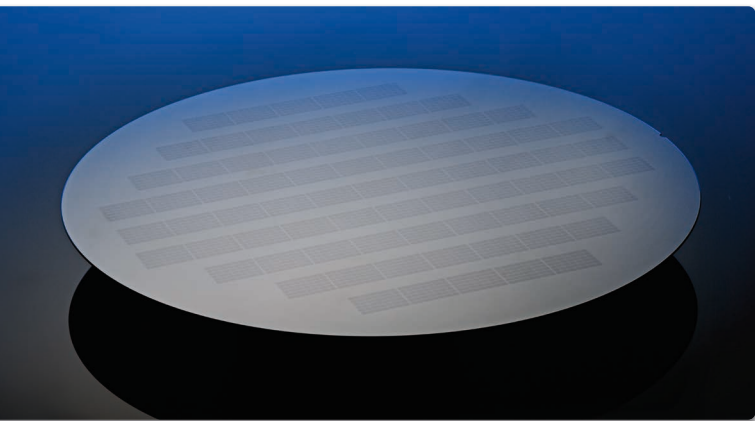


Technologie und Transformation

Trends, Strategien und Laserverfahren in der Elektronik und Mikroelektronik

Dr. Christian Vedder spricht mit *electronic fab* über Anforderungen, Innovationen und deren Anwendung in der Industrie.



Die selektive Laserkristallisation einer Siliziumschicht auf einem Wafer mit elektrischen Schaltkreisen ermöglicht die integrierte Herstellung von MEMS-Beschleunigungssensoren.

Bilder © Fraunhofer ILT, Aachen

Megatrends wie Digitalisierung, Elektromobilität und Künstliche Intelligenz bewegen auch die Elektronik- & Mikroelektronikbranche. Dr. Christian Vedder, Leiter der Abteilung Oberflächentechnik und Formabtrag am Fraunhofer-Institut für Lasertechnik ILT, beleuchtet in diesem Interview die aktuellen Entwicklungen und Herausforderungen der Branche. Er erklärt, dass innovative Laserverfahren in der Mikroelektronikfertigung eine immer wichtigere Rolle spielen, sowohl um wettbewerbsfähig zu bleiben als auch den steigenden Anforderungen gerecht zu werden.

Dr. Vedder, welche Trends sehen Sie als besonders richtungsweisend?

Die Mikroelektronik befindet sich derzeit in einer Phase tiefgreifender Transformation, getrieben durch globale Megatrends wie Digitalisierung, Elektromobilität, Künstliche Intelligenz und Quantentechnologie. Diese Entwicklungen führen zu einem rasant steigenden Bedarf an leistungsfähigeren, kompakteren und gleichzeitig energieeffizienteren Bauelementen. Besonders richtungsweisend sind aktuell Technologien wie Advanced Packaging, Chiplet-

Architekturen und 3D-Integration, die eine höhere Funktionalitätsdichte bei gleichzeitig verbesserter thermischer Performance ermöglichen. Auch die Nachfrage nach Halbleitern aus Wide-Band-gap-Materialien wie SiC und GaN nimmt deutlich zu. Parallel dazu gewinnt die nachhaltige Produktion an Relevanz.

Welche Rolle spielt dabei das Fraunhofer ILT?

Unsere Stärke liegt darin, Lasertechnologien für die Fertigung von Mikroelektronik weiterzuentwickeln und praxistauglich zu machen. Wir arbeiten eng mit Partnern aus Industrie und Forschung zusammen und bringen neue Verfahren zur Marktreife. Dabei legen wir großen Wert auf ressourcenschonende, präzise und flexible Lösungen.

Miniaturisierung ist ein zentraler Trend, wo sehen Sie hier die größten Herausforderungen?

Miniaturisierung bringt die etablierten Fertigungsprozesse zunehmend an ihre physikalischen und wirtschaftlichen Grenzen. Auf technischer Ebene stellt vor allem die steigende Packungsdichte enorme Anforderungen an Thermomanage-

ment, Signal- und Leistungsintegrität sowie an die Präzision in der Verbindungstechnik. Gleichzeitig verschiebt sich die Komplexität in Richtung Packaging und Systemintegration. Für die Industrie bedeutet das, dass klassische Skaleneffekte durch neue Materialien, heterogene Integration und 3D-Strukturen ersetzt werden müssen, mit hohen Investitionen in Know-how und Equipment. Für viele Unternehmen wird es immer wichtiger, alternative Technologien wie Laserverfahren zu nutzen.

Welche technischen Grenzen müssen überwunden werden für noch kleinere und leistungsfähigere Chips?

Die größte Herausforderung liegt in der weiteren Skalierung unterhalb von 3 nm – hier stoßen klassische Transistorarchitekturen an physikalische und wirtschaftliche Limits. Neue Ansätze wie Gate-All-Around-FETs, neue Materialien, wie 2D-Halbleiter, oder Backend-Integration rücken in den Fokus. Gleichzeitig wird die horizontale Miniaturisierung zunehmend durch vertikale Integration ergänzt, etwa durch 3D-Chipstacks und Advanced Packaging.

Wie verändert der steigende Bedarf an energieeffizienten Lösungen den Markt?

Der Energiebedarf von Chips wird zum entscheidenden Kriterium – nicht nur für mobile Geräte, sondern auch für Rechenzentren und KI-Anwendungen. Dadurch gewinnen neue Architekturen, Materialien und eben auch neue Fertigungsprozesse an Bedeutung. Lasertechnologien helfen hier, weil sie gezielt einzelne Funktionsbereiche bearbeiten und sowohl Energieverluste in der Produktion minimieren als auch die Energieeffizienz im späteren Betrieb steigern können.

In welchen Bereichen werden Lasertechnologien besonders intensiv genutzt?

Dort, wo Präzision, Materialvielfalt und Prozessflexibilität gefragt sind, z.B. in der Strukturierung und Trennung von Wafern, beim Halbleiter-Annealing oder -kristallisieren, beim Advanced Packaging – etwa für Through-Silicon oder Through-Glas Vias oder das Laser(de)bonding – sowie in der Mikromaterialbearbeitung für Substrate und Leiterbahnen. Auch bei flexibler Elektronik und additiver Fertigung spielen Laserverfahren eine wichtige Rolle.

Wie trägt das Fraunhofer ILT dazu bei, neue Fertigungsprozesse zu ermöglichen?

Neben Lasermaterial-Bearbeitungsverfahren entwickeln wir die notwendige Lasersystemtechnik – von den optischen Systemen über die Prozesssensorik bis hin zur Anlagenintegration inklusive Steuerung. Dabei haben wir immer die industrielle Nutzung im Blick und erarbeiten so Prototypenanlagen oder auch -bestandteile, die eine Pilotisierung ermöglichen.



Dr. Christian Vedder, Leiter der Abteilung Oberflächentechnik und Formabtrag am Fraunhofer-Institut für Lasertechnik ILT



Laser-Impuls-Schmelzbonden (LIMBO) ermöglicht das schädigungsfreie Fügen von dicken Kupferverbindern an dünnen Metallisierungen auf sensiblen Substraten in der Elektromobilität und Hochleistungselektronik.

Welche Vorteile bieten laserbasierte Verfahren?

Laser ermöglichen es, Materialien digital punktgenau zu bearbeiten – auch ohne Masken, ohne chemische Ätzprozesse und – durch Einsatz von Ultrakurzpulslasern – mit sehr wenig thermischem Stress.

Durch ihre hohe zeitliche und örtliche Fokussierbarkeit lassen sich auch in sonst transparenten Materialien Bearbeitungen durchführen; dies ermöglicht u.a. fortschrittliche, hochsaubere Wafer-trenn- mittels LLO oder Schicht- bzw. Mikrobauerteilübertragungsverfahren mittels LIFT.

Ebenso lassen sich Silizium-Schichten direkt auf elektrischen Schaltkreisen laserkristallisieren, um monolithische MEMS-Sensoren zu ermöglichen.

Welche Rolle spielen Laser beim kontaktlosen Fügen und in der Aufbau- und Verbindungstechnik?

Eine große Rolle dort, wo klassische Verfahren an ihre Grenzen stoßen – zum Beispiel bei temperaturempfindlichen oder dünnen Substraten oder sehr kleinen Bauteilen. Laserschweißen oder -löten ist hochpräzise, schnell und lässt sich gut automatisieren.

In der Aufbau- und Verbindungstechnik setzen wir dabei auf Verfahren wie das Mikroschweißen LIMBO, mit dem sich dicke Kupferverbindungen auf empfindlichen Substraten fügen lassen.

Mittels Digitaldruck- und Laserfunktionalisierung lassen sich metallische Interfaces für Mikroschweiß-, Löt- oder Steckverbindungen herstellen.

Welche Potenziale sehen Sie in der additiven Fertigung für die Integration von Sensorik in elektronische Bauteile?

Komplexe Strukturen in einem einzigen Schritt herzustellen – und dabei gezielt Funktionselemente wie Sensoren, Heizer- oder Leiterbahnen direkt zu integrieren. Das spart Platz, reduziert Gewicht und vereinfacht die Montage. Darüber hinaus können Sensoren an Orten platziert werden, die vorher nicht denkbar gewesen wären, unmittelbar an der Wirkzone.

Besonders spannend ist das für Anwendungen im Leichtbau, in der Medizintechnik oder bei Wearables.

Inwiefern ermöglichen Laserverfahren eine präzisere oder ressourcenschonendere Fertigung?

Lasergestützte, additive Verfahren fügen nur dort Material zu, wo es wirklich nötig ist – das macht die Verfahren im ersten Schritt materialeffizienter. Die Kombination neuer Tief-UV-Laserstrahlquellen mit angepassten optischen Systemen ermöglicht eine immer genauere und energieeffizientere Strukturierung. Außerdem entfällt oft der Einsatz von Chemikalien.

Welche Anwendungen von gedruckter Elektronik sind besonders vielversprechend?

Besonders spannend finde ich smarte Maschinenbauteile, die ein besseres Verständnis der Belastungsszenarios von Komponenten zulassen und im besten Falle sogar die Möglichkeit zur Maschinenanpassung zu geben, um

energieeffizientere Arbeitspunkte zu ermöglichen oder kritische zu vermeiden. Auch gedruckte Sensoren auf flexiblen Trägermaterialien – etwa für smarte Textilien oder medizinische Anwendungen sind interessant, um personalisierte medizintechnische Unterstützung im Alltag zu ermöglichen.

Bei der Herstellung von OLEDs, effizienteren Solarzellen oder Dünnschicht-Brennstoffzellen oder -elektrolyseuren für die Energiewende bieten gedruckte Schichten aus neuen Materialien in Kombination mit Laserverfahren ebenso Vorteile.

Welche Anwendungsmöglichkeiten haben laserbasiertes Glasfritbünden und Mikroschweißen?

Beide Verfahren ermöglichen sehr präzise, lokal begrenzte Fügeverbindungen – bei minimaler thermischer Belastung.

Das Glasfritbünden eignet sich ideal für das hermetische Verschließen empfindlicher Mikrosysteme, wie sie etwa in der Sensorik oder Medizintechnik gebraucht werden. Beim Mikroschweißen lassen sich sehr feine metallische Verbindungen erzeugen, etwa für Kontakte auf dünnen Drähten oder filigranen Strukturen in der Leistungselektronik. Diese Verfahren schaffen neue Möglichkeiten, miniaturisierte und gleichzeitig robuste Baugruppen herzustellen.

Welche Bedeutung hat extreme ultraviolette Strahlung?

High-NA-EUV ist essentiell für die heutige Chip-Herstellung mit Strukturgrößen unterhalb von

3 nm. Durch die sehr kurze Wellenlänge und die große Apertur lassen sich viel feinere Details abbilden als zuvor. Durch die sehr kurze Wellenlänge lassen sich viel feinere Details abbilden als mit längerwelligem Licht.

Wie wird Lasertechnologie die Mikroelektronik in den nächsten Jahren verändern?

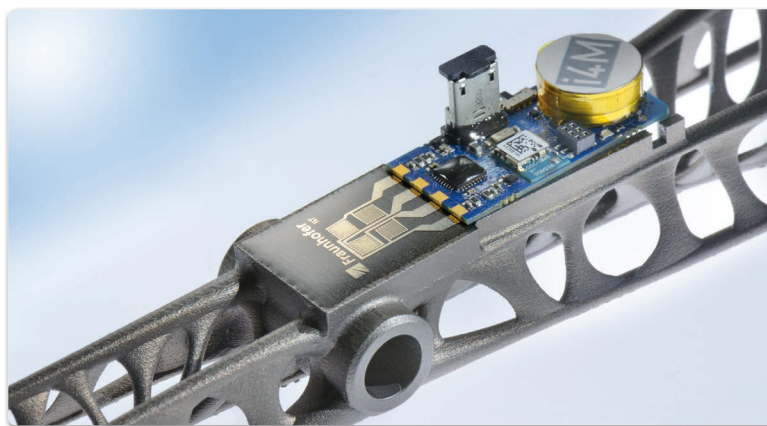
Laserverfahren werden zukünftig eine Schlüsselrolle in weiteren, neuen Fertigungsprozessen einnehmen, wie in der Heterointegration oder der Bearbeitung neuer Materialkombinationen. Wir werden deutlich flexiblere und individuellere Produktionsprozesse sehen.

Laser ermöglichen es, sehr schnell auf neue Designs und Materialien zu reagieren; sie werden in Kombination mit KI-gestützten Material-, Bauteil- und Prozessentwicklungen herkömmliche Prozess- und Produktansätze maßgeblich verändern. Gleichzeitig trägt der Laser dazu bei, Ressourcen zu sparen und Prozesse nachhaltiger zu gestalten.

Was empfehlen Sie Unternehmen, die neue Laserprozesse in ihre Fertigung integrieren wollen?

Frühzeitig testen, im kleinen Maßstab starten und offen für neue Denkweisen bleiben.

Wer Lasertechnologien sinnvoll einsetzen will, muss oft bestehende Prozesse und Prozessketten überdenken – das ist manchmal unbequem, lohnt sich aber fast immer. Wir unterstützen Unternehmen beim Einstieg bis zur Serienreife. www.ilt.fraunhofer.de ◀



Direktdruck: Das Fraunhofer ILT zeigt einen Dehnungsmesssensor, der sich dank der Kombination von Druck- und Lasertechnik direkt und automatisierbar auf dem Bauteil aufbringen lässt.