

Prototyping von vollflexiblen Sensoren

Lösung für Sensoren auf ein- und doppelseitig kupferkaschierten Laminaten

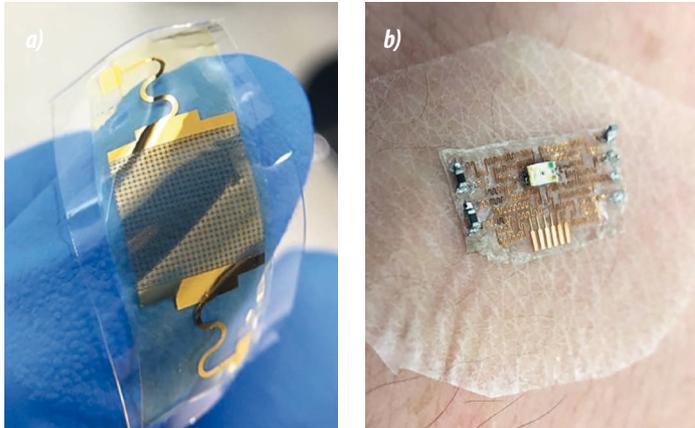


Bild 1: Laserbearbeitete Sensoren auf der Basis von Flex-Materialien.
 a) Demonstration der Sensorflexibilität mit lasermodifizierten Schnittstelleneigenschaften. b) Aktuelle Forschungsfortschritte bei dehnbaren elektronischen Detektionssystemen, die auf der menschlichen Haut zum Einsatz kommen. Bilder mit freundlicher Genehmigung von Prof. Xiangjiang Liu, Zhejiang University, China.

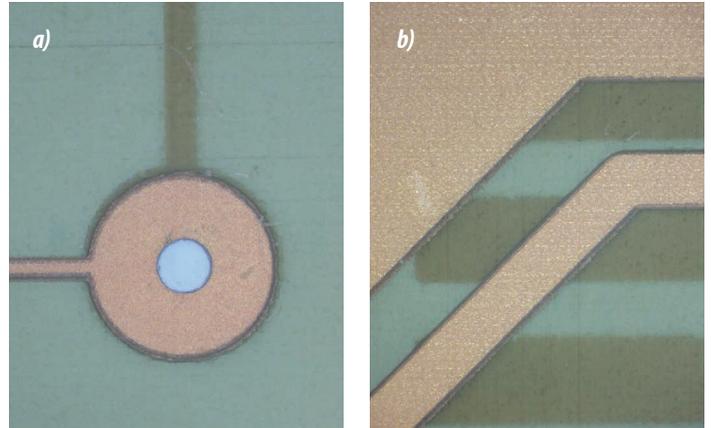


Bild 2: a) Via mit 200 µm Durchmesser, das die Kontaktflächen der oberen und unteren Layer verbindet und b) Leiterbahnen und Kontaktflächen in der Kupferschicht. Die Fotos zeigen eine hohe Kantenglätte und präzise Formen, Ecken, Größen sowie eine präzise Via-Positionierung.

Flexible Leiterplatten, komplexe Flachkabel und Sensoren sind in der Computer- und Automobilelektronik, bei Smartphone-Baugruppen, in der Medizintechnik und anderen High-Tech-Anwendungen weit verbreitet. Wir demonstrieren einen vollintegrierten Laserbearbeitungsprozess mit einem System zur Laser-Mikrobearbeitung, Schneiden und Bohren von vollflexiblen, doppelseitig kupferkaschierten Laminaten für eine umfassende Prototyping-Lösung. Die fertigen Muster zeigen unveränderte Flexibilität, Haftung der Kupferstruktur und ein nur geringfügig verdünntes Substratmaterial ohne erkennbare hitzebedingte Degradation.

Einführung

Leiterplatten (PCBs) wurden seit dem Beginn des 20. Jahrhunderts entwickelt und haben heute einen Marktumsatz von vielen Milliarden Euro. Mit der Revolution der mobilen Technologien, selbstfahrenden Autos und fortschrittlicher medizinischer Geräte werden flexible Leiterplatten weit verbreitet eingesetzt. Ihre Vorteile gegenüber herkömmlichen starren und starr-flexiblen Leiterplatten liegen in der Größen- und Gewichtsreduzierung, den nahezu unbegrenzten Form- und Größenoptionen, der

hohen Temperaturstabilität durch verbesserte Wärmeableitung, der Unempfindlichkeit von Polyimid sowie in einer genau kontrollierten Impedanz und Abschirmung. Die Flexibilität ist wichtig für Anwendungen in Handheld-Geräten und Sensoren, wo Formfaktor und Design von Bedeutung sind, vor allem in der Unterhaltungselektronik, aber ebenso für Sen-

soren und - in der Medizintechnik - für die patientennahe Diagnostik bei sogenannten Point-of-Care-Geräten.

Flexible Substrate erhöhen den Tragekomfort

Auch der weitestgehende Tragekomfort moderner Wearables, der eine für den Patienten angenehme Langzeitüberwachung durch elek-

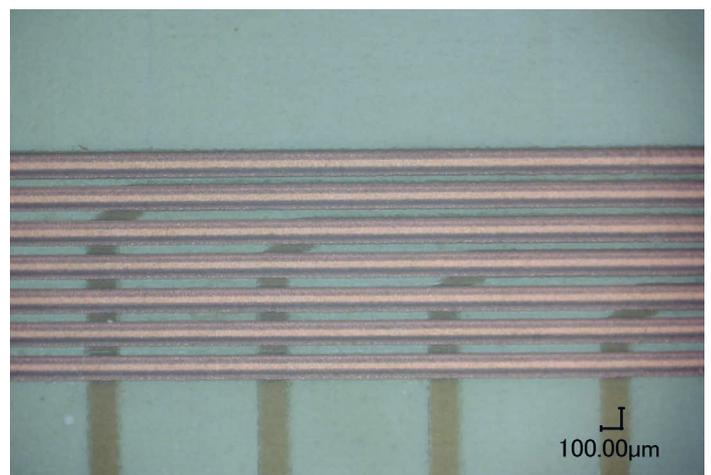


Bild 3: Mikrostrukturierte Kupferschichten auf beiden Seiten des Flex-Materials DuPont CG 185018R. Die horizontalen Leiterbahnen befinden sich oben, die vertikalen, gebogenen Leiterbahnen sind unten. Die Anordnung wurde durch eine Kombination aus transmissiver und reflektierender Beleuchtung sichtbar gemacht. Zu beobachten ist eine hohe Ausrichtungspräzision, da die unteren Bahnen hinter der Biegung alle parallel nach rechts weiter verlaufen. Maßstabsleiste: 100 µm.

Autor:
 Jaka Mur, PhD, ist Postdoktorand und Assistenzprofessor an der Fakultät für Maschinenbau der Universität Ljubljana, Slowenien

LPKF Laser & Electronics AG
 www.lpkf.com



Bild 4: Bei dieser doppelseitigen Struktur sind der präzise Abtrag der Kupferschicht sowie die nahezu unbeschädigte dielektrische Schicht deutlich zu erkennen. Die Größe des Musters beträgt 25 x 25 mm².

tronische Sensoren bedeutet, wird erst durch den Einsatz flexibler Substrate möglich. Das wachsende Interesse in den letzten Jahren und die Möglichkeiten zur Herstellung flexibler Sensoren, wie in Bild 1 gezeigt, führt zu einem steigenden Bedarf an einer umfassenden, universell einsetzbaren Prototyping-Lösung zur vollständigen Bearbeitung von flexiblen Leiterplatten. Ziel war es, ein solches Verfahren auf Grundlage des Lasersystems zu entwickeln.

Dieses Verfahren sollte alle Schritte von der Handhabung des Schaltungsdesigns, der Laser-Mikromaterialbearbeitung der leitenden Kupferschicht, dem Bohren der Durchkontaktierungen (Vias) sowie dem abschließenden Schritt des Schneidens der gewünschten Kontur umfassen.

Das Lasergerät

ist mit einer ultrakurz gepulsten Laserquelle ausgerüstet, die sich für die Bearbeitung flexibler Leiterplatten als entscheidend herausstellte. Zusätzlich zu den charakteristischen Eigenschaften aller laserbasierten Bearbeitungsverfahren – berührungslos und chemiefrei – ermöglichen ultrakurze Laserpulse mit

Wellenlängen im grünen Bereich qualitativ hochwertige Strukturen in der Kupferschicht. Gleichzeitig wurde die Wärmebelastung und die direkte laserinduzierte Schädigung der dielektrischen Schicht minimiert.

Neuartiger laserbasierter Ansatz

Die meisten flexiblen Leiterplatten werden mit herkömmlichen Techniken (z. B. durch chemisches Ätzen) hergestellt. Unser Ziel für den neuartigen laserbasierten Ansatz war es daher, die Gesamtqualität der Leiterplatten und die Bearbeitungstoleranzen traditioneller Methoden zu erreichen und gleichzeitig die Vorteile der hohen Flexibilität und der kurzen Umschlagzeiten für individuelle Prototypen oder Kleinserien zu erhalten.

Schritte der Laserbearbeitung

Die typischen ein- und doppelseitigen flexiblen kupferkaschiereten Lamine bestehen aus einem dielektrischen Substrat bzw. Kernmaterial auf Polyimidbasis mit einer Dicke von 25 µm bis 150 µm und Kupferlagen mit einer Dicke von bis zu 35 µm.

Für die Laserbearbeitung von doppelseitigen Materialien in mehreren aufeinanderfolgenden Schritten gibt es zwei Grundvoraussetzungen: die absolute Positioniergenauigkeit und die sichere Befestigung auf dem Arbeitstisch. Beide Voraussetzungen werden mit dem Design des Lasergerätes erfüllt: erstere durch die Kombination von Passermarkenerstellung und -lesung, letztere durch den Vakuumschicht, der das Muster stabil in Position hält. Der erste Schritt der Laserbearbeitung ist daher das Bohren von Passermarken. Damit wird sichergestellt, dass die Strukturen beider Layer korrekt ausgerichtet sind und eine feste Basis für alle weiteren Bearbeitungsschritte bieten. Bild 2a zeigt die aufeinander ausgerichteten Strukturen, die durch die Materialschichten hindurch sichtbar sind.

Anforderungen dünner Substrate

Das laserbasierte PCB-Prototyping ist bereits eine etablierte Tech-

nik, bei der in der Regel Nanosekunden-Laserpulse eingesetzt werden. Diese Technik erzielt eine hohe Effizienz beim Materialabtrag, setzt relativ widerstandsfähige Substrate ein und erfordert nur eine durchschnittliche Bearbeitungsqualität. Für das Bohren der Passermarken ist in der Regel keine besondere Präzision bzw. der Einsatz ultrakurzer Pulse erforderlich. Das Gegenteil gilt jedoch für die Laser-Mikromaterialbearbeitung der auf dem dünnen und flexiblen dielektrischen Substrat aufgetragenen Kupferschicht. Denn bei der Arbeit auf dünnen Substraten ändern sich die Regeln dramatisch, da das Substrat für Wärmebelastungen und – wegen der geringen Dicke – auch für die direkte Schädigung durch den Laser anfälliger ist.

„Grüne“ Wellenlänge

Eine Allround-Lösung für solche Aufgaben ist der Einsatz ultrakurzer Laserpulse mit „grüner“ Wellenlänge. Wenn die Bearbeitungseffizienz durch entsprechende Para-

ingun®

Partner für die **Technologie der Zukunft**

Kundenspezifische und flexible Lösungen für jede Anforderung.

ingun.com

meterauswahl optimiert wird, führt die Verwendung ultrakurzer Pulse nur zu einem minimalen Wärmeintrag auf das umgebende Material. Es wird also im Bereich der sogenannten „kalten Ablation“ gearbeitet. Andererseits wird das grüne Licht in der Kupferschicht gut absorbiert, in den polymerbasierten Trägermaterialien hingegen deutlich weniger. Dies ermöglicht einen hochpräzisen Abtrag der Kupferschicht bei gleichzeitig geringer thermischer Belastung des Substrats. Bei einer üblichen Kupferschichtdicke von über 5 µm trägt ein einzelner Laserpuls aufgrund der relativ milden Lasereinstellungen nicht die gesamte Schicht ab. Die Materialoberfläche wird in mehreren Durchgängen bearbeitet. Hierbei spielt die Wellenlänge im „grünen“ Bereich eine wichtige Rolle, wenn die Kupferschicht bereits so weit abgetragen ist, dass ein Teil der Laserenergie das Substrat erreicht und es beschädigen könnte. Durch den optimierten Energieeintrag und die richtige Wahl der Wellenlänge entstehen genau definierte Strukturen und eine gleichmäßig abgetragene Kupferschicht, wie in Bild 2b gezeigt.

Ultrakurze Laserpulse

Ultrakurze Laserpulse sind durch ihre Dauer charakterisiert, die kürzer ist als bei fast allen physikalischen Nichtgleichgewichtsprozessen. Dieser Vergleich spielt eine wichtige Rolle für das Verständnis des Laser-Abtragsverhaltens. Es wurde festgestellt, dass für die bestmögliche Abtrageffizienz ein optimaler Wert der Laserpulsfluenz existiert. An diesem Punkt erfolgt der geringste Energieeintrag an das umgebende Material. Um nahe an diesem Punkt zu arbeiten, ohne die durchschnittliche Leistung des Lasers zu verringern, hat LPKF für den Arbeitsschritt der Mikromaterialbearbeitung an der Kupferschicht einen vergrößerten Laserstrahl verwendet. Unter Berücksichtigung der Materialeigenschaften des Substrats und der erreichten Bearbeitungszeiten erwies sich ein solcher Kompromiss nicht nur als notwendig, sondern auch als entscheidend für die Wiederholbarkeit des Prozesses. In Bild 3 sind feine Leiterbahnen dargestellt.

Bearbeitungsschritte

Alle Schritte der Laserbearbeitung erfolgen unmittelbar nacheinander, ohne dass der Benutzer eingreifen muss (außer beim Umdrehen des Materials). Die Schritte zum Mikromaterialbearbeitung und Bohren folgen dem vorhergehenden Bohren der Passermarken und werden ggf. auf der unteren Materialseite wiederholt. Das Schneiden der Leiterplattenkontur ist der letzte Schritt, damit der Schnitt nur durch das Substratmaterial erfolgen muss. Während der Laser-Bearbeitung wird die gesamte vorgesehene Fläche der oberen Kupferschicht mit den korrekten Laserparametern entfernt.

Hohe Bearbeitungsstabilität

Die Konstruktionsmerkmale des Lasersystems ermöglichen eine hohe Bearbeitungsstabilität, die für eine garantierte Wiederholbarkeit und gleichmäßige Umsetzbarkeit erforderlich ist. Dies wird möglich durch eine anwendungsspezifische stabile Laserquelle und die proprietären Algorithmen für Scandfeldplatzierung, Rotation und Stitching. All dies ermöglicht die gleichmäßige Bearbeitung großer Flächen mit kontrollierten Kanten und Größen, auf Biegungen und geraden Linien, mit minimalen Schäden am Substrat und sauberem, rückstandsfreiem Materialabtrag. Letzteres ist auf die Luftstromkammer des Lasersystems, die ultrakurz gepulste Ablation, die eine Materialverdampfung und -zerstäubung bewirkt, und die Optimierung der Prozessparameter zurückzuführen.

Das fertige Erprobungsmuster ist in Bild 4 dargestellt und besteht aus identischen, jedoch gespiegelten Designs auf der oberen und unteren Kupferschicht. Für die Demonstration wurde das Muster über vier Scandfelder gesticht, die am Ende kaum noch zu sehen sind. Dies zeigt, dass die Abmessungen bei Bedarf skaliert werden können.

Zusammenfassung

Das Lasersystem wurde für den Machbarkeitsbeweis und die komplette Prozessoptimierung eines einstufigen Herstellungsverfahrens



Bild 5: Der LPKF ProtoLaser R4 mit Pikosekunden-Laserpulsen ermöglicht die hochpräzise Strukturierung empfindlicher Substrate und das Schneiden von gehärteten oder gebrannten technischen Substraten.

von vollflexiblen Leiterplatten auf ein- und doppelseitig kupferkaschierten Laminaten eingesetzt. Die optimierte Implementierung der Ultrakurzpuls-Laserbearbeitung im ProtoLaser R4 ermöglicht ein kontrolliertes, nahezu digital ausgeführtes Laser-Prozessieren der leitenden Kupferschichten. Der Prozess war sauber, präzise, und das Dielektrikum des Substrats blieb dabei intakt. Nach unserem Kenntnisstand ist dieses Verfahren eine Pionierarbeit, die vollständiges Laserprototyping auf flexiblen Elektronikmaterialien ermöglicht und über die Bearbeitung speziell entwickelter Lamine, wie z. B. die TK-Serie von DuPont, hinausgeht.

Die Anwendung ist nur eine der möglichen, wenn auch speziellen, Anwendungsmöglichkeiten der Maschine, die ebenso für das Schneiden, Bohren und Strukturieren von typischen Materialien für

HF-Elektronik, GaN-Keramikmaterialien, PTFE, dünnen Metallschichten auf Glas, usw. geeignet ist.

Weiterführende Informationen

Weitere Informationen über Wearable-Sensortechnologie und Möglichkeiten zur Bereitstellung von universellen, empfindlichen biomolekularen Sensoren zur medizinischen Untersuchung stehen im Artikel „Wearable plasmonic-metasurface sensor for noninvasive and universal molecular fingerprint detection on biointerfaces“ (Plasmonischer Metaoberflächen-Sensor für Wearables zur nicht-invasiven und universellen molekularen Detektion an Bio-Schnittstellen), der in „Science Advances“ online veröffentlicht wurde: <https://advances.sciencemag.org/content/7/4/eabe4553> zur Verfügung. ◀