Halbleitertechnologie von A bis Z

Montage

Dicing 3
Vom Wafer zum Einzelchip 3
Sägeverfahren 3
Herausforderungen und Qualitätssicherung 4
Die Attach 5
Mechanische Befestigung des Dies 5
Verbindungsmaterialien 5
Mechanische Spannungen und Qualitätssicherung 6
Bonding 7
Elektrische Kontaktierung des Dies 7
Flip-Chip-Technik 7
Anforderungen und Wärmeableitung 8
Verkapselung 9
Aufgaben der Verkapselung 9
Materialien und Verfahren 9
Wärmeableitung und abschließende Qualitätsprüfung 10

Dicing

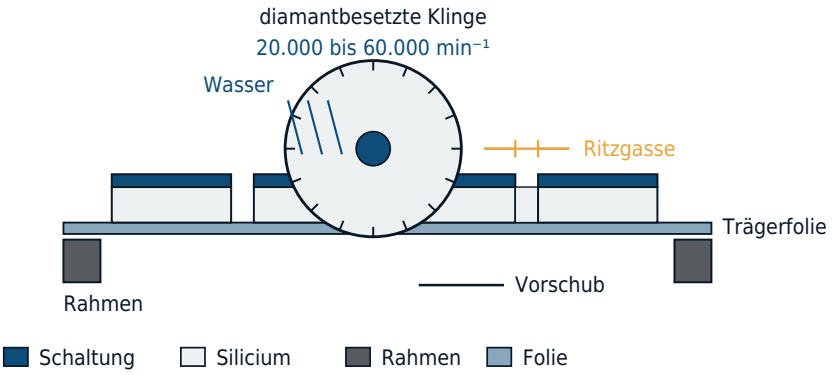
Vom Wafer zum Einzelchip

Nach dem Wafertest liegt der Wafer weiterhin als zusammenhängende Scheibe vor, auf der sich hunderte bis mehrere tausend einzelne Dies befinden, getrennt durch schmale, unbelegte Streifen – die sogenannten Ritzgassen (Scribe Lines oder Dicing Lanes). Diese Streifen enthalten keine funktionalen Schaltungsstrukturen und sind absichtlich für den nachfolgenden Trennschritt vorgesehen.

Beim Dicing (auch Wafersägen oder Die Separation genannt) wird der Wafer entlang dieser Ritzgassen in die einzelnen Dies zerteilt. Dieser Schritt markiert den Übergang vom Front-End der Fertigung, in dem alle Dies noch gemeinsam auf dem Wafer bearbeitet wurden, zum Back-End, in dem jeder Die einzeln weiterverarbeitet wird.

Dicing – das Zersägen des Wafers

Die Säge trennt entlang der Ritzgassen, die Folie hält die Dies



Die Ritzgassen tragen keine Schaltung – ihre Breite begrenzt, wie dick die Klinge sein darf. Weil sie mit der Miniaturisierung schmaler werden, gewinnen Laserverfahren an Bedeutung. Die Folie hält die Dies nach dem Schnitt in Lage.

Vor dem eigentlichen Trennvorgang wird der Wafer üblicherweise auf eine dünne, elastische Trägerfolie (Dicing Tape) aufgeklebt, die auf einem Metallrahmen gespannt ist. Diese Folie hält die einzelnen Dies nach dem Zersägen weiterhin an ihrer ursprünglichen Position, sodass die räumliche Zuordnung zur zuvor erstellten Yield-Map erhalten bleibt.

Sägeverfahren

Das am weitesten verbreitete Verfahren ist das mechanische Sägen mit einer dünnen, diamantbesetzten Kreissäge (Blade Dicing). Die Säge rotiert mit sehr hoher Drehzahl (typischerweise 20.000–60.000 Umdrehungen pro Minute) und wird während des Schnitts kontinuierlich mit deionisiertem Wasser gekühlt und gespült, um die entstehende Reibungswärme abzuführen und den Sägestaub aus der Schnittfuge zu entfernen.

Die Breite der Ritzgassen begrenzt dabei, wie schmal die Sägeklinge sein darf und wie präzise der Schnitt geführt werden muss. Da mit fortschreitender Miniaturisierung die verfügbare Ritzgassenbreite immer weiter abnimmt, gewinnen alternative Trennverfahren zunehmend an Bedeutung:

- Laserschneiden (Laser Dicing): Ein fokussierter Laserstrahl trennt den Wafer entweder durch direktes Abtragen des Materials oder durch gezieltes Einbringen von Mikrorissen im Waferinneren (Stealth Dicing), entlang derer der Wafer anschließend mechanisch auseinandergebrochen wird
- Plasmaätzen (Plasma Dicing): Der Wafer wird durch ein anisotropes Trockenätzverfahren entlang der Ritzgassen komplett durchgeätzt; dieses Verfahren erzeugt besonders glatte, beschädigungsfreie Kanten und eignet sich gut für sehr dünne Wafer

Jedes Verfahren hat spezifische Vor- und Nachteile hinsichtlich Schnittgeschwindigkeit, mechanischer Belastung des Materials und erreichbarer Kantenqualität, weshalb die Wahl des Trennverfahrens vom jeweiligen Produkt und Waferaufbau abhängt.

Herausforderungen und Qualitätssicherung

Beim mechanischen Sägen können am Rand der Schnittkante feine Ausbrüche (Chipping) entstehen, kleine Absplitterungen des spröden Siliciummaterials. Diese Mikrorisse können sich unter mechanischer oder thermischer Belastung im späteren Betrieb des Bauteils weiter ausbreiten und die Zuverlässigkeit gefährden. Die Sägeparameter – insbesondere Vorschubgeschwindigkeit, Drehzahl und Kühlung – müssen daher sorgfältig auf das jeweilige Schichtsystem des Wafers abgestimmt werden.

Besondere Herausforderungen ergeben sich bei Wafern mit empfindlichen Schichtstapeln, etwa bei Bauteilen mit Low-k-Dielektrika in der Verdrahtungsebene. Diese porösen Materialien sind mechanisch deutlich empfindlicher als klassisches Siliciumdioxid und neigen beim Sägen verstärkt zu Delamination, dem Ablösen einzelner Schichten.

Nach dem Trennvorgang wird die Qualität der Schnittkanten häufig optisch

überprüft. Zusätzlich bleibt die zuvor erstellte Yield-Map weiterhin gültig: Da die Dies durch die Trägerfolie an ihrer Position verbleiben, lässt sich anhand der Karte eindeutig bestimmen, welche der nun vereinzelten Dies bereits im Wafertest als funktionsfähig identifiziert wurden und somit in den nächsten Montageschritt, das Die Attach, übernommen werden.

Die Attach

Mechanische Befestigung des Dies

Nach dem Dicing liegen die einzelnen, bereits identifizierten funktionsfähigen Dies weiterhin auf der Trägerfolie vor. Im ersten Schritt der eigentlichen Montage wird jeder Die von der Folie abgehoben (Die Pick) und mechanisch auf seinem endgültigen Trägermaterial befestigt – diesen Vorgang bezeichnet man als Die Attach oder Die Bonding.

Als Trägermaterial (Substrat) kommen je nach Bauteiltyp unterschiedliche Ausführungen zum Einsatz:

- Leadframe: ein gestanztes oder geätztes Metallgitter, meist aus Kupfer oder einer Kupferlegierung, das später die äußeren Anschlussbeinchen des Gehäuses bildet
- Laminat- oder Keramiksubstrat: mehrlagige Trägerplatten mit integrierten Leiterbahnen, wie sie etwa bei Ball-Grid-Array-Gehäusen (BGA) verwendet werden
- Direkte Chip-Montage: bei manchen Anwendungen wird der Die unmittelbar auf eine Leiterplatte oder ein anderes System aufgebracht, ohne zunächst ein eigenes Gehäuse zu erhalten

Der Die wird dabei von einem Greifwerkzeug (Die Bonder) präzise aufgenommen, ausgerichtet und mit definiertem Anpressdruck auf das Substrat aufgesetzt. Die exakte Positionierung ist wichtig, da im nachfolgenden Bonding-Schritt die Kontaktpads des Dies möglichst genau mit den entsprechenden Anschlussstellen auf dem Substrat übereinstimmen müssen.

Verbindungsmaterialien

Zur eigentlichen Befestigung des Dies auf dem Substrat kommen verschiedene Verbindungsmaterialien zum Einsatz, deren Auswahl von den elektrischen, thermischen und mechanischen Anforderungen des jeweiligen Bauteils abhängt:

- Klebstoffe (Epoxidharze): das mit Abstand am häufigsten eingesetzte

Verfahren. Der Klebstoff wird entweder als Paste dosiert oder in vorgefertigter Filmform (Die Attach Film) zwischen Die und Substrat aufgebracht und anschließend thermisch ausgehärtet. Elektrisch leitfähige Klebstoffe enthalten zusätzlich feine Silberpartikel, um neben der mechanischen Verbindung auch eine elektrische Kontaktierung der Rückseite des Dies zum Substrat herzustellen
- Lötverbindungen: insbesondere bei Bauteilen mit hohen Anforderungen an die Wärmeableitung, etwa Leistungshalbleitern, wird der Die mittels eines Lotmaterials (häufig auf Gold- oder Zinnbasis) direkt mit dem Substrat verbunden. Lötverbindungen bieten eine deutlich bessere thermische Leitfähigkeit als Klebstoffe
- Eutektisches Bonden: Der Die wird unter Wärmeeinwirkung direkt mit einer dünnen, eutektischen Metallschicht (häufig einer Gold-Silicium-Legierung) auf dem Substrat verbunden, ohne dass ein zusätzliches Verbindungsmaterial in Pastenform notwendig ist

Die Wahl des Verbindungsmaterials beeinflusst maßgeblich, wie effizient die im Betrieb entstehende Verlustwärme des Chips über das Substrat abgeführt werden kann – ein besonders kritischer Faktor bei leistungsstarken Prozessoren und Leistungshalbleitern.

Mechanische Spannungen und Qualitätssicherung

Ein wesentliches Problem beim Die Attach sind mechanische Spannungen, die durch unterschiedliche Wärmeausdehnungskoeffizienten von Die und Substrat entstehen. Silicium und die üblichen Substratmaterialien wie Kupfer oder Keramik dehnen sich bei Temperaturänderungen unterschiedlich stark aus. Während des Aushärtens des Verbindungsmaterials, aber auch später im Betrieb des fertigen Bauteils, können dadurch Spannungen im Die entstehen, die im ungünstigsten Fall zu Rissen führen.

Um diese Spannungen zu begrenzen, werden Verbindungsmaterialien mit einer gewissen Elastizität eingesetzt, die kleine Ausdehnungsunterschiede kompensieren können, ohne dass die Verbindung selbst oder der Die beschädigt wird. Zudem wird die Schichtdicke des Verbindungsmaterials sorgfältig kontrolliert: Eine zu dünne Schicht bietet zu wenig Ausgleichsvermögen, eine zu dicke Schicht kann wiederum die thermische Anbindung verschlechtern.

Nach dem Aushärten des Verbindungsmaterials wird die Qualität der Die-Attach-Verbindung überprüft, unter anderem durch optische Inspektion auf Lunker (Hohlräume im Verbindungsmaterial) sowie durch Scherfestigkeitstests, bei denen die mechanische Haftung des Dies stichprobenartig geprüft wird. Erst nach erfolgreicher Prüfung wird der Die dem nächsten Prozessschritt, dem Bonding, zugeführt.

Bonding

Elektrische Kontaktierung des Dies

Nachdem der Die durch das Die Attach mechanisch auf dem Substrat befestigt wurde, muss er noch elektrisch mit den Anschlussstrukturen des Substrats verbunden werden. Dieser Vorgang wird als Bonding bezeichnet. Die elektrische Kontaktierung geschieht dabei zu etwa 90 % mittels Draht-Bonden (Wire Bonding), während die mechanische Befestigung des Chips – wie im vorherigen Kapitel beschrieben – hauptsächlich durch Kleben mit Epoxidharzen erfolgt.

Beim Draht-Bonden werden dünne Drähte aus Gold oder Aluminium verwendet, die mit den Anschlusskontakten (Pads) von Chip und Substrat kalt verschweißt werden. Man unterscheidet dabei drei gängige Verfahren:

- Thermosonic-Ball-Wedge-Bonden
- Ultraschall-Wedge-Wedge-Bonden
- Thermokompressions-Ball-Wedge-Bonden

Bei allen drei Verfahren entsteht am Ende des Drahtes zunächst eine kleine Kugel (Ball), die durch lokales Aufschmelzen der Drahtspitze erzeugt wird. Aufgrund der starken Oberflächenkräfte des flüssigen Goldes erstarrt die Schmelze zu einer Kugel, deren größerer Durchmesser gegenüber dem Bonddraht eine zuverlässigere mechanische und elektrische Verbindung gewährleistet.

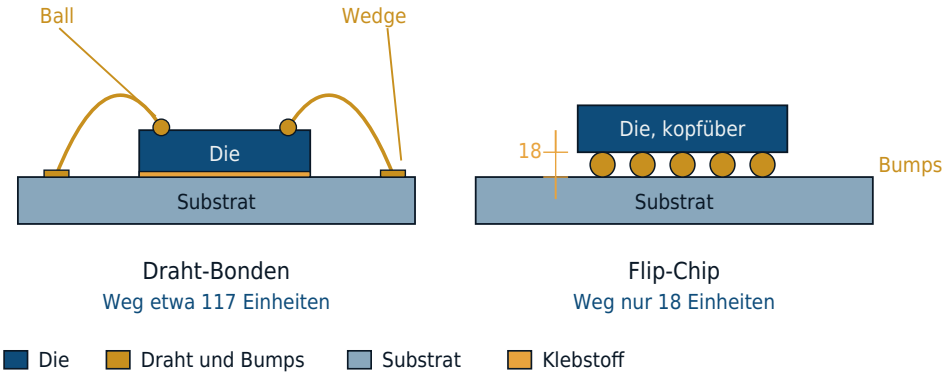
Flip-Chip-Technik

Neben dem klassischen Draht-Bonden existiert mit der Flip-Chip-Technik ein alternatives Verfahren, das ganz ohne lange Bonddrähte auskommt und die kompakteste Form der Verbindung zwischen Chip und Substrat darstellt.

Um eine Flip-Chip-Verbindung herstellen zu können, müssen auf dem Chip und/oder auf dem Substrat kleine Lothöcker, sogenannte Bumps, vorhanden sein. Zur Herstellung der Verbindung wird der Chip kopfüber, aber sehr passgenau auf das Substrat aufgesetzt. Während eines anschließenden Reflow-Prozesses schmelzen die Bumps auf und verbinden Chip und Substrat gleichzeitig mechanisch und elektrisch.

Draht-Bonden und Flip-Chip

Die Länge des Verbindungswegs entscheidet über Induktivität und Wärme



Der Bonddraht ist rund 6-mal so lang wie der Weg über einen Bump. Kurze Wege bedeuten weniger parasitäre Induktivität und eine bessere Wärmeableitung – beides spricht für die Flip-Chip-Technik.

Der wesentliche Vorteil der Flip-Chip-Technik liegt in den sehr kurzen Verbindungswegen vom Chip zum Substrat über die Lötkügelchen – im Gegensatz zu den vergleichsweise langen Wire Bonds beim klassischen Draht-Bonden. Dies reduziert parasitäre Induktivitäten und Kapazitäten in der Verbindung, was bei sehr hohen Signalfrequenzen elektrisch von Vorteil ist.

Da beim Flip-Chip-Verfahren zwischen Chip und Substrat üblicherweise ein Luftspalt verbleibt, ist es meist erforderlich, zusätzlich einen sogenannten Underfiller einzubringen. Dieser füllt den verbleibenden Spalt zwischen Chip und Substrat und gleicht mechanische Spannungen aus, die durch unterschiedliche Wärmeausdehnungskoeffizienten der beiden Materialien entstehen.

Anforderungen und Wärmeableitung

Unabhängig vom gewählten Bonding-Verfahren müssen die elektrischen Verbindungen zwischen Chip und Substrat eine Reihe grundlegender Anforderungen erfüllen: geringer elektrischer Widerstand, hohe Zuverlässigkeit über die gesamte Lebensdauer des Bauteils sowie eine gute mechanische Haftung auch unter thermischer Wechselbelastung.

Ein zunehmend wichtiger Aspekt beim Bonding ist die Wärmeableitung. Mit steigender Verlustleistung moderner Chips wird die Abfuhr der entstehenden Wärme zu einem sehr wichtigen Punkt der gesamten Aufbau- und

Verbindungstechnik. Kurze Leitungswege und Materialien mit guter Wärmeleitfähigkeit sind hierfür unabdingbar. Genau in diesem Punkt bietet die Flip-Chip-Technik gegenüber dem klassischen Draht-Bonden Vorteile, da die kurzen Verbindungswege über die Bumps auch für die Wärmeableitung günstiger sind als lange Bonddrähte.

Nach Abschluss des Bonding-Vorgangs ist der Chip elektrisch vollständig mit seinem Substrat verbunden. Der nächste Schritt in der Montage besteht darin, diese empfindliche Verbindung sowie den Die selbst durch eine geeignete Verkapselung vor äußeren Einflüssen zu schützen.

Verkapselung

Aufgaben der Verkapselung

Nach dem Bonding ist der Die elektrisch vollständig mit seinem Substrat verbunden, liegt jedoch noch offen und ungeschützt vor. Im letzten wesentlichen Schritt der Montage wird der Die deshalb in eine schützende Vergussmasse eingebettet – diesen Vorgang bezeichnet man als Verkapselung oder Molding.

Die Verkapselung als Teil des gesamten Packaging-Prozesses erfüllt dabei mehrere grundlegende Aufgaben:

- Schutz der Schaltung vor äußeren Einflüssen wie Feuchtigkeit, Staub und mechanischer Beschädigung
- Führung der empfindlichen Kontakte auf dem Chip in robuste, handhabbare Anschlüsse nach außen
- Versorgung der Schaltung mit elektrischer Energie über die Gehäuseanschlüsse
- Abfuhr der im Betrieb entstehenden Verlustleistung
- Verteilung von Signalen und Daten zwischen Chip und umgebender Schaltung

Der Trend in der Gehäusetechnik geht dabei zu immer kleineren und dünneren Gehäusen (Chip Size Package, CSP), bei denen das fertige Gehäuse in Länge und Breite nur noch unwesentlich größer ist als der eigentliche Chip, typischerweise um einen Faktor von etwa 1,2.

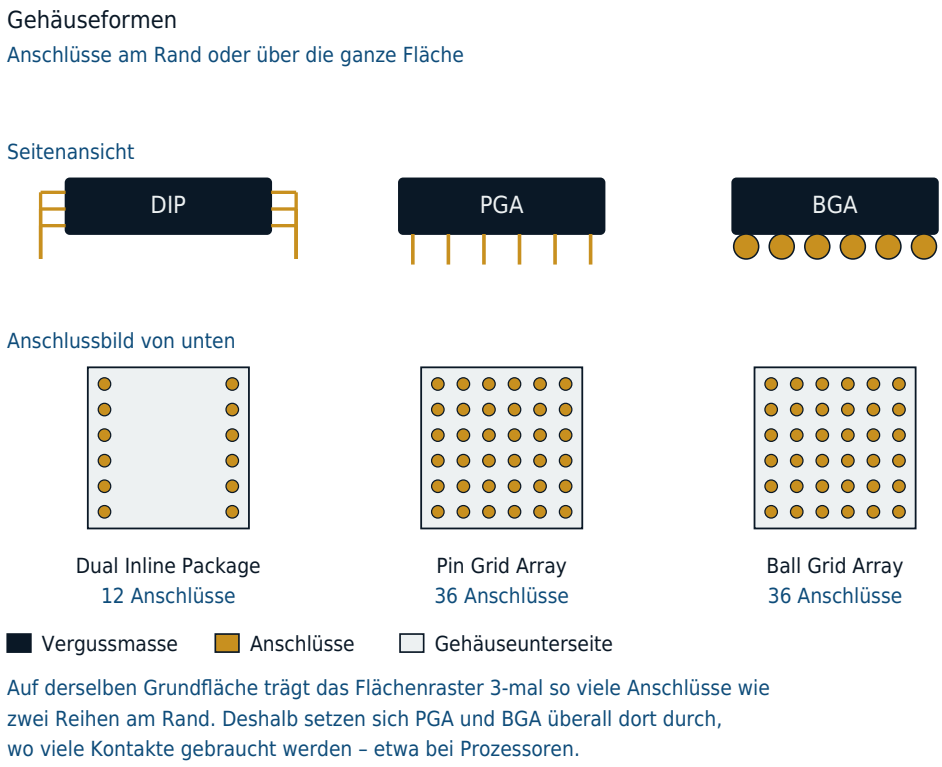
Materialien und Verfahren

Am weitesten verbreitet ist das sogenannte Molding, bei dem der Die zusammen mit den Bonddrähten oder Bumps in eine duroplastische Kunststoffmasse

eingespritzt wird. Diese Vergussmasse härtet unter Hitzeeinwirkung aus und bildet danach das eigentliche, feste Gehäuse des Bauteils.

Bekannte Gehäuseformen, die auf diesem Weg hergestellt werden, sind beispielsweise:

- DIP – Dual Inline Package
- PGA – Pin Grid Array, vor allem bei Prozessoren gebräuchlich
- BGA – Ball Grid Array



Bei Bauteilen mit besonders hohen Anforderungen an die Wärmeableitung, etwa bei Leistungshalbleitern, kommen statt Kunststoffen auch Gehäuse aus gut wärmeleitenden Materialien wie Metall oder Keramik zum Einsatz. Diese Materialien sind jedoch deutlich teurer als Kunststoff, weshalb in der Massenfertigung überwiegend auf Kunststoffgehäuse zurückgegriffen wird.

Bei der zuvor beschriebenen Flip-Chip-Technik entfällt ein klassisches Vollgehäuse häufig vollständig: Hier übernimmt der bereits im Bonding-Schritt eingebrachte Underfiller einen Teil der Schutzfunktion, während der Chip selbst offen auf dem Substrat verbleibt.

Wärmeableitung und abschließende Qualitätsprüfung

Da die Verlustleistung moderner Chips stetig zunimmt, ist die Wärmeableitung

einer der wichtigsten Aspekte bei der Wahl von Gehäuseform und Vergussmaterial. Kurze Leitungswege sowie Materialien mit guter Wärmeleitfähigkeit sind hierfür unabdingbar. Bei besonders leistungsstarken Bauteilen werden deshalb häufig zusätzliche Maßnahmen zur Wärmeableitung in das Gehäusedesign integriert, etwa freiliegende Metallflächen an der Gehäuseunterseite (Exposed Die Pad) oder spezielle Wärmeleitpfade innerhalb des Substrats.

Nach dem Aushärten der Vergussmasse wird das Gehäuse mit einer eindeutigen Kennzeichnung versehen (Marking), üblicherweise durch Laserbeschriftung, die unter anderem Herstellerangaben, Typenbezeichnung und gegebenenfalls das Ergebnis des vorangegangenen Binnings trägt.

Damit ist die eigentliche Montage abgeschlossen. Der fertig verkapselte Chip durchläuft im Anschluss noch den bereits beschriebenen finalen Funktionstest, bevor er für den Versand an Gerätehersteller verpackt wird.