Darstellung thermisch transienter Deformationen in der Schichtstruktur von Halbleiterbauteilen

Silvester Sadjina[1], Daniela Florian[1], Bernhard G. Zagar[1]
[1] *Institut für Elektrische Messtechnik, Johannes Kepler Universität, 4040 Linz, Österreich, Email: bernhard.zagar@jku.at*

Einleitung

Dieser Beitrag beschäftigt sich mit der bildgebenden Darstellung thermisch transienter Vorgänge innerhalb der Schichtstruktur von Halbleiterbauelementen zufolge von leistungsstarken Anregungen, wie sie beispielsweise in Leistungshalbleiterbauelementen auftreten, wenn diese Ströme auf eine kurzgeschlossene Last schalten. Zur Simulation der thermisch transienten Anregung durch kurzgeschlossene Last werden sehr kurze (etwa 10 ms lange) Stomstöße, die Leistunsspitzen im Bereich von kW erzeugen und die im Inneren des Halbleiterbauteils zu thermomechanischem Stress führen, angelegt [1]. Über ein Ultraschallmikroskop, welches den interessierenden räumlichen Bereich scannt soll die dadurch ausgelöste thermisch transiente mechanische Welle im Halbleiterbauteil messtechnisch erfasst und durch geeignete Wahl von digitalen Signalverarbeitungsalgorithmen grafisch dargestellt werden.

Die Ultraschallmikroskopie ist ein zerstörungsfreies, bildgebendes Verfahren welches unter anderem eingesetzt wird, um dünne Schichten bzw. Strukturen im Inneren von Prüfobjekten zu untersuchen und darzustellen [2]. Je nach geforderter örtlicher Auflösung und abhängig von der notwendigen Eindringtiefe kommen dabei Ultraschallwandler mit Mittenfrequenzen im Bereich von 10 MHz bis zu 2 GHz bei relativen Bandbreiten von 30% bis 70% zum Einsatz. Je höher die verwendete Mittenfrequenz, desto besser ist sowohl die laterale Auflösung als auch die Auflösung in Tiefenrichtung. Mit steigender Mittenfrequenz erfahren die sich ausbreitenden Ultraschallwellen jedoch eine erheblich steigende Dämpfung weshalb die für die Charakterisierung nutzbare Eindringtiefe dramatisch sinkt [3]. So ergeben sich bei einer Mittenfrequenz von 1 GHz für das Material Silizium (Schallgeschwindigkeit in Silizium $c_{Si} \approx 5000\,\mathrm{m/s}$) Örtsauflösungen im μm–Bereich. Die dabei noch erzielbare Eindringtiefe ist kleiner als 10 µm.

Die drei gebräuchlichsten Abbildungsmodalitäten in der Ultraschallmikroskopie sind der A–(Amplitude), der B–(Brightness) und der C–(Complex) Mode. Die einfachste Darstellung ist der A–Mode, dabei wird für eine festgehaltene räumliche Position die reflektierte Signalamplitude nach Demodulation und Tiefpassfilterung über die Zeit aufgezeichnet. Bei konstanter Schallgeschwindigkeit im Testbauteil ist die Zeitachse gleichbedeutend mit der örtlichen Tiefe aus der die Reflexion stammt. Durch die spaltenweise Aneinanderreihung der grauwert–codierten A–Scan Signale an verschiedenen lateralen Ultraschallwandler–Positionen erhält man ein B–Scan Bild. Bei der C–Scan Darstellung wird der Ultraschallwandler in beide lateralen Richtungen verschoben und jeweils ein A–Scan aufgenommen, sodass das Volumen eines Testobjektes abgetastet wird. Aus diesen Signalen wird der jeweilige Maximalwert für einen gewählten Tiefenbereich (engl. range gate) in einem Bild dargestellt [2]. Im folgenden Beitrag werden der A–Scan für die Bestimmung der thermisch bedingten Ausdehnung in einer gewissen Tiefe sowie eine zeitliche Sequenz von vielen C–Scans zur 2D Darstellung der propagierenden thermischen Welle verwendet.

Problemstellung

Ein, entsprechend der Strukturierung des Halbleiterbauelements örtlich verteilt eingebrachter, Leistungsimpuls regt lokal thermomechanischen Stress an, der zu lokaler mechanischer Dehnung führt. Durch eine, im Kurzschlussfall regelmäßig auftretende Überlast kann das Bauelement — über viele dieser Zyklen betrachtet — zunächst degradieren und schließlich ausfallen. Als Ausfallmechanismus kann der örtlich sehr stark variierende thermische Ausdehnungskoeffizient der Strukturmaterialien (Silizium: 5053 m/s in $< 111 >$–Richtung, 4907 m/s in $< 110 >$–Richtung und 4303 m/s in $< 100 >$–Richtung, Kupfer: 5370 m/s, Aluminium: 6400 m/s) angesehen werden.

Für die Fehleranalyse und Qualitätssicherung von Halbleiterbauelementen erscheint es daher sehr interessant, die entstehende und sich zeitlich ausbreitende thermisch angeregte mechanische Welle einer Beobachtung zugänglich zu machen. Eine Abschätzung der temperaturbedingten mechanischen Ausdehnung (Annahme: Temperaturerhöhung 500°C, Strukturgröße 20μm, thermischer Ausdehnungskoeffizient Kupfer: 16,5 ppm/K, Aluminium: 23,1 ppm/K und Silizium: 2,6 ppm/K) innerhalb des chips ergab, dass die Analyse mittels Ultraschallmikroskops machbar sein sollte.

Das Testobjekt (ein power–MOSFET) wird thermisch transient angeregt, wobei die Anregung idealerweise einem Dirac–Impuls nahe kommen soll, so dass es im Inneren zu einer adiabatischen Zustandsänderung kommt. Die Reaktion auf diese Anregung soll mit Hilfe eines dafür modifizierten Ultraschallmikroskops detektiert werden. Das Ergebnis, die thermomechanische Dehnung, ortsaufgelöst zeitlich hintereinand an vielen Stellen zeitsynchron aufgenommen wird in einer Grafik bzw. der zeitliche Verlauf in einem Video dargestellt.

Präparation des Testbauteils

Als Testbauteil wurde ein Power MOSFET IRF830 [4] verwendet. Das Testobjket wird in situ belastet und analysiert. Diese Vorgehensweise vermeidet die alternativ notwendige exakte Repositionierung im US–Mikroskop nach der thermischen Belastung und vor der Datenaufnahme. Ein Vorteil des gewählten Bauteils ist seine große und einfache Struktur.

Eine weitere Herausforderung stellt das verwendete Koppelmedium Wasser dar. Die Leitfähigkeit selbst von entionisiertem Wasser beträgt $7.1 \cdot 10^{-6}$ S/m (bei 25 °C). Da das Testbauteil im Koppelmedium elektrisch belastet wird, müssen seine Zuleitungen elektrisch isoliert werden. Dazu wurde ein Zweikomponenten–Epoxidharzkleber verwendet.

Messablauf zur Detektion von thermomechanischem Stress

Um die thermo–mechanische Ausdehnung messen zu können, wurde eine geeignete Messprozedur entwickelt. Die einzelnen Schritte werden schematisch in Abbildung 1 gezeigt.

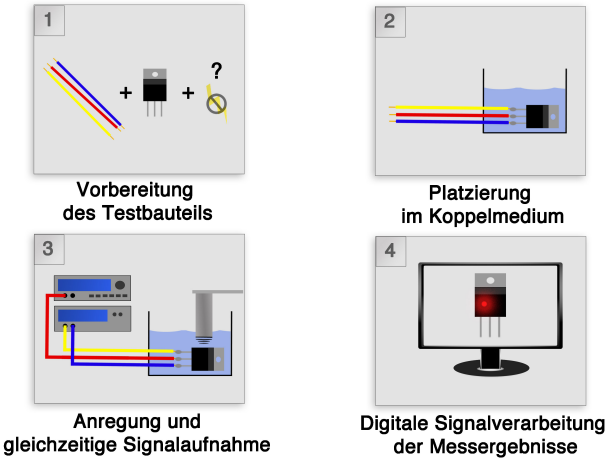

Abbildung 1: Schematischer Messablauf zur Detektion von thermo–mechanischem Stress

Zuerst wird das Testbauteil vorbereitet und im Koppelmedium (entionisiertes Wasser), platziert. Die elektrische Anregung für das Testbauteil erfolgt über eine separate Schaltung. Für die Ultraschallmessung wird das Messsystem aus Abbildung 2 verwendet. Die Schaltung der elektrischen Anregung triggert den Ultraschall pulser–receiver, sodass die elektrische Anregung gleichzeitig mit der Ultraschallmessung startet. Für jeden elektrischen Anregeimpuls werden 600 Ultraschallmessungen mit einer Wiederholrate von 20 kHz an jeder Position des US–Transducers durchgeführt. Für die insgesamt $40 \times 60 = 2400$ Scan–Positionen werden also 1,44 Millionen Ultraschallpulse aufgezeichnet und ausgewertet. Der gesamte Prozess, also die elektrische Belastung und die Aufnahme der Ultraschalldaten für alle örtlichen Positionen, wird über Matlab gesteuert. Die Auswertung der Messergebnisse über die Anwendung einer Hilbert–Transformation zur Ermittlung der sehr geringen Tiefenausdehnung erfolgt off–line ebenfalls in Matlab.

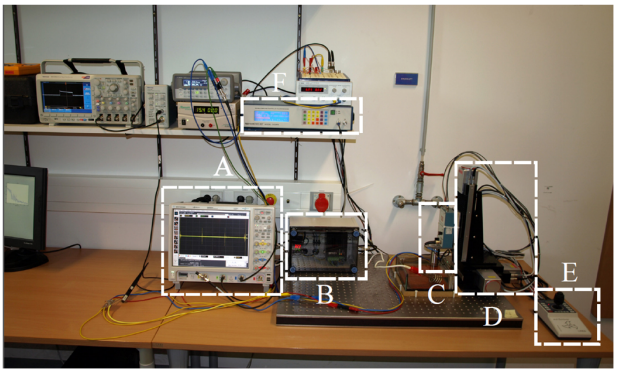

Abbildung 2: Das Ultraschallmikroskop besteht aus folgenden Komponenten: A. Transientenrecorder Typ Agilent Infiniium DSO9254A, B. Temperaturregeleinheit (Soll-Temperatur des Koppelmediums (entionisiertes Wasser) von 30 °C±0,5 °C), C. Panametrics 5627RPP Remote-Pulser/Receiver mit fokussierendem Transducer, D. 3D mechanische Verschiebeeinheit Linos X-Act (garantiert Repositionierungsfehler von unter 2 µm), E. Motor Kontroller und F. Panametrics 5900 PR Pulser/Receiver.

Messdatenauswertung und digitale Signalverarbeitung

Die Messdatenauswertung für die 1,44 Millionen Ultraschallmessungen zielt darauf ab die zu erwartenden sehr geringen Änderungen in der Position der reflektierenden Strukturen noch messtechnisch sicher zu erfassen. Die Abbildung 3 zeigt einen A–Scan für eine einzelne Position. Man erkennt zwei starke Reflexionen. Die erste Reflexion stammt von der Grenzschicht zwischen dem Koppelmedium und dem Kupferträger, auf den der eigentliche Si–Chip aufgelötet ist. Die zweite Reflexion (bei etwa 0,8 μs) stammt von der interessierenden Grenzschicht zwischen Kupferträger und dem MOSFET Chip. Da zur Vereinfachung eine konstante Schallgeschwindigkeit angenommen wird, kann der zeitliche Abstand zwischen der ersten und zweiten Reflexion in die äquivalente gesuchte Tiefenausdehnung umgerechnet werden. Die temperaturbedingten Änderungen der ermittelten Tiefe der Struktur werden der thermischen Ausdehnung zugeschrieben und dargestellt. Um ein hochaufgelöstes Erlebnis zu erhalten werden die mit einem Abtastinkrement von 0,5 ns aufgenommenen Daten zunächst um einen Faktor 8 interpoliert, einer Hilbert–Transformation zugeführt und aus dem komplexen Ergebnis die Phase, bzw. deren Änderung (relativ zum ersten Impuls) ermittelt. Danach wird der zeitlichen Abstand Δd über die Schallgeschwindigkeit in eine örtliche Änderung umgerechnet.

Abbildung 4 zeigt den C–San des Testbauteils, die dazugehörige Wärmewelle, den Stresspuls und die Tiefenausdehnung in µm im Halbleiterbauteil. Es ist deutlich die Wärmewelle (farb–codiert) zu erkennen. Die maximale Änderung der Tiefenausdehnung beträgt 10,5 µm.

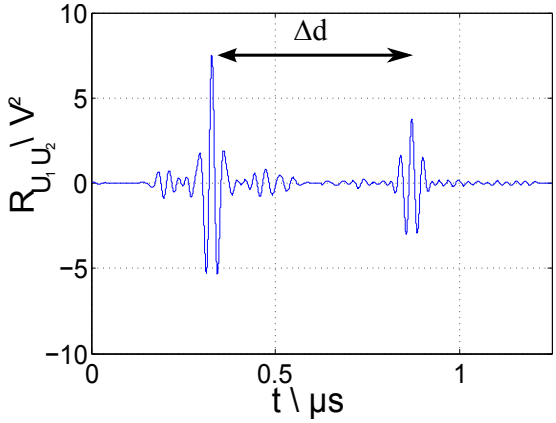

Abbildung 3: A–Scan in einem Punkt. Zeitlicher Abstand zwischen den zwei Reflexionen entspricht der Tiefenausdehnung des Chips.

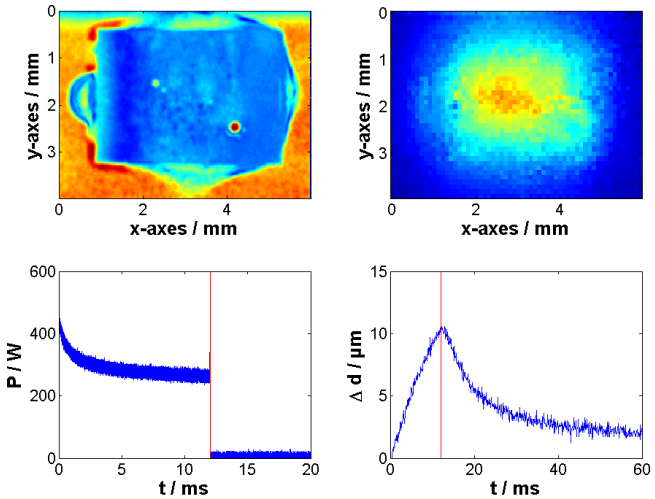

Abbildung 4: Detektion der Wärmewelle des Testbauteils (hier dargestellt für nur einen Zeitpunkt)

Zusammenfassung und Ausblick

Dieser Beitrag beschäftigte sich mit der Messung der thermo–mechanischen Ausdehnung im Inneren eines Halbleiterbauteils. Dazu wurde ein Messablauf entwickelt, der die simultane elektrische Anregung des Testbauteiles und Signalaufzeichnung des Ultraschallmikroskops ermöglicht. Erste Ergebnisse zeigen, dass durch geeignete Signalauswertung selbst die geringen zu erwartenden Werte der mechanischen Ausdehnung im Inneren des Halbleiter messbar sind. In weiteren Schritten werden komplexere integrierte Schaltungen analysiert, um die Eignung des entwickelten Systems auch für diese zu verifizieren. Die Anwendung von lock–in Funktionalitäten, also die synchrone Auswertung der Daten, die dann auch eine zeitliche Mittelung erlauben würde, soll getestet werden. Wir erwarten uns dadurch eine Steigerung der Ortsauflösung um zumindest eine Größenordnung, so dass selbst komlexe Strukturen einer Analyse zugänglich gemacht würden.

Literatur

[1] Nelhiebel, M., et al.: A reliable technology concept for active power cycling to extreme temperatures. Microelectronics Reliability 51 (2011), 1927-1932

[2] Lerch, R., Sessler, G. M. and Wolf, D.: Technische Akustik: Grundlagen und Anwendungen, Springer, 2009

[3] Poschgan, M., Maynollo, J. and Inselsbacher, M.: Inverted high frequency Scanning Acoustic Microscopy inspection of power semiconductor devices. Microelectronics Reliability 52 (2012), 2115-2119

[4] Datenblatt von Power MOSFET IRF830, URL: `http://www.vishay.com/docs/91063/91063.pdf`