

Schallfeldcharakterisierung an neu entwickeltem mehrkanaligem 20 MHz Annular-Array für die Ultraschallmikroskopie

André Juhrig¹, Ulrike Schmidt¹, Mario Wolf¹, Elfgard Kühnicke¹

¹ TU Dresden - Institut für Festkörperelektronik, 1069 Dresden, E-Mail: Andre.Juhrig1@tu-dresden.de

Einleitung

Die Ultraschallmikroskopie ist ein bildgebendes, zerstörungsfreies Prüfverfahren, das hauptsächlich in der Halbleiterindustrie zur Prüfung von Lötstellen, Laminierungen und Vergüssen eingesetzt wird. Aufgrund der stetigen Miniaturisierung der Strukturen bzw. der Bauelemente ist eine immer höhere Auflösung in der Bildgebung erforderlich. In der Ultraschallmikroskopie ist dies durch den Einsatz eines punktförmig fokussierenden Prüfkopfes mit hoher Arbeitsfrequenz und damit kleiner Fokusaussdehnung möglich.

Herkömmliche Ultraschallmikroskope für den Einsatz in der zerstörungsfreien Prüfung von elektronischen Bauteilen arbeiten einkanalig und schallen mit einem stark fokussierenden Schallkopf mit akustischer Linse normal in das Bauteil ein. Handelsüblich für Package-Prüfung sind Schallköpfe mit Mittenfrequenzen zwischen 30 MHz und 230 MHz deren Auflösungsvermögen für höhere Frequenzen zunimmt [1, 2]. Eine Vielzahl von Anwendungen in der Prüfung von Package-Systemen und beschichteten Strukturen zeigt die Leistungsfähigkeit der Ultraschallmikroskopie [3, 4, 5, 6], wenn entsprechend der Prüfsituation der Schallkopf so ausgerichtet wird, dass der Fokus auf der gewünschten Inspektionsebene platziert ist [3]. Diese Schallkopfausrichtung ist insbesondere bei der Prüfung komplexer Strukturen auf Wafern der Halbleiterindustrie oder 3D-Package-Systemen, die mit einer guten Tiefenaufklärung gescannt werden müssen, wichtig. Um eine maximale laterale Auflösung zu erzielen, ist deshalb für jede Messtiefe ein neuer Scanvorgang erforderlich. Durch die Verwendung eines Schallkopfes mit einem Fokusbereich, der sich über die gesamte Schichtdicke ausdehnt, kann das Bauteil in einem einzigen Scanvorgang geprüft werden [7]. Die dadurch erreichbare Auflösung bleibt jedoch deutlich unter der mittels Schallkopf-Positionierung erzielten. Durch Verwendung eines Arrays ließe sich die Fokusposition bei konstantem Abstand des Schallkopfes zum Untersuchungsobjekt in verschiedene Tiefen variieren.

Die Vorteile der Verwendung von (multifokalen) Array-Schallköpfen in einem Mikroskop bestehen in einer erhöhten Genauigkeit bei wesentlich geringerem Zeitaufwand im Vergleich zu einem einkanaligen Mikroskop. Hierbei ist es vorteilhaft die Einzelelemente des mehrkanaligen Prüfkopfes in Form eines Annular-Arrays zu strukturieren, da dies im Vergleich Phased-Array zum einen eine 2D-Fokussierung ermöglicht und zum anderen werden für die gleiche Qualität des Schallfeldes deutlich weniger Elemente benötigt. Zum gegenwärtigen Stand der Technik sind Annular-Array Prüfköpfe auf Basis von Komposit-Wandlerelementen bis zu einer Arbeitsfrequenz von 10 MHz kommerziell verfügbar. Auf Basis anderer Wandlermaterialien, wie z.B. PVDF, werden Prüfköpfe bereits mit Arbeitsfrequenzen bis zu

40 MHz [8] in der Forschung eingesetzt. Diese sind für die Ultraschallprüfung in Festkörpern jedoch ungeeignet, wegen der deutlich geringeren abgestrahlten Schallintensität verglichen zu keramischen Wandlern. In diesem Beitrag wird der Aufbau, die Charakterisierung und die Schallfeldvermessung eines neuartigen Prüfkopfes vorgestellt, dessen Wandler aus einem Piezo-Komposit mit einer Arbeitsfrequenz von 20 MHz besteht und in Form eines Annular-Arrays mit 16 Kanälen strukturiert ist.

Prüfkopfaufbau

Der aufgebaute Prüfkopf ist noch im Stadium eines Prototyps und besteht aus einem strukturierten Wandlerelement, an dem die Wandlung zwischen Schall und elektrischem Signal stattfindet, einer Umverdrahtung, die die Verbindung zwischen dem Wandlerelement und den Anschlusskabeln herstellt, sowie dem Gehäuse und dem darin befindlichen Dämpfungskörper. Der beschriebene Aufbau ist in Abbildung 1 dargestellt.

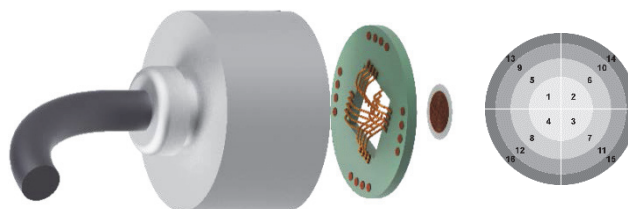


Abbildung 1: Schematischer Aufbau des Prüfkopfes bestehend aus Wandlerelement, Umverdrahtung, Gehäuse mit Dämpfungskörper und Anschlusskabel.

Das Wandlerelement ist aus einem ebenen Piezo-Komposit gefertigt, das vom Fraunhofer IKTS [9] entwickelt und hergestellt wurde. Die Elektroden des 16-kanaligen Annular-Arrays sind auf der Außenseite (schallabgebende Seite) als vollständige Masseelektrode und auf der Innenseite als strukturiertes Annular-Array ausgeführt. Dies besteht aus vier Ringen, die jeweils in Viertelsegmente unterteilt sind (siehe Abb. 1 rechts).

Als Umverdrahtung wird eine Leiterplatte genutzt, auf der Padflächen zum Anlöten der Anschlusskabel und zum Kontaktieren der Bonddrähte vorhanden sind. Für die Kontaktierung der Elektroden des Wandlers zu den Padflächen der Leiterplatte werden die Verfahren Micro-Schweißen mit isolierten Bonddrähten und Ultraschallbonden eingesetzt. Für diesen Anwendungsfall ist das Microschweißen noch bei der Parameterfindung, da ein zu hoher Energieeintrag beim Schweißvorgang zur Zerstörung der dünnen Elektrode und des Kompositmaterials führt. Beim Wedge-Wedge Ultraschall-Bondverfahren mit nicht-isolierten Bonddrähten tritt der Fehler auf, dass keine haltbare Reib-Schweiß-Verbindung auf den Goldelektroden des Wandlers zustande kommt und somit der Bonddraht nur auf der Elektrode aufliegt. Als Ursache konnte die mangelhafte mechanische Festigkeit des dünnen Wandlers ermittelt

werden. Dieses Kontaktierungsproblem kann aktuell nur durch eine zusätzliche Befestigung mittels Leitkleber gelöst werden. Alternative Bondverfahren wie zum Beispiel das Thermosonic Bonden sind aufgrund der Temperatureinwirkung während des Prozesses nicht anwendbar, da bei Temperaturerhöhung das Matrixmaterial des Komposits weiter an Steifigkeit verliert und zunehmend viskoses Verhalten aufweist.

Nachdem die Einzelemente des Wandlers mit der Leiterplatte verbunden sind, werden die Anschlusskabel angelötet. Abschließend wird das Edelstahlgehäuse hinzugefügt und der Innenraum mit Epoxidharz als Dämpfungskörper vergossen.

Messverfahren und Methoden

Zur Charakterisierung des Prüfkopfes werden Schallfeldmessungen an einem Kugelreflektor in Wasser durchgeführt. Dabei wird das Schallfeld mit einer feinen örtlichen Auflösung in vielen Tiefenebenen abgescannt. Der Kugelreflektor dient hierbei näherungsweise als Punktrefektor. Dabei wird mit verschiedenen Puls-Regimen gearbeitet: es wird mit allen Elementen einzeln gesendet und empfangen, mit den zusammenschlossenen Vierteln als Ring gesendet und auf allen Elementen empfangen sowie durch zeitverzögerte Ansteuerung der Ring elektronisch fokussiert.

Bei diesen Messreihen werden bei jeder Reflektorposition für jedes Einzelement die hochfrequenten Signale registriert und gespeichert, um die Charakteristik jedes Einzelements hinsichtlich Signalstärke und Frequenzspektrums zu bestimmen. Außerdem werden die Signale der funktionstüchtigen Elemente später zur synthetischen Fokussierung in unterschiedliche Tiefen verwendet, um das erreichte Auflösungspotential festzustellen.

Ergebnisse

Die folgenden Ergebnisse wurden bei der Charakterisierung eines Prototyps erzielt, bei dem das Microschweißen zur Kontaktierung eingesetzt wurde.

Aus der separaten Auswertung der vier Ringe werden die jeweiligen Schalldruckverläufe auf der Symmetrieachse des Arrays (Abb. 2) ermittelt und dadurch die natürlichen Fokuspunkte bestimmt.

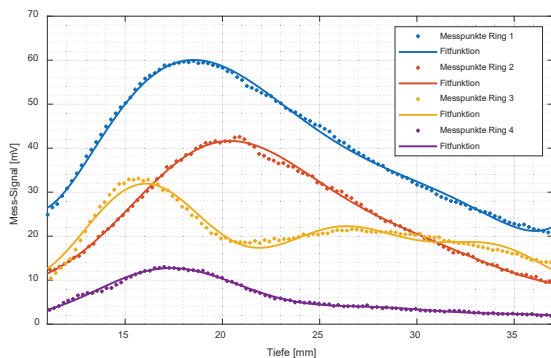


Abbildung 2: Schalldruckverläufe auf der Symmetrieachse des Arrays für die vier Ringe.

Aufgrund der Symmetrie eines Annular-Arrays, kann eine einfache Formel zur Bestimmung der Nahfeldlänge N (Lage des natürlichen Fokus) angegeben werden:

$$N = \frac{r_a^2 - r_i^2}{c} f \quad [\text{m}] \quad (1)$$

wobei r_a – Außenradius und r_i – der Innenradius des Elementes sind, c – ist die Schallgeschwindigkeit und f – Frequenz.

Da alle Ringe die gleiche Fläche besitzen, beträgt die berechnete Nahfeldlänge jedes Voll-Rings und damit seine natürliche Fokussentfernung etwa 20,7 mm. Aus den in Abb. 2 dargestellten Verläufen wird deutlich, dass (mit Ausnahme von Ring zwei) bei allen Ringen die Lage des Maximums den Wert für die Nahfeldlänge unterschreitet. Eine verringerte Nahfeldlänge bedeutet, dass entweder die reale Mittenfrequenz eines Rings geringer ist oder dass die Schallgeschwindigkeit des Ausbreitungsmediums größer ist als angenommen oder dass die effektiv schwingende Fläche eines Rings betragsmäßig kleiner ist als die nominale Gesamtfläche des Rings. Die Schallgeschwindigkeit ist bekannt, da bei allen Messungen Wasser der gleichen Temperatur verwendet wurde. Der zweite Einflussfaktor ist die Mittenfrequenz, die beim Komposit (Dickenschwinger) im Wesentlichen durch die Dicke des Materials bestimmt wird, welche bedingt durch die mechanische Bearbeitung einer Schwankung unterliegt. Die Mittenfrequenz schwankt jedoch nur um ca. 2 %, wie in der Charakterisierung der Einzelemente deutlich wird (Abb. 3).

Auf Grund einer Mittenfrequenzschwankung zwischen den Elementen kann auch die Nahfeldlänge nur um maximal 2 % abweichen. Es bleibt die Verringerung der effektiv

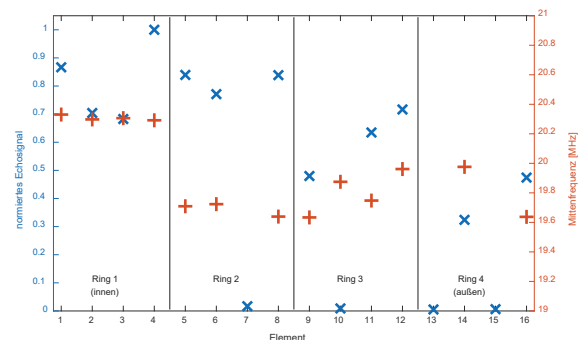


Abbildung 3: Charakterisierung der Einzelemente des 16-kanaligen Arrays in deren jeweiligen Fokuspunkt am Kugelreflektor hinsichtlich Signalamplitude (blau x) und der Mittenfrequenz (orange +).

schwingenden Fläche der Ringe als Erklärung. Wie Abb. 3 zeigt, entsteht sie durch funktionsunfähige Einzelemente sowie durch eine starke Schwankung der Signalstärken auch innerhalb eines Rings. Diese Schwankung hat einen systematischen Anteil, dessen Ursache der Innenwiderstand der Einzelemente ist, der vom Innenring (Ring 1) hin zum Außenring (Ring 4) bedingt durch die Geometrie der Elemente zunimmt (schmalere werdende Elemente), sowie einen zufälligen Anteil, der durch den Kontaktwiderstand zwischen Bonddraht und Elektrode entsteht. Ein Erklärungsansatz ist, dass beim Schweißvorgang eine zu geringe Energiedosis angewendet wurde, um das Kompositmaterial und die Elektrode nicht zu zerstören, so dass nur die Isolierung aufschmilzt und der Bonddraht mit der

Elektrode verklebt, jedoch keine elektrisch gut leitfähige Schweißverbindung hergestellt wird. Dies konnte nach dem Zusammenbau des Prüfkopfes nicht durch Messungen oder Inspektion geprüft werden. Ein weiterer negativer Einfluss des Kontakt- und Innenwiderstands ist die Wirkung als Tiefpass, wodurch zusätzlich zur abgeschwächten Signalstärke auch hochfrequente Signalanteile gedämpft werden und geringe Zeitverzögerungen (bei schwankendem Kontaktwiderstand) zwischen den einzelnen Elementen entstehen. Neben den genannten Faktoren wird das Komposit bei seiner Dickenschwingung zusätzlich durch die Elektroden und die Kontaktierungsstellen beeinflusst. Der Einfluss der Elektroden ist auf Grund der geringen angefertigten Dicke als

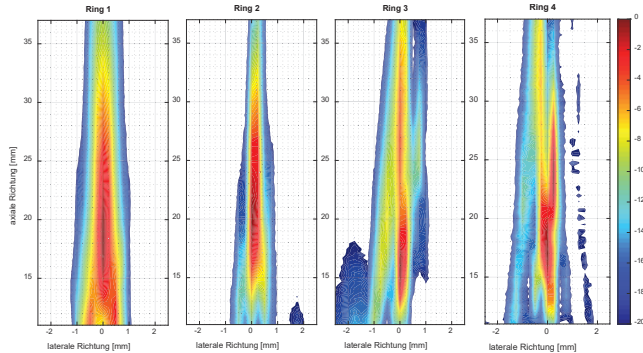


Abbildung 3: Schallfelder der vier Ringe des Annular-Arrays als Längsschnitt entlang der Symmetrieachse des Arrays.

vernachlässigbar zu betrachten. Dagegen wirkt die Kontaktstelle von Elektrode und Bonddraht als Versteifung und verringert so zusätzlich die effektiv schwingende Fläche.

Der Einfluss der nicht funktionierenden Elemente (vgl. Abb. 3) wird in den gemessenen Schallfeldern deutlich. Im ersten Ring schwingen alle vier Einzelelemente mit der gleichen Mittenfrequenz, jedoch mit schwankender Signalstärke. Abb. 4 zeigt, dass dies nur einen geringen Einfluss auf die Symmetrie des Schallfeldes besitzt. Der Unterschied zwischen Maximumlage und Nahfeldlänge liegt hier an einer geringeren effektiven Schwingerfläche, Berücksichtigt man die inaktive Fläche von $0,5 \text{ mm}^2$ durch die Strukturierung der Viertelemente ergibt eine Nahfeldlänge von $18,4 \text{ mm}$.

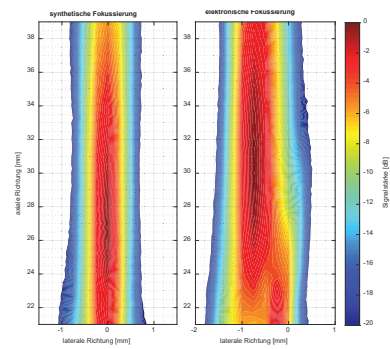
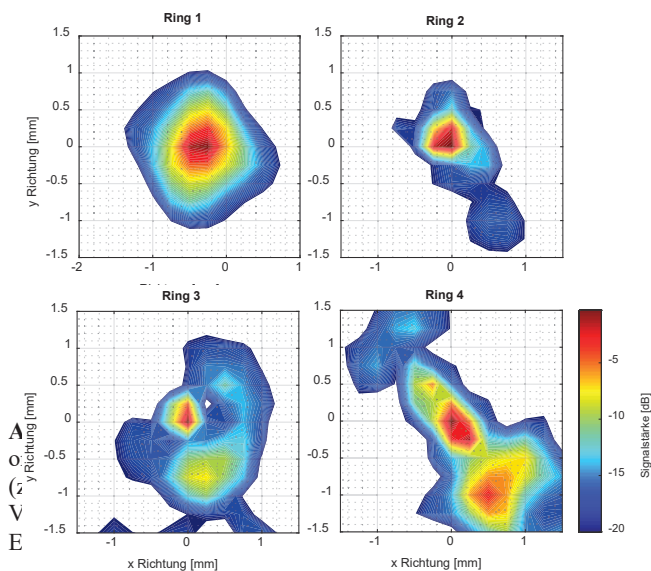


Abbildung 2: Längsschnitt der Schallfelder entlang der Symmetrieachse des Arrays bei synthetischer und elektronischer Fokussierung auf 32 mm .

Problematischer ist der Ausfall einzelner Elemente bei den anderen Ringen, was zu einem unsymmetrischen Schallfeld sowie zur Ausbildung mehrerer globaler Maxima außerhalb der Symmetrieachse führt (siehe Abb. 4 Ring 2 bis Ring 4). Diese Auswirkungen werden in den Querschnitten im Maximum auf der Symmetrieachse des jeweiligen Schallfeldes orthogonal zur Schallachse besonders sichtbar (Abb. 5). In Ring 1 funktionieren alle vier Einzelelemente, die jedoch Schwankungen in der Signalstärke unterliegen. Dennoch wird ein in grober Näherung symmetrisches Schallfeld mit einer Ausdehnung der 3 dB Zone von ca. $500 \mu\text{m}$ erreicht. Dagegen sind in Ring 4 zwei diagonal gegenüberliegende Elemente funktionsunfähig. Diese Struktur ist ebenso im Querschnitt des Schallfeldes sichtbar.

Obwohl drei von vier Ringen wegen ausgefallener Segmente nicht funktionsfähig sind, wurde trotzdem die Fokussierung des Arrays mittels elektronischer und synthetischer Fokussierung getestet. Hierfür wurde ein Satz Verzögerungszeiten für jedes Element zur Fokussierung auf 32 mm Entfernung für das vorgegebene Designe des Arrays berechnet und auf die aufgenommenen Signale angewendet. Wie erwartet, liegen die durch Fokussierung erreichten Maxima nicht an den angestrebten Fokuspunkten. Das resultierende Schallfeld wird im Wesentlichen durch Ring 1 (innen) bestimmt und die Ausdehnung der empfindlichen Zone entspricht der Ausdehnung der empfindlichen Zone des Mittenelements. Das heißt, durch die Fokussierung wird bei diesem Prototyp keine Verbesserung der Auflösung erzielt.

Zusammenfassung

Die Technologie für den Aufbau eines neuen Annular-Arrays mit 16 separaten Kanälen und einer Mittenfrequenz von 20 MHz wurde entwickelt sowie ein Prototyp aufgebaut und dessen Schallfeld charakterisiert. Beim Aufbau konnte die Kontaktierung als die bestimmende technologische Herausforderung identifiziert werden, weshalb sie weiterhin Gegenstand der Forschung ist.

Die Schallfeldcharakterisierung der vier Ringe ergab, dass die vier großen inneren Segmente, die ein rundes Mittenelement ergeben, gut funktionieren und ein symmetrisches Schallfeld mit einer Ausdehnung der 3 dB Zone im natürlichen Fokus von $500 \mu\text{m}$ ergeben. Die schmalen, segmentierten Außenringe funktionieren durch Kontaktierungsprobleme nicht vollständig, weshalb mit diesem Prototyp bisher noch keine Fokussierung möglich ist.

Danksagung

Dieses Projekt Nr. KU1075/20-1 wird gefördert durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft.

Literatur

- [1] Wolter, K.-J.; Herzog, T. et al.: Zerstörungsfreie Prüfung elektronischer Baugruppen mittels bildgebender Verfahren. 2012
- [2] Tamulevičius, T.; Šimatonis, L. et al.: Micromachining and validation of the scanning acoustic microscope spatial resolution and sensitivity calibration block for 20-230 MHz frequency range. *Microscopy* 65 (2016), 429-437
- [3] Brand, S.; Naumann, F. et al.: Non-Destructive Assessment of Reliability and Quality Related Properties of Power Electronic Devices for the In-Line Application of Scanning Acoustic Microscopy". *Proceedings of CIPS 2016 Nürnberg* (2016), 1-6
- [4] Brand, S.; Czurratis, P. et al.: Extending acoustic microscopy for comprehensive failure analysis applications. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics* 22 (2011), 1580-1593
- [5] Guillaumin, V.; Landolt, D.: Effect of dispersion agent on the degradation of a water borne paint on steel studied by scanning acoustic microscopy and impedance. *Corrosion Science* 44 (2002), 179-189
- [6] Alig, I.; Tadjbach, S. et al.: Characterization of coating systems by scanning acoustic microscopy: Debonding, blistering and surface topology. *Progress in Organic Coatings* 64 (2009), 112-119
- [7] Fassbender, S. U.; Kraemer, K.: *Acoustic microscopy: a powerful tool to inspect microstructures of electronic devices. Testing, Reliability, and Application of Micro- and Nano-Material Systems* (2003)
- [8] Kettling, J.A.; Aristizábal, O.; Turnbull, D.H.; Lizzi, F.L.: Design and Fabrication of a 40-MHz Annular Array Transducer. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control*, Vol. 52, No. 4, (2005), 672-681
- [9] Gebhardt, S.; Günther, P.; Fröhlich, S.; Neubert, H.: Towards Fabrication of High Frequency Ultrasonic Transducers Using Soft Mold Process. *IEEE IUS Proceedings* (2016)