

Analyse des Rissverlaufs in Dickdrahtbondverbindungen auf Leistungshalbleitern beim Active Power Cycling

Dipl.-Ing. Jens Göhre, Dr. Ute Geißler, Dipl.-Ing. (FH) Stefan Schmitz, Dr. Martin Schneider-Ramelow, Fraunhofer IZM Berlin

Vor dem Hintergrund der Beschreibung der Zuverlässigkeit von Aluminium-Dickdrahtbondkontakten auf Leistungshalbleitern bei Belastung im Betrieb durch ein Lebensdauermodell stellt sich die Frage nach der Rissausbreitung in derart typischerweise Temperaturwechselbelastungen ausgesetzten Bondstellen, die aufgrund der unterschiedlichen thermischen Ausdehnungskoeffizienten des Drahtwerkstoffes (meist Reinstaluminium) und des Halbleiters (meist Silizium) durch Materialermüdung versagen. Durch die Einwirkung der Bondparameter während des Bondprozesses und die nachfolgende Temperaturbehandlung kommt es im Bonddraht und in der Substratmetallisierung zu Gefügeveränderungen, die sich durch FIB (Focused Ion Beam)-Untersuchungen darstellen lassen. Es gelang nun, das Gefüge der Verbindungszone mit dem Pfad der Rissausbreitung in temperaturwechselbelasteten Al-Wedges in Verbindung zu bringen. Die FIB-Untersuchungen zeigen, dass das Interface zwischen Aluminiumdraht und der AlSi1Cu0,5-Metallisierung des Leistungshalbleiters auch nach 500 000 Temperaturwechseln überwiegend geschlossen ist. Die Rissausbreitung verläuft nicht entlang der verschweißten Grenzfläche der Kontaktpartner, sondern in einer darüber liegenden Ebene im Wedge. Unterhalb dieser Ebene liegt ein feinkörniges Gefüge über einer noch feinkörnigeren Chipmetallisierung vor, während das Gefüge oberhalb der Ebene gröber erscheint.

Investigations on the reliability of heavy aluminium bond wires on power semiconductors lead to the question of the influence of the wire material's micro structure in the bonding zone onto the crack propagation path in temperature cycled bond sites. Cracks grow because the differences in the CTE of the wire material (typically pure aluminium) and the Semiconductor (mostly silicon) lead to fatigue. As a result of bond force and ultrasonic energy during the bonding process and during the subsequent temperature treatment there are changes in the microstructure of the wire and the chip metallization which can be visualized by FIB (Focused Ion Beam) imaging.

Using FIB imaging it was possible to correlate the micro structure of the interconnection zone with the crack propagation path in temperature cycled aluminium bonds. The FIB preparations show that the interface between the heavy aluminium wire and the AlSi1Cu0.5 metallization of the power semiconductor is mostly closed even after 500 000 temperature cycles. The crack propagates not along the welded interface but in the wire material at a layer above the interface. This layer lies between a fine grained zone below and a zone with bigger grains above.

Einleitung

Der größte Teil der Leistungshalbleiter wird heutzutage immer noch mit Dickdrahtbondverbindungen kontaktiert [1]. Dabei handelt es sich um einen hochreinen Aluminiumdraht (4N, Durchmesser 100 bis 500 µm) der unter Aufbringung einer Bondkraft und Ultraschallenergie mit der Aluminiummetallisierung des Leistungshalbleiters verschweißt wird. Aluminiumdraht und Chip-Material (typischerweise Silizium) unterscheiden sich um eine Potenz in ihren thermischen Ausdehnungskoeffizienten. Erwärmt sich der Halbleiter auf Grund der im regulären Betrieb in

ihm dissipierten Verlustleistung entstehen deshalb im Interface Spannungen, die schon bei geringen Temperaturhuben die Fließspannung des Aluminiums überschreiten. Mit jedem Heiz/Kühl-Zyklus wird der Draht im Interfacebereich plastisch verformt, was früher oder später zu Rissbildung und -wachstum und letztlich zum Versagen der Bondstelle durch Abriss führt (Ermüdung).

Zu erwarten wäre ein Rissverlauf im Interface der Fügepartner Draht und Chip, da diese nach dem Bonden, auch mit optimierten Parametern, immer durch einen Verschweißungsgrad <100 % gekennzeichnet

ist. Durch lichtmikroskopische Analysen an Querschliffen ist schon länger bekannt, dass der Riss von beiden Enden des Wedges in die Mitte der Verbindungszone wächst, jedoch nicht direkt im Interface sondern etwa $10\ \mu\text{m}$ darüber im Drahtmaterial. Die Vermutung war und ist, dass der Riss oberhalb der ersten Kornebene beziehungsweise entlang einer Grenzschicht zwischen feinem und grobem Gefüge im Draht verläuft, was typischerweise der ersten Korngrenzebene im Wedge entspricht [2, 3, 4]. Mittels gängigen metallografischen Präparationsverfahren (Einbetten, Schleifen, Polieren, eventuell Strukturätzen) lässt sich das Gefüge des Drahtes im Bereich der Verbindungszone allerdings nicht befriedigend darstellen. Gründe dafür sind die Störschichten, resultierend aus der mechanischen Präparation der Schliifoberfläche und der sich rasch bildenden Aluminiumoxidschicht und die hohe Defektdichte im Interfacebereich des verformten Wedges. Die Frage des genauen Rissverlaufs und insbesondere der Interaktion der Risspitze mit der Mikrostruktur kann auf diese Weise nicht hinreichend geklärt werden, sondern erfordert die Darstellung des Gefüges mittels FIB.

Experimentelle Untersuchungen

Die untersuchten Proben (Abb. 1) bestehen aus Leistungshalbleitern (Mosfets mit $5\ \mu\text{m}$ AlSiCu_{0,5}-Metallisierung laut Hersteller), die mit Silberleitkleber auf beidseitig mit Kupfer beschichteten Keramiksubstraten (DCB) geklebt wurden. Diese wurden mit $400\ \mu\text{m}$ Aluminiumdickdraht (Heraeus Al-H11) auf einem Dickdrahtvollautomaten (Orthodyne 3600) mit 80 kHz Transducerfrequenz gebondet.

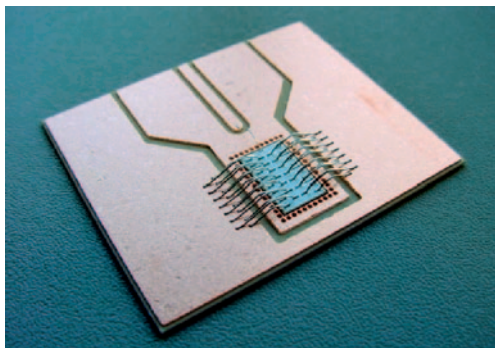


Abb. 1: Leistungshalbleiter auf DCB gebondet mit Aluminiumdickdraht

Alle Proben wurden auf einen Kühlkörper montiert, durch den Kühlwasser mit einer Temperatur von $12\ ^\circ\text{C}$ floss und mittels Stecker elektrisch kontaktiert. Das Aufheizen des Halbleiters erfolgte im nicht vollständig durchgeschalteten Zustand des Transistors (Betrieb im *verbotenen Bereich*). Die Messung der Temperatur zur Regelung des Temperaturhubes (ΔT) erfolgte über die integrierte Reverse Diode. Die Steuerung des Ablaufs, die Regelung des Temperaturhubes und die Protokollierung sämtlicher Aktionen auch über viele hunderttausende Zyklen hinweg übernahm dabei der am IZM eigens für derartige Untersuchungen entwickelte *Active Power Cycling*-Teststand (Abb. 2).

Die Entnahme der Proben erfolgte nach 500 000 Temperaturwechseln von 40 auf $140\ ^\circ\text{C}$ ($\Delta T = 100\ \text{K}$, gemessen in der Mitte des Chips). Anschließend wurden diese eingebettet, von der Seite angeschliffen und mechanisch poliert. Zur Entfernung der durch die mechanische Politur induzierten Störschicht wurden die Proben zusätzlich in einer Ionenätzenanlage PECS der Firma Gatan poliert (Prozesszeit etwa 4 min). Die FIB-Untersuchungen an den vorpräparierten

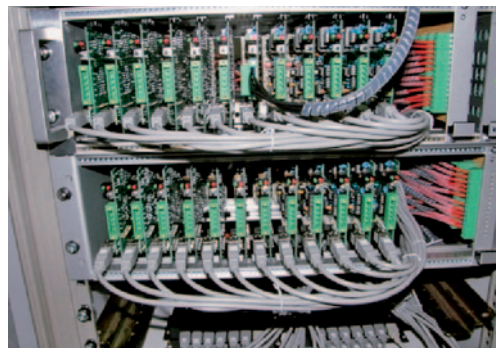
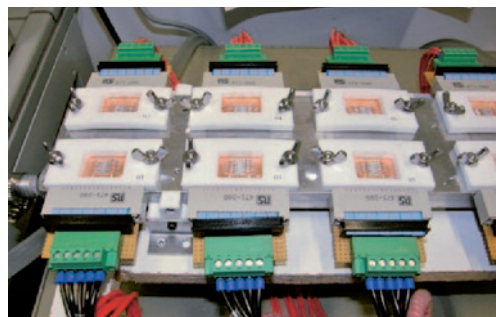


Abb. 2: Active Power Cycling Teststand: (oben) Proben auf Kühlkörper, (unten) Steuer- und Messkarten im 19"-Rack

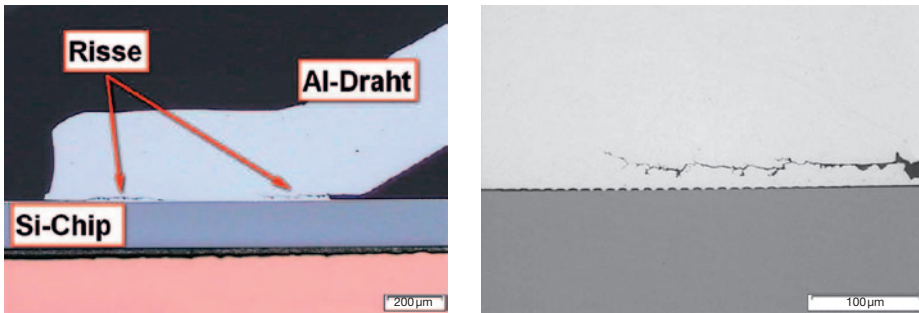


Abb. 3: Risse im Wedge nach 500 000 Temperaturwechseln von 100 K

Querschliffen zur Darstellung des Gefüges im Channeling-Verfahren [5] erfolgten an einem Zweistrahlgerät Zeiss 1540 XB.

Ergebnisse

Das Risswachstum beginnt in den Randbereichen der Wedges, im Übergang von dem durch den Drahtbondprozess verbundenen zu dem nicht verbundenen Bereich (Abb. 3). In diesem Bereich kann auf Grund der Geometrie der Bondstelle von einer Kerbwirkung und damit einer Spannungsüberhöhung ausgegangen werden.

Bei den meisten Drähten waren die Risse nach 500 000 Temperaturwechseln komplett durch die Verbindungzone gewachsen, so dass eine mechanische Verbindung von Draht und Chip nicht mehr gegeben war (Abheber). Insbesondere aus den Randbereichen der Chips, wo der Temperaturhub auf Grund des sich auf der Chipoberfläche einstellenden Temperaturgradienten etwas geringer war, konnten aber Bondstellen präpariert werden, bei denen der Riss noch nicht vollständig durch den Wedge gewandert war (Abb. 3). Diese Bereiche standen im Fokus der hier beschriebenen Untersuchungen.

Dabei stellt sich die Frage nach dem Verlauf des Risses im Bondkontakt in Korrelation zum Interface und zum Gefüge.

Die Abbildungen 4 und 5 zeigen die Kornstruktur des Aluminiumdickdrahtbonds im Bereich des Risses. Der Interfacebereich zwischen Draht und Metallisierung ist durch Pfeile markiert. Deutlich sichtbar wird das verschweißte Interface zwischen Draht und Substratmetallisierung unter anderem dadurch, dass die Körner im untersten Bereich des Wedges zwar feinkörnig aber dennoch größer sind als die innerhalb der Metallisierung. Der Verlauf des Risses folgt nicht dem Verlauf des Interfaces, sondern er verläuft in einem Abstand von etwa 5 bis 15 µm über der Verschweißungsebene durch das Drahtmaterial. Das Gefüge des Wedges ist oberhalb des Risses durch vergleichsweise noch grobkörnigeres Gefüge gekennzeichnet, während im Bereich zwischen Riss und Interface vorwiegend Körner mit geringeren Ausdehnungen von etwa 10 µm zu verzeichnen sind.

Die Abbildungen 5 und 6 zeigen in Ausschnitten höherer Vergrößerung aus Abbildung 4 die Lage der Risspitze. Aus den Abbildungen ist zu entnehmen, dass es sich hierbei um interkristallines Risswachstum

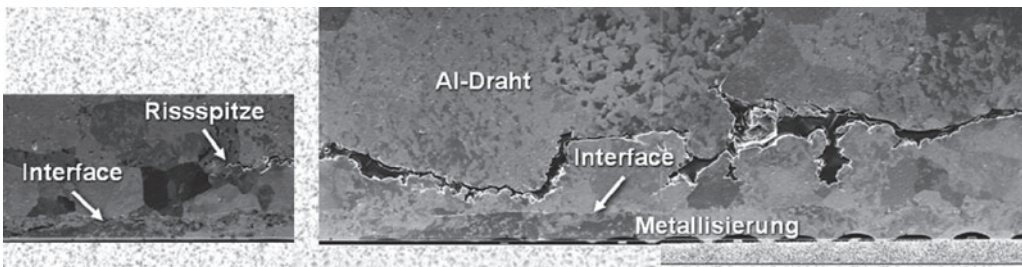


Abb. 4: Bild des Rissverlaufs oberhalb der Verschweißungsebene

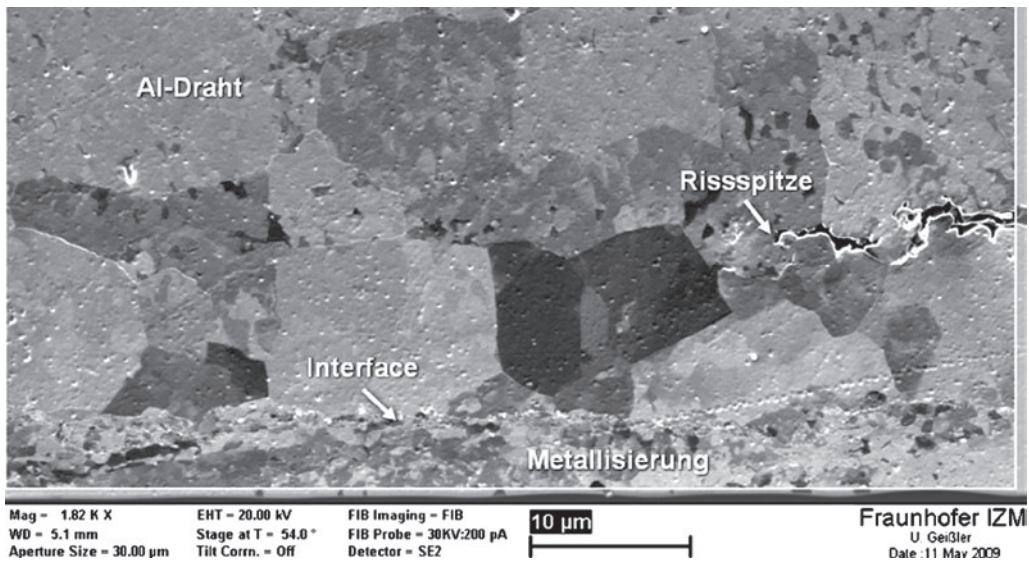


Abb. 5: Lage der Risspitze im Drahtgefüge oberhalb der Metallisierung (Ausschnitt aus Abb. 4)

tum handelt, da der Riss entlang von Korngrenzen verläuft.

Es ist bekannt, dass beim Drahtbondprozess unter Einwirkung der Bondparameter Gefügeveränderungen im Aluminium-Wedge auftreten. Diese werden von U. Geißler [6] bei Verwendung von 25 µm AlSi1-Draht ausführlich beschrieben. Speziell im Interfacebereich werden als Folge der Relativbewegung zwischen Draht und Substrat und des damit verbundenen hohen Verformungsgrades des Drahtes im Interfacebereich kleine, rekristallisierte Körner beobachtet. Es ist davon auszugehen, dass ähnliche Gefügeveränderungen auch beim Ultraschall-Wedge/Wedge-Bonden von 400 µm Aluminiumdraht im Interfacebereich des

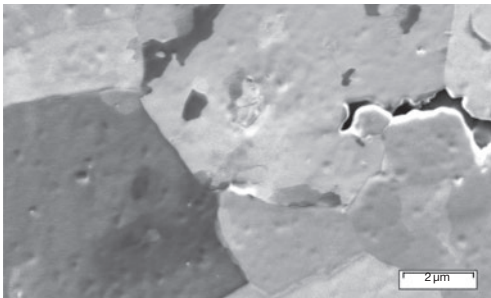


Abb. 6: Risswachstum entlang von Korngrenzen (Ausschnitt aus Abb. 5)

Drahtes auftreten. Darauf deutet die vergleichsweise geringe Korngröße zwischen Interface und Riss von etwa 10 µm (Abb. 5) hin, die deutlich unterhalb der Korngröße des Gefüges liegt, das nicht dem Bondprozess ausgesetzt war (Abb. 7). Dieses Gefüge zeichnet sich durch eine relativ grobkörnige Struktur aus. Die Ausdehnung der Körner liegt im Bereich von 60 bis 150 µm.

Auffällig ist auch das äußerst feinkörnige Gefüge der AlSi1Cu0,5 Substratmetallisierung im verschweißten Bereich (Abb. 5), mit Korngrößen im Bereich von etwa 1 µm. Ohne Einwirkung der Bondparameter zeichnet sich diese Substratmetallisierung durch Korngrößen von 5 bis 10 µm aus (Abb. 8).

Zusätzlich zu den Gefügeumwandlungen, die mit dem Bondprozess selbst verbunden sind, ist davon auszugehen, dass die Temperatureinwirkung während des Temperaturwechselprozesses ebenso Veränderungen in der Mikrostruktur des Bondkontaktes bewirkt. Bei Peaktemperaturen von 140 °C ist zunächst mit einer Ausheilung von Defekten in der Metallisierung und im Draht und anschließend mit einer Kornvergrößerung zu rechnen. Dem gegenüber steht die Tatsache, dass auf Grund der zyklischen plastischen Deformation in jedem Zyklus neue Defekte im Interfacebereich entstehen. Klar ist, dass der schädigende Einfluss überwiegt, denn sonst würden die Bondstel-

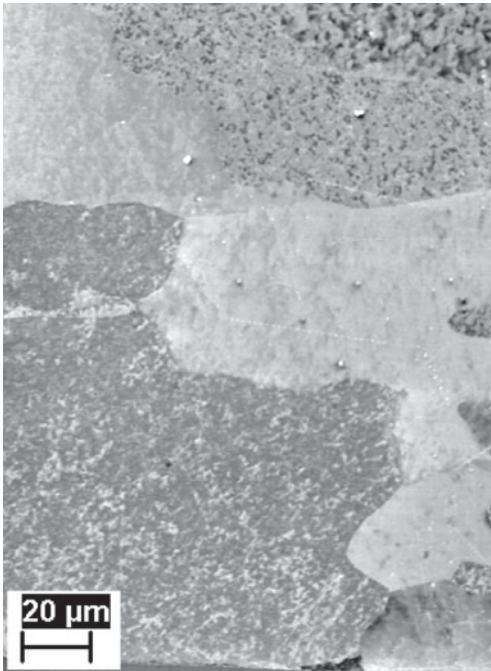


Abb. 7: Gefüge des Drahtes nach Temperaturwechsel außerhalb des Bondbereichs

len nicht versagen. Welchen Einfluss die maximalen und mittleren Temperaturen sowie die geometrischen und materialtechnischen Gegebenheiten nach dem Bondvorgang jedoch auf diesen Prozess haben ist Gegenstand derzeitiger aktueller Forschungen am *Fraunhofer IZM*.

Zusammenfassung

Während des Bondprozesses kommt es offenbar besonders in einem interfacenahen Bereich des Wedges, der sich über einen Abstand von bis zu 15 µm von der verschweißten Grenzfläche erstreckt, zu Gefügeumwandlungen, das heißt zur neuen Ausbildung von Grenzflächen durch dynamische Rekristallisation. Die Ursache dafür, dass dieser Prozess im interfacenahen Bereich besonders ausgeprägt ist, liegt in der

Drahtdeformation unter Einwirkung von Ultraschall und an der starken Beanspruchung der Drahtunterseite während der Relativbewegung beim Bonden, das heißt dem hohen Verformungsgrad an der Drahtunterseite. Oberhalb dieses beim Bonden rekristallisierten Bereiches liegt gröberes Gefüge vor. Im Grenzbe- reich zwischen dem durch dynamische Rekristalli- sation entstandenen neuen Gefüge und dem darüber liegenden, größeren Gefüge erfolgte in den hier be- schriebenen Untersuchungen an den Korngrenzen der Rissfortschritt während der nachfolgenden thermi- schen Wechselbelastung. Durch die hier vorgestellte Methodik ist es gelungen, Rissfortschritt im Dick- draht-Wedge mit der beim Drahtbonden entstandenen Mikrostruktur in Zusammenhang zu bringen.

Danksagung

Die Autoren danken Christian Wald von Infineon Technologies AG für die Bereitstellung der Leistungshalbleiter und Dr. Faust vom Fraunhofer ENAS für das Polieren der Proben in der Ionenstrahlanlage.

Literatur

- [1] C. Luechinger, K. Oftebro, S. Haumann: Power Ribbon™ – An Alternative Interconnect Technology for Small Power Packages. IMAPS 2006 San Diego, USA
- [2] J. Onuki, M. Koizumi, M. Suwa: Reliability of thick Al wire bonds in IGBT modules for traction motor drives, IEEE Trans Adv Packag 23 (1) (2000), pp. 108–112
- [3] Loh Wei-Sun, M. Corfield, Lu Hua, S. Hogg, T. Tilford, C.M. Johnson: Wire Bond Reliability for Power Electronic Modules - Effect of Bonding Temperature, Thermal, Mechanical and Multi-Physics Simulation Experiments in Microelectronics and Micro-Systems, 2007. EuroSime 2007. International Conference on , vol., no., pp.1-6, 16-18 April 2007
- [4] F. Osterwald, K.-D. Lang, R. Bierwirth, H.-J. Zietz, H. Reichl, B. Farokhzad: Rissentstehung und -entwicklung in Dickdrahtbonds auf IGBT-Chips bei aktiven elektrischen Lastwechseln, Eder, A. et al.: Surface mount technologies, electronic systems & solutions, technologies, circuits & tools, hybrid & advanced packaging technologies 1997. Tagungsband. Berlin: VDE-Verlag, 1997, pp. 105-114
- [5] L.A. Gianuzzi, F.A. Steve: Introduction to Focused Ion Beams; Instrumentation, Theory, Techniques and Practice. Springer (2005)
- [6] U. Geißler: Verbindungsbildung und Gefügeentwicklung beim Ultraschall-Wedge/Wedge-Bonden von AlSi1-Draht. Dissertation TU Berlin 2008, http://opus.kobv.de/tuberlin/volltexte/2009/2104/pdf/geissler_ute.pdf

Kontaktadresse

Fraunhofer IZM, Jens Göhre, Volmerstr. 9a, D-12489 Berlin, Tel : 030-6392-8187, jens-martin.goehre@izm.fraunhofer.de, www.izm.fraunhofer.de

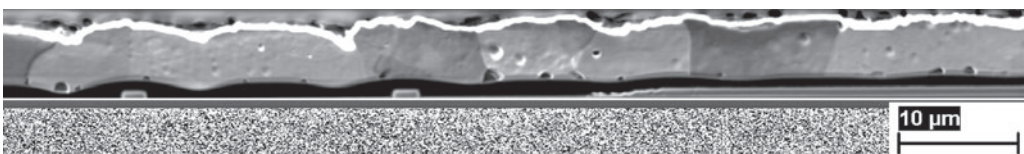


Abb. 8: Grobkörniges Gefüge der Substratmetallisierung nach Temperaturwechsel außerhalb des Bondbereichs