle zwischen Experiment und Simulation	461
9.4 Gestaltung einer entwicklungsbegleitenden Werkstoffdatenermittlung	467
9.4.1 Erfordernisse	467
9.4.2 Retrospektive der eigenen Untersuchungen	469
9.4.3 Ableitungen für die Zukunft einer entwicklungsbegleitenden Werkstoffdatenermittlung	471
Literaturverzeichnis	475
Weiterführende Literatur zu den Kapiteln	509
Sachverzeichnis	511