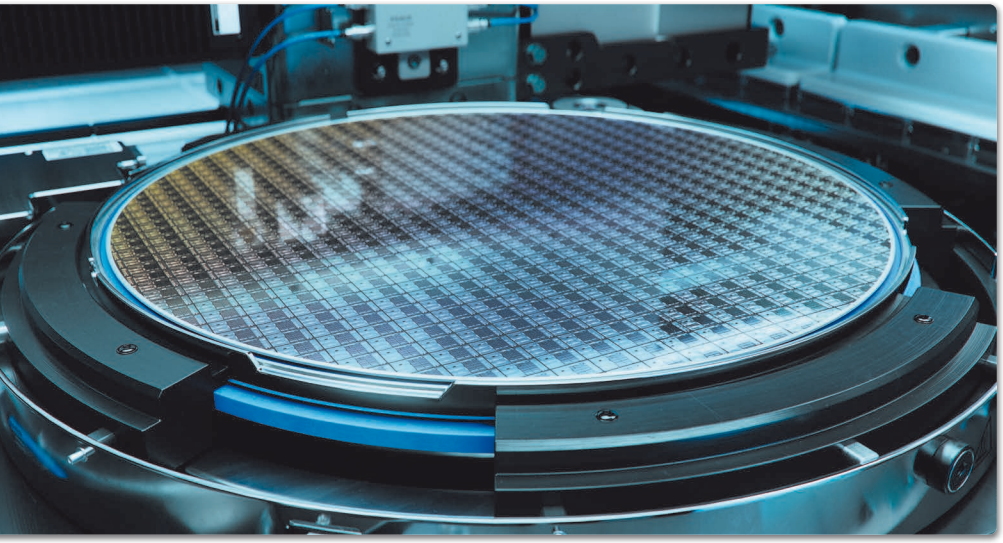
Präzision unter Druck:

Qualitätssicherung in einer globalisierten und miniaturisierten Halbleiterindustrie

Wie dezentrale Fertigungsstrukturen und Miniaturisierung die Anforderungen an die Sensorik verändern



Die Halbleiterfertigung wird zunehmend komplexer, weil die Miniaturisierung weiter voranschreitet, neue Materialien zum Einsatz kommen und Montage- sowie Packaging-Technologien immer anspruchsvoller werden. Bilder © Kistler Gruppe

Der Schwerpunkt dieses Artikels liegt auf zwei maßgebliche Fertigungsschritten, in denen fortschrittliche Messtechnik eine entscheidende Rolle spielt: dem chemisch-mechanischen Polieren (CMP) zur präzisen Planarisierung sowie dem Wafer-Probe-Test zur Überprüfung der elektrischen Funktionalität. Für beide Anwendungen bietet die piezoelektrische Messtechnik, wie sie beispielsweise von Kistler angeboten wird, eine leistungsstarke Lösung.

Background

Die Halbleiterindustrie ist das Rückgrat der modernen Technologie. Da Chips auf atomare Größen schrumpfen und Lieferketten immer komplexer werden, wird es weltweit schwieriger denn je, gleichbleibend hohe Qualität zu sichern. Nur modernste Prozessüberwachungs- und Messtechnologien können die mechanische und elektrische Leistungsfähigkeit gewährleisten, die zeitgemäße Anwendungen inzwischen benötigen.

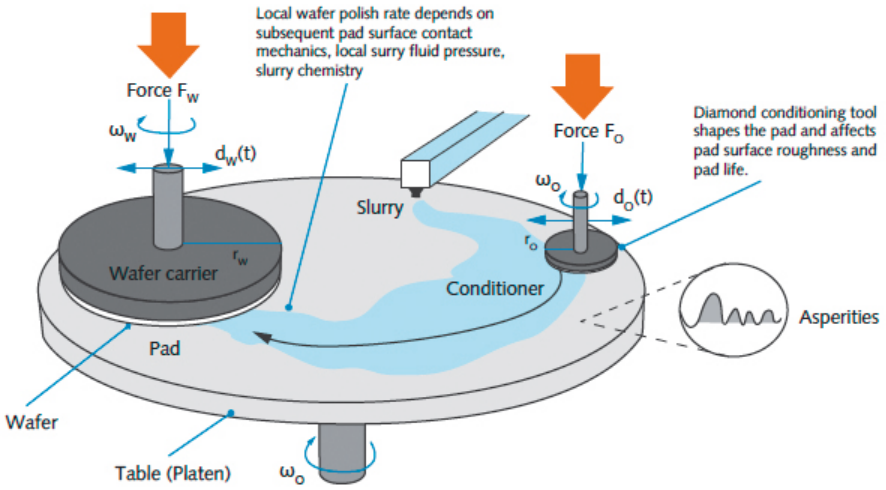
Die moderne Halbleiterfertigung ist heute weitestgehend dezentral organisiert. Wafer durchlaufen häufig mehrere Fertigungsstandorte, Länder und spezialisierte Zulieferer, bevor sie zu fertigen Bauelementen werden. In einer derart fragmentierten Produktionsumgebung können Defekte, die während eines einzelnen Prozessschritts entstehen, bis weit in der Wertschöpfungskette hinein unentdeckt bleiben. Dies führt zu erheblich höheren Kosten und einer niedrigeren Produktionsausbeute.

Eine zuverlässige Inline-Prozessüberwachung und Qualitätssicherung ist daher über den gesamten Halbleiterfertigungsprozess hinweg unerlässlich.

Gleichzeitig treibt die Branche die Miniaturisierung immer weiter voran. Nach fünf Jahrzehnten kontinuierlicher Skalierung werden modernste Halbleiterbauelemente heute mit Strukturgrößen von unter 7 nm gefertigt, was u.a. durch die EUV-Lithografie ermöglicht wird. Je kleiner, leistungsfähiger und energieeffizienter Bauelemente werden sollen, desto stärker stoßen Hersteller jedoch an neue technische und physikalische Grenzen – vor allem, wenn jeder einzelne Prozessschritt präzise und zuverlässig ablaufen muss.

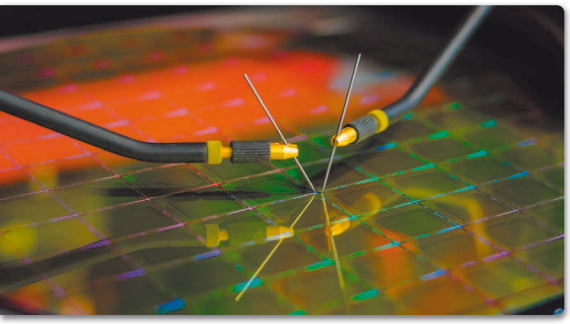
Schonend verarbeiten: Wo Qualität auf Komplexität trifft

Jeder Wafer durchläuft Dutzende von Bearbeitungs- und Prozessschritten, die jeweils mechanische Spannungen und latente Defekte verursachen können. Selbst wenn die Krafteinwirkung während des Kontaktierens, Bondens oder der Verkapselung nur geringfügig variiert, kann dies zu Mikrorissen führen. Diese Risiken nehmen zu, je kleiner und empfindlicher die Bauteile werden. Herkömmliche Messsysteme wie DMS-basierte Kraftsensoren, kapazitive Sensoren und LVDT-Wegsensoren können diese äußerst geringen Kräfte kaum mehr messen oder die rasante Dynamik moderner Halbleiterfertigungsprozesse erfassen.



Die Überwachung der piezoelektrischen Kraft beim CMP ermöglicht höhere Präzision in der Fertigung.

Autor:
Robert Hillinger
Business Development Manager Semiconductor
Kistler Group
info@kistler.com
www.kistler.com



Beim Wafer-Probing wird die elektrische Funktionsfähigkeit jedes einzelnen Chips durch Kontaktierung winziger Bondpads überprüft.

Vielmehr bedarf es dazu hochpräzise Messlösungen in Echtzeit: Die piezoelektrischen Sensoren (PE-Sensoren) von Kistler liefern mit ihrer hohen Empfindlichkeit, hohen Dynamik und nahtlosen Integration die notwendige Präzision, um die Qualität in einer globalisierten und miniaturisierten Industrie zu sichern.

Präzision in Bewegung: Piezoelektrische Kraftüberwachung beim CMP-Polieren

Die chemisch-mechanische Planarisierung (CMP) ist ein Schlüsselprozess, der dafür sorgt, dass jede neue Schicht in einem Halbleiterstapel auf einer perfekt ebenen Oberfläche aufgebracht wird. Nach Metall- oder Dielektrikumsschichten werden die Wafer mit einem rotierenden Polierkissen und einer chemischen Poliersuspension, die Schleifpartikel enthält, poliert. Dieser Schritt entfernt überschüssiges Material und topografische Unebenheiten, was für die Mustertreue und eine zuverlässige elektrische Leistung von entscheidender Bedeutung ist.

Allerdings reagiert das CMP-Verfahren äußerst empfindlich auf die Druckverteilung. Zu viel Kraft führt zu Überpolieren oder Dishing, während zu wenig Kraft zu Rückständen und unebenen Oberflächen führen kann. Selbst geringfügige Schwankungen in der Reibung zwischen Polierkissen und Wafer – sogenannte Stick-Slip-Effekte – können zu Defekten oder Schwankungen in der Schichtdicke über den Wafer hinweg führen.

Piezoelektrische Sensoren bieten hierfür eine hochwirksame Lösung, indem sie die Kräfte an der Polierschnittstelle in Echtzeit mit sehr hoher Kraftauflösung und dynamisch messen.

In den Polierkopf oder das Konditionierungssystem integriert, erfassen sie sowohl axiale als auch laterale Kräfte. Damit lassen sich Anpresskraft und Zonendruck dynamisch regeln und der Polierkopf perfekt ausrichten. Die piezoelektrischen Sensoren erkennen Anomalien wie den Stick-Slip-Effekt, Pad-Verschleiß oder Probleme mit der Poliersuspension. So können Hersteller den Prozess unmittelbar korrigieren, einen gleichmäßigen Materialabtrag sicherstellen und die Wafer-zu-Wafer-Uniformität verbessern. So tragen piezoelektrische Sensoren dazu bei, kostspielige Nacharbeit und Oberflächenschäden zu vermeiden.

Wafer-Prüfung: Fehler erkennen, bevor sie immer größer werden

Dieser Schritt erfolgt nach der Frontend-Bearbeitung, jedoch bevor die Chips getrennt, verpackt und in Endsysteme integriert werden. Mithilfe mikroskopisch kleiner Prüfspitzen testen Ingenieure die elektrische Leistungsfähigkeit jedes einzelnen Dies, indem sie Kontakt mit den winzigen Bondpads herstellen. Dieser Prozess stellt die elektrische Funktion sicher, erkennt latente Defekte und sorgt dafür, dass nur funktionsfähige Chips in den nächsten Fertigungsschritt gelangen.

Der Probing-Prozess ist sowohl mechanisch als auch elektrisch hochkomplex. Jede Prüfspitze muss mit einer Genauigkeit im Submikrometerbereich auf einem winzigen Bondpad aufsetzen, das häufig nur 50 µm breit ist. Beim Kontaktieren übt die Prüfspitze sowohl Kompression (durch vertikale Kraft) als auch Reibung (durch seitliche Bewegung) aus, wodurch Normalkraft und Scherspannung im Bondpad und den darunterliegenden Strukturen entstehen. Werden kritische Grenzwerte überschritten, können Mikrorisse entstehen, die Metallschichten (beispielsweise Kupfer oder Nickel) freilegen und letztlich zu Bondfehlern führen.

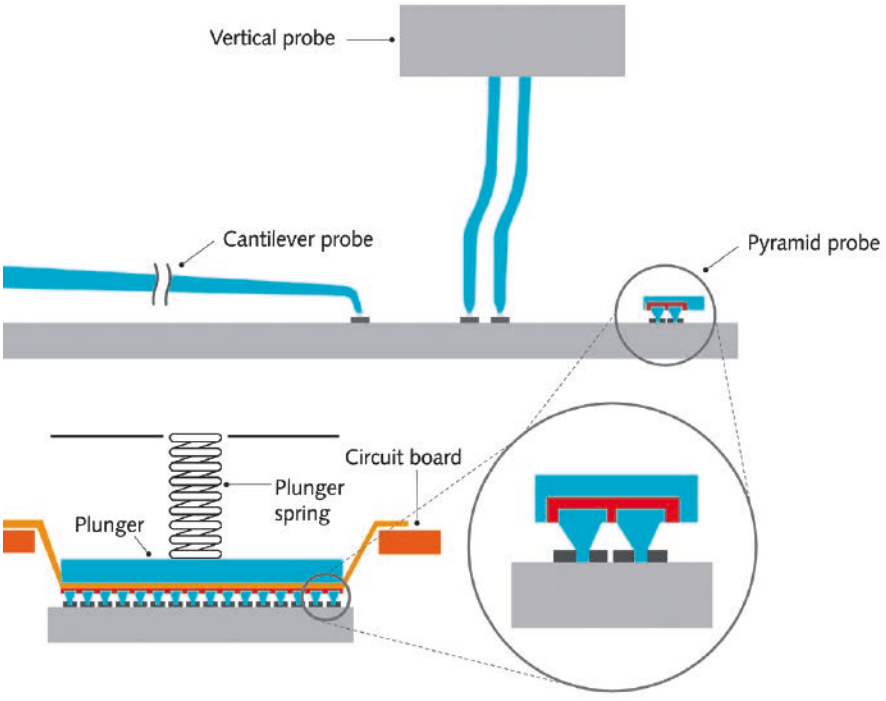
Um derartige Schäden zu vermeiden, muss die Kontaktkraft insbesondere während des initialen Aufsetzens (Touchdown) sorgfältig kontrolliert werden. Hier bieten piezoelektrische Kraftsensoren, wie sie von Kistler entwickelt werden, einen entscheidenden Vorteil. In das Tastkopf-System oder die Spannvorrichtung integriert, messen diese Sensoren bei jedem Aufsetzen sowohl vertikale als auch Scherkräfte in Echtzeit. Je nach Sensorkonfiguration lassen sich mit Bandbreiten von bis zu 10 kHz und eine sehr hohe Kraftauflösung transiente Effekten wie Tastkopf-Prellen und -Schrubben erkennen.

Multiaxiale Messungen (Fx, Fy und Fz) erfassen die Kräfte in allen drei Raumrichtungen – vertikal und lateral – und liefern damit Einblicke in Scherspannungen, die maßgeblich zu Dielektrikausfällen beitragen. So können Ingenieure Parameter wie Überlast, Aufsatzkraft und Reinigungszyklen präzise anpassen. Dadurch werden mechanische Schäden minimiert und Prozesse genau dort stabilisiert, wo es am wichtigsten ist: am Pad. Darüber hinaus trägt die frühzeitige Erkennung von Defekten in dieser Phase dazu bei, kostspielige Fehler im weiteren Verlauf des Prozesses zu vermeiden.

Fazit

Mit der zunehmenden Komplexität von Halbleiterarchitekturen und global verteilten Lieferketten wird die Prozesskontrolle in der Halbleiterfertigung wichtiger denn je. Die hochauflösende Kraftmessung liefert dabei wertvolle Einblicke in zentrale Fertigungsschritte und ermöglicht eine höhere Produktionsausbeute, verbesserte Zuverlässigkeit und eine gleichmäßigere Produktqualität. Produktionsschritte wie CMP und Wafer-Probing sowie fortschrittliche piezoelektrische Sensortechnologien helfen den Herstellern, die Präzision unter dem wachsenden Druck aufrechtzuerhalten.

Weitere technische Details zum piezoelektrischen Effekt und seinen vielfältigen Anwendungen in der Halbleiterfertigung bietet ein kostenfreies Whitepaper von Kistler. https://info.kistler.com/de-semiconductor-white-paper-registration ◄



Im Prüfprozess kommen verschiedene Arten von Sonden zum Einsatz.