

# Aufgabenblatt #3 AVT und REM

## INHALTSVERZEICHNIS

- 1 Bonddrahttechnik
- 2 Versuchsabläufe
- 3 Elektrische und mechanische Charakterisierung von Bondverbindungen
- 4 Fragen zu den Versuchen

- 1 Thermokompressionsbonden Beim Thermokompressionsbonden sind die primären Parameter die Temperatur und Druck, durch welche die Aktivierungsenergie an der Bondstelle bereitgestellt wird, die interatomaren Bindungskräfte hervorzurufen. Die Temperatur wird üblicherweise durch die Erwärmung des gesamten Bauteils bereitgestellt, sie befindet sich in der Regel bei mindestens 300°C. Für viele Anwendungen heutzutage können diese Temperaturen jedoch schädlich für die Bauteile sein, darüber hinaus ist die Bondzeit verhältnismäßig lange (>100ms), weshalb das Thermokompressionsbonden nur noch selten eingesetzt wird.
- 2
- 2
- 5

## 1 BONDDRAHTTECHNIK

Die Bonddrahttechnik, auch Drahtboden genannt, ist eine Verbindungstechnik, bei der zwei metallische Körper – das sind in der Regel sog. Bondpads – durch einen metallischen Draht miteinander verbunden werden, sodass ein elektrischer Strom zwischen beiden Körpern fließen kann. Es handelt sich dabei um eine Art des Festphasenschweißen, bei dem der Draht (und evtl. Oberfläche der Kontaktstelle) plastisch verformt wird während er so nahe an die Kontaktstelle gebracht wird, bis sie durch interatomare Wechselwirkungskräfte miteinander verbunden sind. In der Regel befinden sich auf den Oberflächen der Bondpads (und des Drahts) Verunreinigungen (Luft, kohlenstoffhaltige Verbindungen, Oxide usw.) welche während diesem Prozess entfernt werden müssen um einen guten Kontakt und eine elektrisch leitende Verbindung herzustellen. Man unterscheidet dabei zwischen drei verschiedenen Methoden, dem Thermokompressionsbonden, Ultraschallbonden und Thermosonic-Bonden.

	Thermokompr.	Thermosonic	Ultraschall
Ultraschallleistung	nein	ja	ja
Bondkraft	hoch	niedrig	niedrig
Temperatur	>300°C (hoch)	120-220°C (mittel)	Raumtemperatur
Bondzeit	lange	kurz	kurz
Drahtmaterial	Au	Au	Au, Al
Padmaterial	Au, Al	Au, Al	Au, Al
Kontamination	stark	mittel	mittel

Tab. 1 | Bonddrahttechniken im Vergleich.

**Ultraschallbonden** Anders als beim Thermokompressionsbonden wird das Ultraschallbonden bei Raumtemperatur durchgeführt. Der Hauptparameter dabei ist die Ultraschall-Energie, welche dem Draht (mittels eines Ultraschallwandlers) zugeführt wird, während er mit dem Bondpad in Kontakt gebracht wird. Die Ultraschallenergie stellt dabei die für die interatomare Bindung erforderliche Aktivierungsenergie bereit. Zum Beispiel kann mit einer Ultraschallleistungsdichte von 50 W/cm<sup>2</sup> die gleichen Wechselwirkungen wie bei einer Temperatur von 600°C hervorgerufen werden. Zu hohe Ultraschallfrequenzen können jedoch zu Kraterbildungen auf dem Substrat führen, deshalb ist diese Methode für mechanisch empfindliche Bauteile nicht geeignet.

**Thermosonic-Bonden** Thermosonic-Bonden ist eine Kombination aus Thermokompressionsbonden und Ultraschallbonden. Die dabei verwendeten Temperaturen befinden sich im Bereich zwischen ca. 120°C und 220°C. Durch die Verwendung von Ultraschall kann die Temperatur verhältnismäßig niedrig gehalten werden, sodass Bauteile nicht beschädigt werden. Beim Bonden von Golddrähten auf Halbleitern ist diese Methode heutzutage am verbreitetsten.

Die drei Methoden sind in Tab. 1 entnommen aus [1] gegenübergestellt. Abhängig von der Art wie der erste Kontakt einer Drahtbondverbindung hergestellt wird kann man zwischen den Methoden Wedge-Bonden und Ball-Bonden unterscheiden.

**Wedge-Bonden** Das Wedge-Bonden ist eine mögliche Ausführung des Ultraschallbonden und Thermosonic-Bonden. Dabei wird der Draht durch ein keilförmiges Werkzeug geführt, das den Draht in Position hält. Der Bondprozess beginnt an der ersten Bondstelle, das ist üblicherweise ein Bondpad auf dem Die. Das Bondwerkzeug senkt sich auf das Bondpad oder die Oberfläche und drückt den Draht zusammen, während eine Ultraschallenergie angelegt wird. Im Fall des Thermosonic-Bonden kommt die Wärme in der Regel vom Werkstückträger der Maschine, aber in einigen Fällen kann es sich auch um ein beheiztes Bondwerkzeug oder eine Kapillare handeln. Sobald der Draht mit dem Pad verbunden ist,

fährt das Werkzeug nach oben und in Richtung der zweiten Bondstelle, das ist üblicherweise eine Stelle auf einem Substrat oder Leadframe. Um die Zugkräfte die auf die Bondverbindungen wirken zu verringern wird die Bondverbindung in der Form eines Bogens hergestellt. Dazu wird das Werkzeug zunächst um eine kleine Strecke weiter als die zweite Bondverbindung gefahren, sodass die Länge des ausgerollten Drahts etwas länger ist als der Abstand zwischen den Pads. Wenn das Werkzeug zur zweiten Bondstelle zurückfährt bildet sich ein Bogen. Das Werkzeug senkt sich ab und verschweißt den Draht wie im ersten Schritt mit dem Pad. Der Draht wird dann geklemmt, abgeschnitten und das Werkzeug zurückgezogen. Es ist darauf zu achten, dass bei dieser Methode der Draht an der ersten Bondstelle bevor er verschweißt wird in einer annähernd geraden Linie von der ersten zur zweiten Verbindung ausgerichtet werden muss. Bei der industriellen Herstellung von Halbleiter-Chips stellt dies einen zeitlichen Nachteil dar. Automatisierte Wedge-Bonden-Anwendungen schaffen ca. 4 Bonds pro Sekunde. Das Wedge-Bonden eignet sich gut für Bondverbindungen sowohl aus Gold als auch Aluminium. Die poröse Aluminiumoxidschicht von Aluminiumdrähten kann bei dieser Methode leicht durch die Einwirkung von Ultraschallwellen gelöst werden.

**Ball-Bonden** Das Ball-Bonden ist eine mögliche Ausführung des Thermokompressionsbondens und Thermosonic-Bondens. Der Draht wird hierbei in einer Kapillare geführt, wobei in der Ausgangsposition die Drahtspitze etwas aus der Kapillare herausragt und mit einer erhitzten Oberfläche oder einem elektrischen Funken aus einer aufgeladenen Elektrode in unmittelbarer Nähe erhitzt wird, wodurch das Drahtende schmilzt und aufgrund der Oberflächenspannung eine kleine Kugel bildet. Die erste Bondstelle wird angefahren und die geschmolzene Drahtspitze wird durch die Kapillare auf das Bondpad gedrückt die erste Bondverbindung ggf. unter Einwirkung von Ultraschall hergestellt. Die Kapillare fährt danach zunächst eine kleine Strecke nach oben und fährt dann über die zweite Bondstelle. Die zweite Bondverbindung wird dann wie beim Wedge-Bonden hergestellt. Nach der Herstellung des Ballbonds kann der Draht in jede beliebige Richtung bewegt werden, was ein wesentlicher Vorteil gegenüber dem Wedge-Bonden darstellt. Autobonder erreichen bei dieser Methode eine Geschwindigkeit von ca. 10 Bonds pro Sekunde. In der Regel wird beim Ball-Bonden Gold als Drahtmaterial verwendet, das es im Gegensatz zu Aluminium (beim Schmelzvorgang) keine Oxidschicht bildet, welche die Qualität der Bondverbindung stark negativ beeinflusst. Prinzipiell kann Aluminium verwendet werden, solange der Vorgang mit reinem Al und in einer evakuierten Umgebung stattfindet.

[1, 2]

**Bonddrahttechnik Heutzutage** Die Drahtbondtechnologie ist aufgrund ihrer niedrigen Kosten und erhöhten Flexibilität nach wie vor die bevorzugte Verbindungstechnik für die meisten Anwendungen, weshalb auch heute noch mehr als 80% der Halbleitergehäuse mit Drahtbondtechnologie bestückt werden. Für das Packaging von integrierten Systemen wie beispielsweise SiP-Architekturen (System in Package) und verschiedenen Arten von Speicherbausteinen ist das Drahtbonden die bei weitem am häufigsten verwendete und kostengünstigste Bondingmethode. Um das Package-Volumen so klein wie möglich zu halten werden integrierte Speichergeräte wie DRAM und Flash-Speicher (NOR und NAND) in vertikalen Stapeln geschichtet (stacked memory) und woraufhin die einzelnen Speicherschichten mit Hilfe der Drahtbondtechnologie auf den Stufen sorgfältig miteinander verbunden und anschließend mit dem Gehäusesubstrat verbunden werden, so dass eine,

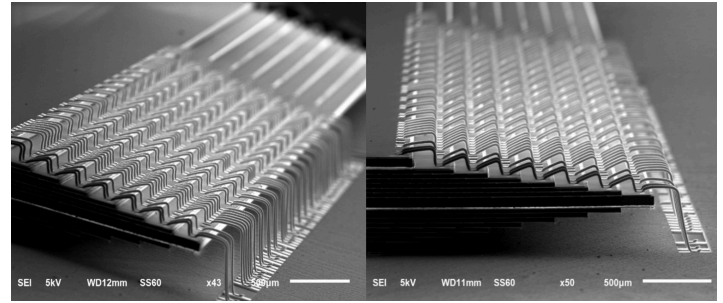


Abb. 1 | Beispiel eines 16-lagigen Die Stacks. Aus [5], die Dicke eines Dies inklusive DAF (Die Attach-Film) beträgt 28µm.

zusammenhängende Baugruppe entsteht (vgl. Abb. 1). Diese Speichergeräte nehmen den Großteil des Package-Volumens ein und werden kontinuierlich durch Erhöhung der Anzahl der Lagen verkleinert und leistungsfähiger gemacht. Das Verkleinern der Bögen der Bonddrahtverbindung spielt ebenfalls eine wichtige Rolle, um die Gesamthöhe des Packages zu reduzieren, dabei werden Bogenhöhen von <math><35\mu\text{m}</math> angestrebt, mit sinkender Höhe muss jedoch auch die Zugfestigkeit der Bondstelle erhöht werden. In der Industrie haben sich Ausführungen mit 16 Lagen etabliert, immer kleiner werdende Verbraucherelektronik stellen eine Herausforderung dar die Stacks zerstörungsfrei zu bonden. Der Speicherstack der AppleWatch beispielsweise hat eine Package-Höhe von 0,56mm [3, 4, 5].

## 2 VERSUCHSABLÄUFE

Die Versuchsabläufe sind in Tab. 2 aufgelistet.

## 3 ELEKTRISCHE UND MECHANISCHE CHARAKTERISIERUNG VON BONDVERBINDUNGEN

**Mechanische Charakterisierung** Die im zweiten Versuch angefertigten Dickdrahtbonds auf einem Dummy-Substrat (vgl. Tab. 2) werden nun auf ihre mechanische Festigkeit geprüft. Zunächst wird eine sog. Zugprüfung durchgeführt. Dies geschieht mit einer speziell dafür entwickelten Maschine. Dabei wird ein Zughaken unter eine Bondverbindung gebracht und solange vertikal nach oben gezogen bis es zu einem Bruch der Bondverbindung kommt. Der Prozess und die dabei auftretenden Kräfte sind schematisch in Abb. 3a dargestellt. Durch die Bruchart und die maximal aufgetretene Kraft können Aussagen über die Qualität der Bondverbindung getroffen werden. Die Brucharten können in folgende sog. Bruchcodes untergliedert werden:

- Drahtbruch innerhalb der Bondverbindung
- Drahtbruch an der ersten oder zweiten Bondstelle
- Abheben der ersten oder zweiten Bondstelle
- Abheben der Metallisierung an der ersten oder zweiten Bondstelle

Ziel ist es die in diesem Test auftretende Kraft zu maximieren, wobei ein Drahtbruch innerhalb der Bondverbindung stattfinden soll. Das bedeutet, dass die Bondverbindungen weder zu schwach, noch zu stark (führt zu Abhebung der Metallisierung) gewählt werden

Aufbau- und Verbindungstechnik	
Aufkleben des Substrats	Bei diesem Versuch wird das Aufkleben des Dies auf ein Substrat geübt. Dies geschieht mit Hilfe einer Ausrichtung die aus einem Mikroskop einer Vakuumpinzette und einer Pipette mit leitfähigem Kleber besteht. Das Volumen, dass aus der Pipette herauskommt kann durch einen Regler eingestellt werden. Zunächst wird der Kleber auf das Substrat in mehreren Häufchen aufgebracht. Im nächsten Schritt wird der Die mit Hilfe der Vakuumpinzette über dem Klebstoff ausgerichtet und aufgedrückt. Es muss darauf geachtet werden, dass der Klebstoff aus allen Seiten herausquillt, was ein Zeichen dafür ist, dass sich keine Luft unter dem Die befindet. Andererseits muss darauf geachtet werden, dass nicht zu viel Klebstoff verwendet wird, da er sonst auf die Die-Oberfläche gelangen könnte und somit die Schaltung beeinflussen kann.
Drahtbonden	In diesem Versuch wird zunächst das Drahtbonden auf einem Dummy-Substrat, worauf sich in einem Raster angeordnete Bondpads befinden, geübt. Dies geschieht mit einem Wedge-Bonder unter Verwendung eines Al-Draht von Durchmesser 250µm (Dickdrahtbonder). Die Ultraschalleistung und Einwirkzeit des ersten und zweiten Bonds, sowie die Kraftwirkung können hierbei eingestellt werden. Danach wird der Prozess an einer moderneren Wedge-Bond-Maschine ebenfalls mit einem 250µm Al-Draht wiederholt. Bei dieser Maschine erfolgt die Bewegung des Bondwerkzeugs von der ersten zur zweiten Bondstelle automatisch. Nach dem das Bonden mit den Dummy-Substrat geübt wurde, werden nun die auf die Leiterbahn geklebten OFW-Dies gebondet. Dies geschieht mit einer Ball-Bond-Maschine unter Verwendung von Golddraht mit Durchmesser 25µm. Bei der Bondingtechnik handelt es sich um das Thermosonic-Bonden. Die aufzubringenden Bondverbindungen sind in Abb. 2 schematisch dargestellt. Dabei handelt es sich bei der Großen Leiterbahnfläche um die zu erdende Verbindung. Wie in Abb. 2c erkennbar ist wurden jeweils drei gleiche Bondverbindungen aufgebracht. Dabei handelt es sich lediglich um eine Sicherheitsmaßnahme, sodass auf jeden Fall eine elektrische Verbindung zwischen beiden Bereichen besteht, für den Fall dass eine Bondverbindung zerstört wird.
mechanische und el. Charakterisierung	Siehe Abschnitt 3.
Rasterelektronenmikroskopie	
Probenpräparation	Zunächst wird flüssiger Silberleitkleber auf den Probenhalter mit einem Pinsel aufgetragen, dann wird der Keramikträger mit dem OFW auf den Halter aufgedrückt. Alternativ kann auch ein doppelseitiges Kohlenstofftap verwendet werden. Die Seiten des Keramikträgers werden ebenfalls mit dem Kleber bestrichen, denn später muss eine elektrisch leitende Verbindung zwischen der Oberfläche der Probe und des Probenhalters bestehen.
Besputtern der Oberfläche	Die Oberfläche der leitend auf den REM-Probenhalter aufgeklebten OFW-Probe wird in diesem Versuch mit Platin besputtert. Alternativ könnte auch beispielsweise Gold verwendet werden. Hierbei wird die Probe in einem Sputtercoater mit dem sog. Magnetron-Sputter-Verfahren unter Verwendung von Argon als Sputtergas behandelt. Der Sputtercoater besteht aus einer zylindrischen Kammer mit einem Deckel, unter dessen sich das Platin-Target befindet. Die Probe befindet sich auf einer Halterung im unteren Bereich der Kammer. Bevor der Sputtervorgang beginnen kann, muss das Innere der Kammer evakuiert werden. Wenn der Zieldruck erreicht ist, wird innerhalb der Kammer Argonplasma erzeugt, welches auf das Platin-Target beschleunigt wird und dabei Pt-Atome herauslöst, welche durch Einwirkung der Schwerkraft auf die Oberfläche der Probe fallen. Innerhalb der Kammer befindet sich ein Sensor, welcher die abgeschiedene Schichtdicke misst. In unserem Fall dauert der Sputtervorgang ca. 40 Sekunden, wobei eine Schichtdicke von ca. 0,8nm erreicht wird.
REM-Analyse	Die präparierte Probe wird in die Probenkammer des REMs gelegt. Sobald ein ausreichendes Vakuum innerhalb der Kammer erzeugt wurde, werden verschiedene Bereiche auf der Oberfläche der Probe aufgenommen (siehe Abb. 2). Um Aufnahmen mit ausreichend hoher Auflösung erzeugen zu können muss darauf geachtet werden, dass die Abbildung bei einer größeren Vergrößerung scharfgestellt wurde. Ein Bildfehler, der dabei auftritt, ist der sog. Astigmatismus, welcher zu erkennen ist, wenn das Bild sich beim Scharfstellen seitwärts hin und her bewegt. Dieser Effekt kann mit sog. Stigmatoren innerhalb des REMs, das sind 8-Fachspulen, korrigiert werden. Die Erfassung der chemischen Zusammensetzung der Strukturen auf der Oberfläche geschieht mit Hilfe des EDX-Detektors innerhalb der Probenkammer

Tab. 2 | Versuchsabläufe der Aufbau- und Verbindungstechnik und Rasterelektronenmikroskopie.

sollte. Nach dem Zugtest wird ein Schertest durchgeführt. Dabei wird eine Scher-Meißel neben eine Bondverbindung platziert. Die Maschine bewegt die Scher-Meißel automatisch auf die sog. Scherhöhe (ca. 1/3 der Drahtdicke) und schert die Verbindung seitwärts ab (vgl. Abb. 3b). Das Ergebnis kann hier auch in Bruchcodes untergliedert werden:

- Wedge-Bruch
- Abheben der Bondstelle
- Abbrechen der Metallisierung

Der Wedge-Bruch ist hierbei das Zielresultat. Anhand der Ergebnisse der mechanischen Prüfung können die beim Bonden verwendeten Parameter wie beispielsweise Druck, Ultraschalleistung oder Temperatur angepasst werden um mechanisch stabilere Bonverbindungen zu erzielen.

**Ermittlung des elektrischen Widerstands der Bondstelle** Der elektrisch Widerstand der Bonstelle auf einem Pad ist sehr gering (einige Hundert µΩ) und kann deshalb nicht einfach durch ein Multimeter gemessen werden. Um einen genauen Messwert erhalten

zu können wird dieser Widerstand mittels der sog. Vierleitermessung auf einem Testsubstrat gemessen. Bei der Vierleitermessung wird der zu messende Widerstand mit einem bekannten Strom  $I_0$  durchflossen und dessen Spannungsabfall durch ein Voltmeter mit unendlich hohen Innenwiderstand gemessen. Der Messaufbau ist schematisch in Abb. 4 dargestellt. Es gilt  $I_v \ll I_0$  und der Wert des Widerstands ist dann einfach  $R = U/I_0$ . Wir verwenden für die Stromstärke 1A, somit kann der Widerstandswert vom Messgerät direkt abgelesen werden. Der elektrische Widerstand wird für vier verschiedene Teststrukturen gemessen; die gemessenen Werte sind: 199µΩ, 168µΩ, 115µΩ und 97µΩ. Die Messwerte können abhängig von der Raumtemperatur zum Zeitpunkt der Messung schwanken.

**Messung der maximalen Stromdichte durch eine Bondverbindung** Durch den kleinen Querschnitt von Bonddrähten treten hohe Stromdichten auf, was zu einer Erwärmung des Drahts führt. Wenn die Stromdichte einen bestimmten Wert überschreitet, führt das zum Schmelzen des Drahtmaterials. Abhängig vom Drahtmaterial kann der Drahtwiderstand dabei unterschiedliche Verhalten zeigen. In diesem Versuch wird dieses Verhalten für Golddrähte

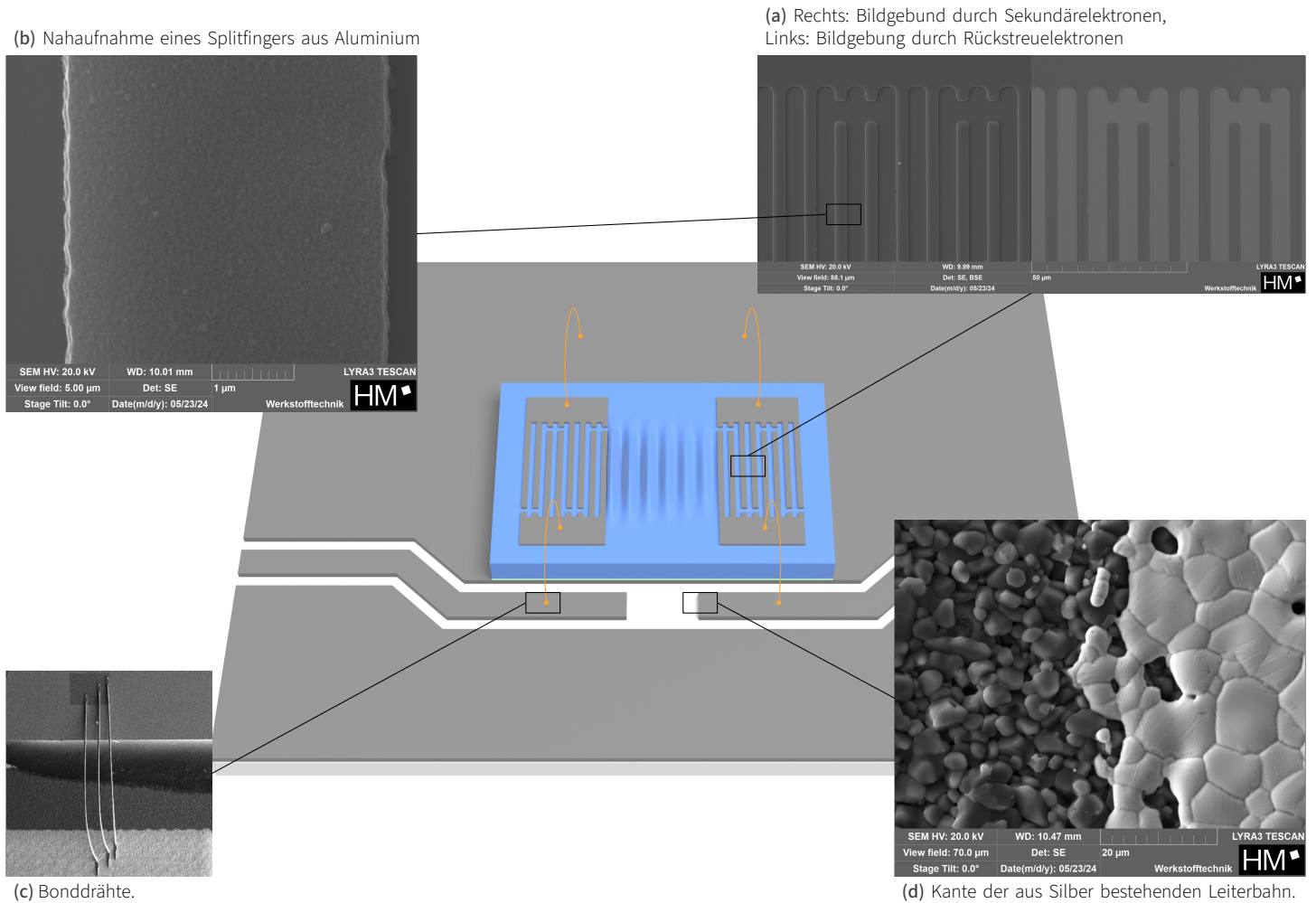
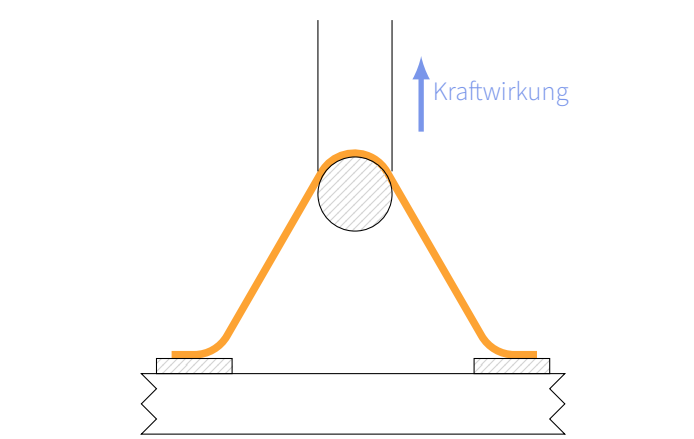
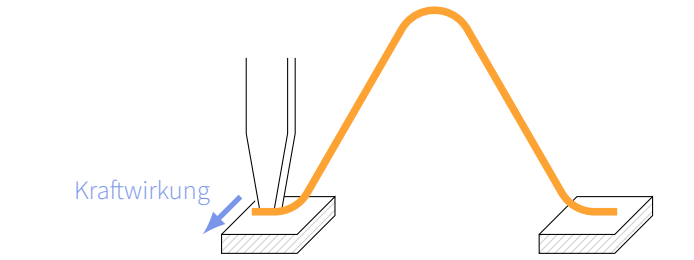


Abb. 2 | OFW-Filter auf dem Keramiksubstrat. Die REM-Aufnahmen sind den Orten auf der Probe zugeordnet.



(a) Zugprüfung der Bondverbindung. In diesem Fall ist die Kräfteverteilung symmetrisch, in den meisten Anwendungen befinden sich die Bondpads auf verschiedenen Höhen, was zu einer ungleichmäßigen Kräfteverteilung führt.



(b) Scherprüfung der Bondverbindung.

Abb. 3 | Mechanische Charakterisierung der Bondverbindungen. Eine Scher-Meißel, die sich eine kleine Distanz über dem Bondpad befindet drückt seitlich gegen die Bondstelle.

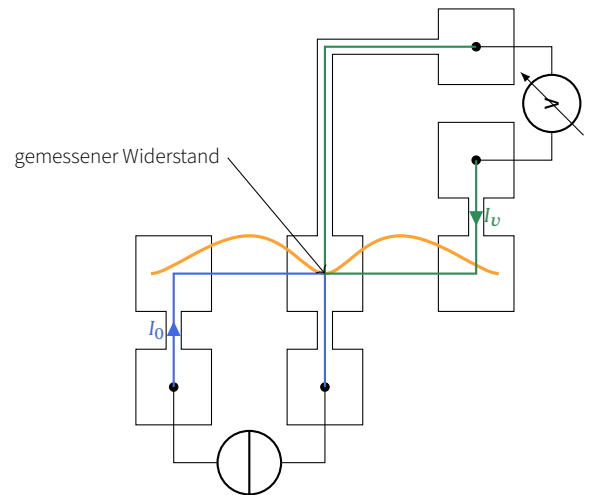


Abb. 4 | Messaufbau zur Messung des Widerstands eines Bondkontakts.

und Aluminiumdrähte untersucht. Hierbei wird ein Test-Substrat verwendet auf dessen sich Bondverbindungen mit Drahtdurchmesser  $25\mu\text{m}$  unterschiedlicher Länge (von  $1\text{mm}$  bis  $5\text{mm}$ ) befinden (jeweils aus Gold und Aluminium). Zwischen den Bondverbindungen wird nacheinander eine sich mit der Zeit linear steigenden Spannung angelegt und der Strom durch den Draht gemessen. Der gemessene Verlauf der Stromdichte über die Zeit ist in Abb. 5 dargestellt. Bei dem Verlauf für die Golddrahtverbindungen kann man sehen, dass die Stromdichte ab einem bestimmten Wert abrupt auf Null fällt. An dieser Stelle schmilzt das Gold und es besteht keine

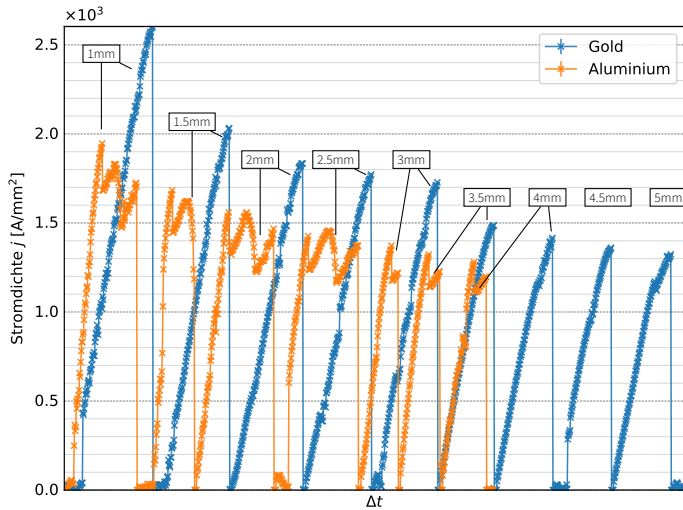


Abb. 5 | Zeitlicher Verlauf der Stromdichte innerhalb der Bonddrähte.

elektrische Verbindung mehr zwischen beiden Enden des Golddrahts. Der Aluminiumdraht hingegen zeigt ein anderes Verhalten; die Stromdichte fällt nicht abrupt auf Null, sondern schwankt etwas auf und ab bevor sie ganz abfällt. Dieses Verhalten kann dadurch erklärt werden, dass die Aluminiumoxidschicht um den Draht einen viel höheren Schmelzpunkt als reines Aluminium besitzt. Während das Aluminium im Inneren bereits geschmolzen ist, bleibt durch das Bestehen der Oxidschicht ein physischer Kontakt. Das Aluminium oxidiert weiter; da Aluminiumoxid ein Isolator ist, steigt der elektrische Widerstand bis der Draht nichtleitend wird oder durchgebrannt ist. Außerdem fällt auf, dass die maximale Stromdichte für beide Drahtmaterialien am höchsten für die kürzeste Bondverbindung ist. Grund dafür ist, dass bei einer kürzeren Drahtlänge die Wärme schneller in das Substrat abfließen kann, weshalb sich der Draht langsamer erwärmt.

#### 4 FRAGEN ZU DEN VERSUCHEN

**Frage** Aus welchen Materialien sind die Bonddrähte, OFW-Strukturen und Leiterbahnen auf der Keramik in unserem Fall? Diskutieren Sie die Spektren!

Die durch das EDX-System aufgenommenen Spektren der Bonddrähte, OFW-Strukturen und Leiterbahnen sind in Abb. 6 gezeigt. Den Aufnahmen zufolge bestehen die Leiterbahnflächen auf dem Aluminiumoxidsubstrat aus Silber, die IDTs und die Bonddrähte aus Aluminium. Im Spektrum 8, die Messung über dem Bondpad eines IDTs ist zu erkennen, dass das IDT neben Aluminium auch Niob und Sauerstoff registriert wurde. Grund dafür ist die Größe des Wechselwirkungsvolumens des Elektronenstrahls im REM bei dieser Messung. Die auf dem LiNbO<sub>3</sub> Wafer aufgetragene Aluminiumschicht beträgt ca. 200-300nm; einige der auf dessen Oberfläche beschleunigten Elektronen durchdringen diese Schicht und wechselwirken mit dem piezoelektrischen Substrat, sodass das EDX auch dessen charakteristische Strahlung aufnimmt. Durch Reduzierung der Beschleunigungsspannung könnte dieser Effekt verringert werden. Man kann in Spektrum 6 sehen, dass Niob und Sauerstoff bei Bestrahlung des Bondkontakts nicht mehr registriert wird. Der Durchmesser des verwendeten Drahts ist 25µm, somit kann die Dicke des Kontakts auf einige µm abgeschätzt werden; das Wechselwirkungsvolumen ist daher kleiner dieser Größe und

größer als 300nm.

**Frage** Warum sieht man das Li aus dem Substrat des OFW bei der EDX-Analyse nicht? Es ist keine Begründung, einfach nur die Ordnungszahl zu nennen!

Ordnungszahl: 3.

**Frage** Warum wird die Probe vor der REM-Analyse besputtert? Welchen Effekt haben Primärelektronen, die sich an der Probenoberfläche ansammeln?

Wenn die Probe nicht leitend ist und die Primärelektronen nicht ausreichend abgeleitet werden, baut sich auf dem bestrahlten Bereich eine negative Ladung auf, die immer größer wird, da weiterhin Elektronen vom Strahl abgelagert werden. Dieser negativ geladene Bereich kann eintreffende Elektronen ablenken, was zu Bildverzerrungen, Helligkeitsschwankungen und anderen Bildartefakten führt.

**Frage** Erklären Sie in eigenen Worten, wie sich die Bildgebung durch den Rückstreudetektor ändert!

Die Bildgebung durch Rückstreuelektronen ist empfindlich auf Unterschiede in der Ordnungszahl (Z-Kontrast). Schwerere Elemente (hohe Ordnungszahl) streuen mehr Elektronen zurück als leichtere Elemente (niedrige Ordnungszahl), daher werden Oberflächen mit schweren Elementen heller dargestellt. Das heißt die Bildgebung durch die Rückstreuelektronen ist kontrastreicher. Da Rückstreuelektronen aus tieferen Bereichen der Probe als Sekundärelektronen stammen können, gibt diese Bildgebung primär Informationen über die räumliche atomare Zusammensetzung der Probe. Allerdings wird die Auflösung dabei auch schlechter als bei Sekundärelektronen. Sekundärelektronen eignen sich daher wesentlich besser für die Darstellung der Topologie der Oberfläche. Abb. 2a zeigt die OFW-Strukturen mit beiden Methoden. Bei der Bildgebung durch Sekundärelektronen ist zu erkennen, dass Kantenstufen die nach links zeigen hell dargestellt sind, wohingegen die nach rechts zeigenden Kantenstufen wie Schatten verdunkelt sind. Dies kommt daher, dass die Primärelektronen unter einem Winkel auf die Probe beschleunigt werden und daher Sekundärelektronen vermehrt aus Kanten erzeugt werden, die in die Richtung des Elektronenstrahls zeigen.

**Frage** Was fällt beim Vergleich der Leiterbahnoberfläche auf der Keramik mit der Oberfläche der Al-IDTs auf? Hat die Oberflächenrauheit Einfluss auf die Funktion des OFW-Filters? Begründen Sie Ihre Antwort!

Vergleicht man Abb. 2b und Abb. 2d miteinander, so erkennt man, dass die Oberfläche auf der Al-Struktur trotz größerer Vergrößerung erkennbar glatter ist. Für die Leiterbahn auf dem Keramikträger spielt die Oberflächenbeschaffenheit prinzipiell keine wichtige Rolle, solange ein Strom hindurchfließen kann. Für die Elektroden des Al-IDTs hingegen kann eine stark schwankende Oberflächentopologie jedoch dazu führen, dass durch eine schwankende Massenverteilung über dem Substrat lokal Wellen unterschiedlicher Frequenzen erzeugt werden und so die Funktion des IDTs negativ beeinflusst wird.

**Frage** Wozu dienen die Wellensümpfe (Vortrag Qualcomm), und aus welchen Elementen bestehen sie? Welches Material wurde vermutlich verwendet?

Wellensümpfe dienen zur Absorption der Oberflächenwellen, die sich in den Bereichen zwischen den IDTs und den Rändern des piezoelektrischen Substrats ausbreiten. Ohne Wellensümpfe würden die Oberflächenwellen an den Rändern des Substrats reflektiert werden und in den Bereich zwischen den IDTs gelangen. Durch die

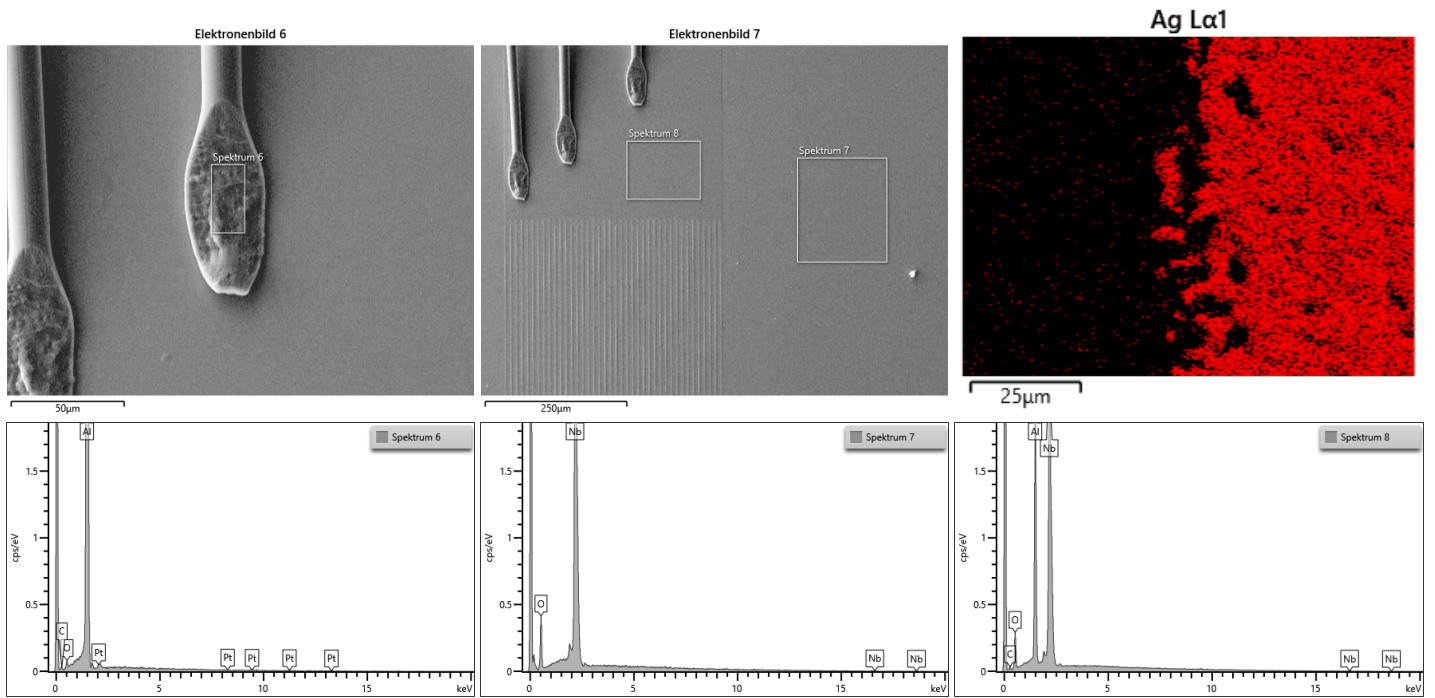


Abb. 6 | Spektren der Bonddrähte, OFW-Strukturen, und Leiterbahn (oben rechts).

Überlagerung der Signale kann das ursprüngliche Signal so beeinträchtigen, dass der Filter nicht mehr richtig funktioniert. Das durch das EDX aufgenommene Spektrum eines Wellensumpfs ist in Abb. 7 gezeigt. Es ist erkennbar, dass vor allem Kohlenstoff und Schwefel detektiert wird. Bei dem Material handelt es sich wahrscheinlich um ein Polymer, möglicherweise Fotolack.

## LITERATUR

- [1] Preeti S. Chauhan u. a. „Copper Wire Bonding“. In: *Copper Wire Bonding*. New York, NY: Springer New York, 2014, S. 1–9. ISBN: 978-1-4614-5761-9. DOI: 10.1007/978-1-4614-5761-9\_1. URL: [https://doi.org/10.1007/978-1-4614-5761-9\\_1](https://doi.org/10.1007/978-1-4614-5761-9_1).
- [2] G. Harman. *Wire Bonding in Microelectronics*. McGraw Hill LLC, 2009. ISBN: 9780071642651. URL: <https://www.accessengineeringlibrary.com/content/book/9780071476232>.
- [3] Hongliang Zhou u. a. „Research Progress on Bonding Wire for Microelectronic Packaging“. In: *Micromachines* 14 (Feb. 2023), S. 432. DOI: 10.3390/mi14020432.
- [4] Basil Milton u. a. „Smart Wire Bond Solutions for SiP and Memory Packages“. In: *2019 IEEE 69th Electronic Components and Technology Conference (ECTC)*. 2019, S. 55–62. DOI: 10.1109/ECTC.2019.00016.
- [5] Oranna Yauw u. a. „Leading edge die stacking and wire bonding technologies for advanced 3D memory packages“. In: *2017 IEEE 19th Electronics Packaging Technology Conference (EPTC)*. 2017, S. 1–7. DOI: 10.1109/EPTC.2017.8277544.

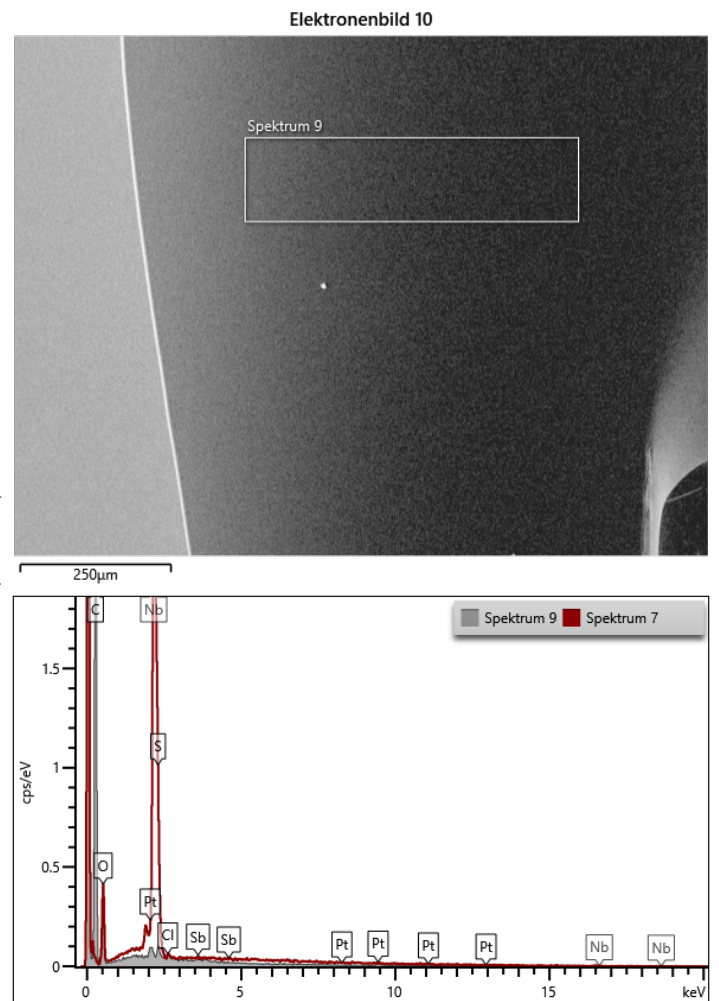


Abb. 7 | Spektrum eines Wellensumpfs.