

Laser als Innovationstreiber in der 5G-Kommunikation

Unser Kommunikationszeitalter steht mit der breiten Einführung der 5G-Infrastruktur vor einem Umbruch. Der Laser als Präzisionswerkzeug löst zunehmend mechanische und chemische Produktionstechnologien ab. Vor allem die Excimer-Laser mit ihrer Kombination aus kürzester Wellenlänge und höchster UV-Leistung, sowie die neueste Generation von Picosekundenlasern mit Echtzeit-Pulskontrolle spielen eine führende Rolle in der Erzeugung der für die 5G-Revolution dringend benötigten mikroelektronischen Komponenten.

Keywords: Laser, Excimerlaser, Excimerlaserstrahl, Picosekundenlaser, Mikroelektronik, 5G-Drahtloskommunikation, Dual-Damascene-Processes, Festkörperlaser, 5G-Mobilgeräte

Die steigende Nachfrage nach immer kleineren und leichteren elektronischen Geräten mit immer schnellerer und leistungsfähigerer Informationsverarbeitung bestimmt die Dynamik in fast allen Segmenten der Mikroelektronikindustrie: Vom schnell wachsenden Markt der 5G-Mobilgeräte bis hin zu medizinischen Sensoren. Essentiell hierbei ist die Advanced Package Integration (API) als einer der wichtigsten Technologietreiber. Allen Packaging-Architekturen gemein ist die extrem hohe Dichte der elektrischen

Kontaktierungen, welche eine maximale Geschwindigkeit und Funktionalität gewährleisten. In dem Maße, wie sich das Chip-Packaging weiter in Richtung Fan-Out-Architekturen entwickelt, werden zunehmend Multi-Chip-Packages mit komplizierten und gleichzeitig zuverlässigen Designs benötigt.

Die höheren Frequenzen von bis zu fünf Gigahertz und eine zunehmende Bandbreite bis in den Gigahertzbereich bei der 5G-Drahtloskommunikation, erfordern darüber hinaus

Laserbearbeitung

Mobilgeräte mit den entsprechenden Antennen-Strukturen in geeigneten Hochleistungs-Materialschichten. Der Laser als hochpräzises Strukturierungswerkzeug wird in solchen Anwendungen einmal mehr seiner Rolle als Innovationstreiber in der Mikroelektronik gerecht.

Excimerlaser-Direktstrukturierung für das Advanced-Packaging

Die Leistungs- und damit die Durchsatzskalierbarkeit des besonders kurzwelligen Excimerlasers (Wellenlänge 248 nm oder 308 nm) bietet für waferbasierte Strukturierungsaufgaben im Bereich des Advanced-Chip-Packaging entscheidende Vorteile. Im Waferprozess werden die Leiterbahnen und Kontaktlöcher (Vias) derzeit noch fotolithografisch hergestellt. Die erreichbare Auflösung sowie das Aspektverhältnis der Vias ist dabei aber durch das Fotopolymer stark eingeschränkt. Der Excimerlaserstrahl hingegen verdampft die dielektrische Polymerschicht mit gleichbleibender Abtragsrate, die sich über die Energiedichte unabhängig vom verwendeten Polymer sehr genau im Bereich weniger 100 nm pro Puls einstellen lässt. Damit ergibt sich wiederum die erreichte Abtragtiefe über die Zahl der verwendeten Laserpulse. Durch Maskenprojektion des rechteckigen Excimerlaserstrahls auf den Wafer lassen sich viele genau positionierte Leiterbahngräben oder Vias gleichzeitig ablatieren. Die Größe des Ablationsfeldes auf dem Wafer hängt dabei von der eingesetzten Laserenergie ab und beträgt typischerweise einige zehn Quadratmillimeter.

Strukturen der Vias und Leiterbahnen ablatieren

Der Excimerlaser nutzt zudem die Vorteile eines Dual-Damascene-Processes. Beim Dual-Damascene-Prozess erfolgt die Erzeugung der Leiterbahnen und Vias im gleichen Prozessschritt während sich der Wafer noch

auf dem Chuck befindet. Meistens wird zunächst das Kontaktloch und dann der Graben ablatiert.

Der erste Schritt ist die Polymerbeschichtung des Ausgangssubstrats mit anschließender Aushärtung. Im nächsten Schritt werden die Gräben für die Leiterbahnen in die Polymerschicht abgetragen. Die Einstellung der Grabentiefe erfolgt über die Anzahl der Laserpulse. Wichtig hierbei: Anschließend wird die Maske gewechselt und die Durchkontaktierungen mit dem Laser gebohrt. Es wird das bereits ausgehärtete Polymer ablatiert und nicht wie in der Fotolithografie das Polymer erst nachträglich ausgehärtet, was zu nachfolgender Schrumpfung und Verzerrung der erzeugten Strukturen um bis zu 40 Prozent führt. Die Positionierungsgenauigkeit der Masken zueinander liegt dabei im Submikrometerbereich. Damit ist kein überstehender Pad-Bereich des Vias mehr nötig, sondern die Vias liegen vollständig im Bereich der Gräben.

Nachdem die Strukturen der Vias und Leiterbahnen ablatiert sind, erfolgt eine Reinigung mit Sauerstoffplasma. Danach wird mit einem ca. 100 nm dünnen Titanfilm und etwa 400 nm Kupferfilm durch Sputtern beschichtet und die bis zu 10 µm Strukturen galvanisch mit Kupfer aufgefüllt. Überstehendes Kupfer lässt sich durch chemisch-mechanisches Polieren (CMP) bis zur Titanschicht entfernen.

Die auf den Polymerflächen verbleibende Titanschicht oder andere verwendete Barriere-Schichten sind sehr dünn im Bereich von unter 200 nm und lassen sich sehr schnell mit dem Excimerlaser durch Spallation entfernen. Dabei absorbiert das Polymer

ein einen großen Anteil der Strahlungsenergie, verdampft und reißt den darüber befindlichen Teil des dünnen Metallfilms mit sich fort. Bereiche mit Metaldicken von über einen Mikrometer werden dabei nicht beeinflusst.

Da es sich bei der Laser-Spallation um einen Ein-Puls-Prozess handelt, gelingt mit dieser eine sehr hohe Durchsatzrate. Abhängig von der Laserleistung benötigt man unter 50 Sekunden für die Spallation eines 300 mm-Wafers. Da das Laserlicht im Prozess senkrecht auf die Strukturen des Wafers einfällt, gibt es keine Abschattungseffekte und auch keine Aushöhlungen an der Unterseite erhabener Strukturen, wie sie beim naßchemischen Ätzen auftreten. Der Dual-Damascene-Prozess in Kombination mit der Excimerlaser-Spallation führt zu einer Betriebskostensenkung um ca. 45 Prozent gegenüber der derzeit noch verbreiteten fotolithografischen Herstellung der Leiterbahnen und Kontaktlöcher. Der Excimerlaser-Ablationsprozess gewährleistet zudem volle Kontrolle über alle Strukturparameter. Das Aspektverhältnis der Vias lässt sich über die verwendete Maske und Projektionsoptik sowie die Zahl der Pulse definieren. Deren Öffnungswinkel (Taper) wiederum bestimmt sich über die verwendete Energiedichte, wobei höhere Energiedichten

Leistungsstarke UV-Excimerlaser bieten Präzision und Durchsatz beim großflächigen Mikrostrukturieren von Leiterbahnen und Vias.



zu größeren Taperwinkeln führen. Die Excimerlaser-Direktablation erlaubt gegenüber der Fotolithografie nicht zuletzt eine größere Auswahl an Hochleistungs-Dielektrika für das Advanced-Packaging. Somit können auch nicht fotosensitive, an die Chips angepasste Hochleistungspolymere mit optimalen dielektrischen, thermischen und mechanischen Eigenschaften verwendet werden.

Picosekundenlaser schreiben komplexe 5G-Smartphone-Antennen

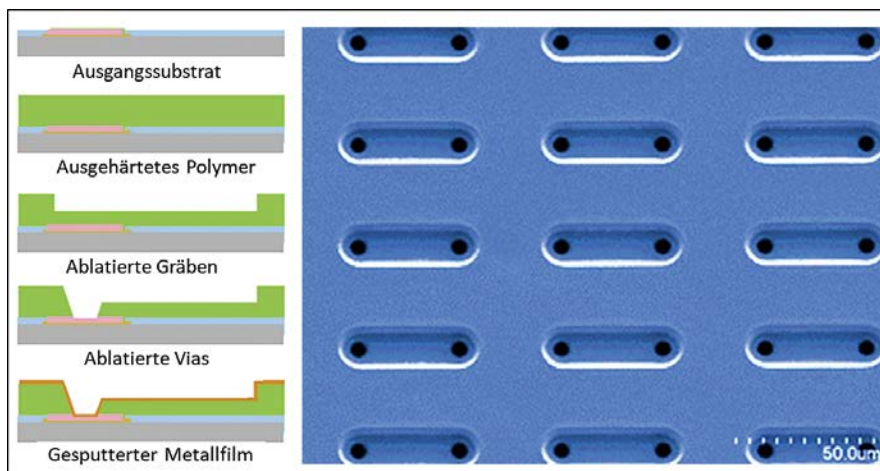
Schlüsselkomponenten in 5G-Mobilgeräten sind bis zu drei miniaturisierte Antennen, die aus mehreren Gründen kleiner und physikalisch komplexer sind als frühere Antennengenerationen, unter anderem wegen des für 5G notwendigen Wechsels zu deutlich höheren Frequenzen (Mikrowellenbereich). Damit sind 5G-Mobilgeräte in der Lage, Signale von verschiedenen Sendern gleichzeitig zu nutzen. Bei einem 5G-Smartphone erfordert dies Antennen mit komplexen 2D- (und sogar 3D-) Strukturen. Jede Antenne muss dafür den sogenannten MIMO-Standard (multiple signals in, multiple signals out) unterstützen. Bestehende Antennen unterstützen bereits den 2x2- und sogar den 4x4-MIMO-Standard und bei

den 5G-Antennen ist man bestrebt, diese Art des Multiplexing noch weiter auszubauen. Für die 5G-Kommunikation ist das Antennendesign und -material von entscheidender Bedeutung und stellt eine Herausforderung für die Laserbearbeitung dar. 5G-Antennen sind komplex sowohl in ihrer Struktur als auch im Materialverbund. Bei einem 5G-Smartphone bestehen sie aus laminierten, flexiblen Substraten mit einer dünnen Kupferschicht auf einem Isolator aus Flüssigkristallpolymer (Liquid Crystal Polymer, LCP) oder aus modifiziertem Polyamid (Modified Polyimide, MPI) mit oft noch einer zusätzlichen Verbindungsschicht. Flüssigkristallpolymer ist ein Material, welches bei unterschiedlichen Temperaturen eine konstante Leistung erbringt und einen geringen Verlust aufweist, was es für die 5G-Technologie prädestiniert. Während des Herstellungsprozesses muss das Schichtsystem durch Anbindung an ein Trägermaterial mechanisch stabilisiert werden.

Wärmeeinflusszone der Laserstrahlung minimieren

Der Laserschreibprozess mit dem Picosekundenlaser ist für die gezielte Antennen-Strukturierung das Mittel der Wahl, denn damit gelingt ein selektives Schneiden von Schichten, ohne die darunter liegenden Schichten zu beschädigen. Diodengepumpte Festkörperlaser, die in anderen Anwendungen ebenfalls zum Schneiden verwendet werden können, eignen sich in diesem Fall nicht. Deren Nanosekundenpulse können nicht gleichzeitig die Kupfer- und die Polymerschicht in einem Prozessschritt schreiben, ohne gleichzeitig die entstehenden Antennenstrukturen thermisch zu beschädigen. Beim Laserschreiben einer winzigen elektromagnetischen Struktur wie einer Smartphone-Antenne muss die Wärmeeinflusszone der Laserstrahlung minimiert werden, um Funktionsschäden durch beispielsweise Schmelzen, die zu einem Kurzschluss

Prozessablauf des Dual-Damascene-Process sowie mit dem Excimerlaser bei 248 nm erhaltene Gräben und Vias in FCPI 2200-Material.



Laserbearbeitung

führen könnten, zu vermeiden.

Zwei bewährte Methoden zur Minimierung der Wärmeeinflusszone sind die Verwendung ultrakurzer Pulslängen und die Verwendung von UV-Wellenlängen. Durch Ultrakurzpulse verringert sich Interaktionszeit des Laserpulses mit dem ablatierten Material und ein Großteil der Photonenenergie befindet sich im verdampfenden Material, anstatt die Strukturumgebung unnötig aufzuheizen. Durch die kleinere Pulsenergie und höhere Pulsfrequenz des Pikosekundenlasers lässt sich die Antennenstruktur durch mehrfaches, schnelles Überfahren erzeugen, was die Wärmeeinflusszone beim Laserschreiben zusätzlich verringert.

Die Verwendung kürzerer Wellenlängen, verringert ebenfalls die Wärmeeinflusszone, indem die hochenergetischen Photonen die interatomaren Bindungen in Polymermaterialien direkt aufbrechen, so dass ein großer Teil des Materials in einem photolytischen Prozess und nicht in einem thermischen Prozess entfernt wird. Die Verwendung einer kürzeren Wellenlänge unterstützt auch eine größere Schichtselektivität, wodurch das Prozessfenster vergrößert wird. Die Kombination aus kurzer Pulslänge und kurzer Wellenlänge macht den Pikosekunden-UV-Laser daher zu einem idealen Kandidaten für die Mikrobearbeitung der Kupfer/MPI- oder Kupfer/LCP-Lamine beim Schreiben der 5G-Antennenstrukturen.

Aktive Stabilisierung der Pulsenergie

Mittlerweile sind industrielle Picosekunden-UV-Laser mit hoher mittlerer Leistung verfügbar, was für einen hohen Prozessdurchsatz bei Anwendungen wie dem Schneiden von 5G-Antennen erforderlich ist. Ein Beispiel ist der HyperRapid NXT, der mit bis zu 30 Watt Leistung bei einer Wellenlänge von 355 nm erhältlich ist. Dies ermöglicht Scangeschwindigkeiten von mehreren Metern/Sekunde mit typischerweise etwa 10 Durchgängen, die für die Verarbeitung der neuesten Antennendesigns erforderlich sind.

Der HyperRapid NXT verfügt über eine neuartige Pulsfrequenzkontrolle (PulseEQ), die seine Fähigkeiten zum Schneiden oder Ritzen komplexer Formen, bei denen der Laserstrahl schnell über das Substrat gescannt wird, weiter verbessert. Dies beinhaltet jedoch zwangsläufig endliche Beschleunigungs- und Abbremsraten, so dass die Bewegung in gerader Linie schneller ist als die Bewegung um enge Kurven und Ecken.

Ein solches Pulsverhalten ist unerwünscht, da hierbei ebenfalls die thermische Belastung lokal erhöht wird.

Abhilfe schafft hier die PulseEQ-Funktion, denn diese ermöglicht die Steuerung der Pulsfrequenz in Echtzeit und damit die Synchronisation der Pulse mit den Positions- und Geschwindigkeits-Signalen des Scanners. Dadurch wird sichergestellt, dass die Puls-zu-Puls-Überlappung bei dem konstanten Betrag bleibt, der für eine Anwendung als optimal ermittelt wurde. Die Mikroskop-Bilder zeigen den konstanten Abstand der Pulse bei eingeschalteter PulseEQ-Funktion für einen Schreibzyklus auf einer Probe aus SiN auf Si. Zudem verfügt die PulseEQ-Funktion über eine aktive Stabilisierung der Pulsenergie. Dies ist wichtig, da eine Änderung der Pulsfrequenz bei Picosekundenlasern gemeinhin mit einer Variation der Pulsenergie einhergeht.

Autoren

Dr. Ralph Delmdahl, Coherent Göttingen

Hatim Haloui, Coherent Kaiserslautern

www.coherent.com

Effekt der aktiven Pulsfrequenzkontrolle (Pulse EQ) durch Echtzeit-Rückkopplung für einen einzigen Durchgang über eine Probe aus dünnem SiN auf Silizium.

