

Spektrale und optische Überwachung des selektiven Entschichtens von Oberflächenmaterial auf Glasproben

Clemens Richter ², Karsten Schmiedel ^{1,2}, Tobias Baselt ^{1,2,3}, Peter Hartmann ^{1,2,3}

¹ Fraunhofer IWS, Institut für Werkstoff- und Strahltechnik, Dresden, Deutschland

² Westsächsische Hochschule Zwickau (WHZ), Leupold Institut für angewandte Naturwissenschaften (LIAN), Zwickau, Deutschland

³ Forschungs- und Transferzentrum e. V. an der Westsächsischen Hochschule Zwickau, Zwickau, Deutschland

Es wird das selektive Laserentschichten und die Detektion von Oberflächenmaterialien wie Partikelrückständen auf Glsträgern demonstriert, die für das Handling von Bauteil-Wafern benötigt werden. Durch die Evaluierung des Systems mittels systematischer Parameterreihen kann gezeigt werden, dass Schichten selektiv abgetragen werden können und somit der Einsatz von chemischen Prozessen vermieden werden kann. Darüber hinaus wurde im Rahmen der Prozessentwicklung eine kamerabasierte und spektrale Überwachung implementiert. Die Ergebnisse werden hinsichtlich des Abtrag-Erfolgs und der spektrometrischen Analyse der Partikelrückstände mittels Laser induced breakdown spectroscopy (LIBS) dargestellt.

1. Einleitung

Um den hohen Anforderungen der Industrie an platzsparende, kostengünstige und funktionellere Bauelemente gerecht zu werden, werden die Standarddicken für Bauelemente-Wafer in mikroelektromechanischen Systemen und in der Halbleiterindustrie zunehmend verringert. Um sie bei Dicken unter 150 μm beschädigungsfrei handhaben und bearbeiten zu können, werden Glsträger verwendet, die als technische Unterstützung mit dem Bauelemente-Wafer thermisch verbunden werden (siehe Abbildung 1). Nach dem Ausdünnen und der Prozessierung des Wafers wird der Glsträger mit verschiedenen Techniken (mechanisch, Laser, thermisch oder chemisch) abgelöst [1, 2]. Anschließend müssen Klebstoffreste und oft auch Edelmetallschichten aus vorherigen Abscheidungs- und Ätzprozessen durch nasschemische Reinigung mit Königswasser (Aqua regia) entfernt werden, bevor der Träger wiederverwendet werden kann.

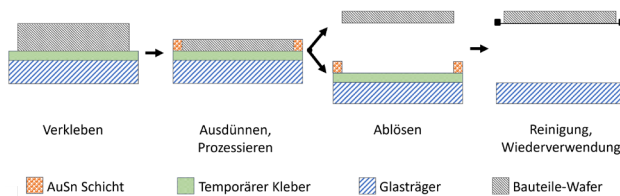


Abbildung 1: Schematische Darstellung des Prozessablaufs für das Prozessieren von Bauteile-Wafer mit Glsträgern.

Um den ressourcenintensiven und umweltbelastenden Prozessschritt der nasschemischen Reinigung des Glsträgers zu vermeiden, ist die selektive Laserablation ein möglicher Ansatz [3, 4]. In diesem speziellen Fall verbleibt nach der Bearbeitung des dünnen Bauteil-Wafer eine Legierungsschicht im Randbereich des Glsträgers. Das selektive Entschichten des Abscheidungsmaterials

mit Hilfe eines Lasers bietet nicht nur den Vorteil, dass die benötigten Reinigungsmittel reduziert werden, sondern auch, dass eine Prozessüberwachung über das entstehende Plasmasignal mittels LIBS implementiert werden kann. Bei LIBS, einer Methode der Atomemissionsspektroskopie (AES), werden einzelne fokussierte Laserpulse mit einer höheren Strahlenergie ($> 10^6 - 10^9 \text{ W/cm}^2$) als die Durchschlagenergie der Probe auf die Oberfläche des Probenmaterials gerichtet. Infolgedessen wird die atomare/molekulare Struktur der Probe aufgebrochen, erhitzt, verdampft und ein Plasma gebildet. Die Strahlungsenergie des Laserpulses regt die freien Atome und Ionen in dem verdampften Material an [5, 6]. Wenn das Plasma abkühlt, fallen die Bestandteile des Plasmas auf ihre niedrigeren Energieniveaus zurück. Dabei werden sowohl kontinuierliche Strahlung als auch diskrete Emissionslinien emittiert. Letztere sind elementspezifisch und können mit einem Spektrometer nachgewiesen und den in der Probe vorhandenen Substanzen zugeordnet werden. Da die spektral detektierten Elementkonzentrationsverhältnisse im Plasma proportional zur Menge in der Probe sind, ist eine quantitative Auswertung des Probenmaterials möglich [5, 7, 8]. LIBS hat gegenüber anderen Analysemethoden mehrere Vorteile, darunter die berührungslose Analyse, die einfache Probenvorbereitung, die hohe räumliche Auflösung und das breite Spektrum an Materialien, die analysiert werden können [6].

2. Experimentales Setup

Wie in Abbildung 2 dargestellt, wird ein fasergekoppelter Nd:YAG-Festkörperlaser (IPG YLPN-0.5-1x5-80) mit einer zentralen Wellenlänge von 1060 nm und einer maximalen Leistung von 80 W über eine fokale Linse und einen 2D-Galvoscanner (Scancube 8.5) auf den Glsträger gerichtet. Laserpulse mit einer maximalen Energie von $E_p = 0,5 \text{ mJ}$ bei $f_{rep} = 160 - 4000 \text{ kHz}$ und einer Dauer

$t_p = 1 - 5 \text{ ns}$ ermöglichen es, die Legierungsschicht auf dem Glassubstrat zu entfernen und das Plasma anzuregen.

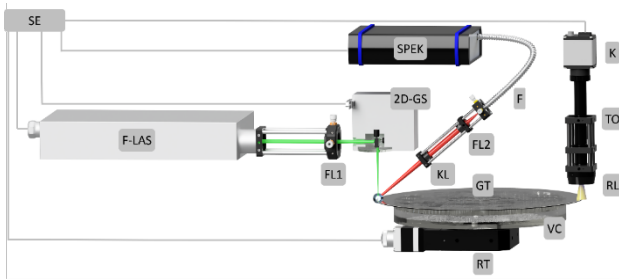


Abbildung 2: Messaufbau für die Detektion von Oberflächenmaterialien mit LIBS: fasergekoppelter Laser (F-LAS), Fokussierlinse (FL1) und 2D-Galvoscanner (2D-GS) zur Plasmaerzeugung auf einem Glasträger (GT), der auf einem Drehtisch (RT) mit einer Vakuum-Chuck (VC) gehalten wird; Kollimationslinse (KL), Fokussierlinse (FL2) und Faser (F), verbunden mit Spektrometer (SPEK) zur Erfassung des Plasmasignals; Kamera (K), telezentrisches Objektiv (TO) und Ringlicht (RL) zur Beobachtung des bearbeiteten Bereichs, gesteuert durch die Steuereinheit (SE).

Der 2D-Galvoscanner führt eine kreisförmige Bewegung mit einem Radius von 2,5 mm auf der Probe aus, um ein gleichmäßiges Entschichten zu gewährleisten. Gleichzeitig wird der Glasträger durch einen Rotationstisch (Thorlabs HDR50/M) gedreht, um den gesamten Trägerumfang, der mit der Metalllegierung bedeckt ist, zu entschlachten. Die Probe kann mit zwei Lineartischen (Steinmeyer PLT240-400-DLM) in einer XY-Tischkonfiguration präzise zum Laserstrahl positioniert werden. Der Entschicht-Prozess, der durch die Zufuhr von Prozessgasen unterstützt werden kann, wird durch ein Kamerasystem (IDS-U3-3090SE-CHQ) überwacht und durch eine eigens entwickelte Software gesteuert. Zusätzlich wird das Plasmasignal mit einem fasergekoppelten Avantes-Mehrkanalspektrometer (200 nm – 980 nm mit 0,17 nm FWHM) detektiert und in der Steuereinheit ausgewertet. Der gesamte Versuchsaufbau ist in einem industrietauglichen Gehäuse untergebracht und bietet die notwendige Sicherheitsinfrastruktur, um Proben aus der Halbleiterindustrie zu verarbeiten.

3. Ergebnisse

3.1. Charakterisierung des Randbereichs des Glasträgers

Um den Randbereich der $\varnothing = 305 \text{ mm}$ großen Glasträger zu charakterisieren, wurden diese zunächst stationär mit verschiedenen optischen Auswertegeräten vermessen. Abbildung 3 zeigt einen Ausschnitt aus einem bereits teilweise entschlachtenen Randbereich des Glasträgers, der mit den in Abschnitt 3.2 genannten Parametern bearbeitet wurde. Sowohl in der Mikroskopaufnahme (Zeiss Smartzoom 5) als auch in der REM-Aufnahme (Zeiss EVO MA10) ist die Struktur des Randbereichs zu erkennen. In der EDX-Analyse sind nicht nur die im Randbereich enthaltenen Elemente, sondern auch das vollständige Entschichten der

Legierung im oberen Teil der Glasträgerkante zu erkennen. Die Analyse zeigt, dass der Randbereich aus einer Gold-Zinn-Legierung (AuSn) besteht, die aufgrund der unregelmäßigen Verteilung während der Abscheidung der Materialien eine Schichtdicke im Bereich von $100 \mu\text{m}$ aufweist. Darüber hinaus wird das Glassubstrat des Glasträgers in Form von Silizium (Si) nachgewiesen.

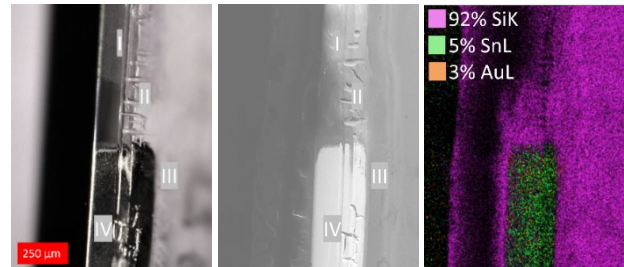


Abbildung 3: Mikroskopische Aufnahme (Links), REM-Aufnahme (Mitte) und EDX-Analyse (Rechts) des halbbearbeiteten Randbereichs des Glassubstrats zeigen: I: lasergereinigter Bereich, II: Rattermarken, III: Klebstoffreste, IV: Gold-Zinn-Legierungsschicht.

3.2. Parameterreihe zur optimalen Abtragung der Legierungsschicht

Die Zielsetzung bei der Reinigung des Glasträgers ist das vollständige Entschichten von Metallbeschichtungen und Klebstoffresten im Randbereich ohne Abtragung oder Zerstörung des Glassubstrats, Dimensionsänderungen oder Beeinflussung vorhandener Defekte am Rand des Glassubstrats. Dazu wird die thermische Belastung durch die Wahl von Laserparametern mit kurzen Pulslängen, niedrigen Pulsenergien und einer Laserwellenlänge mit geringer Absorption für das Glassubstrat so gering wie möglich gehalten. Um den Reinigungserfolg auf gleichmäßig beschichteten Glasträgern systematisch zu analysieren und die Variablenmatrix zu begrenzen, wurden Parameterreihen mit Variation der Lasereinstellungen und Bewegungsregime durchgeführt. Im Einzelnen wurden Laserleistung (1 – 10 % in 1 %-Schritten), Scangeschwindigkeit v_{scan} (0,5 – 4,5 m/s in 0,5 m/s-Schritten) und XY-Achsen-geschwindigkeit (1 – 10 mm/s in 1 mm/s-Schritten) bei den in Tabelle 1 gezeigten gleichmäßig beschichteten Schichtstrukturen der Glasträger analysiert.

Tabelle 1: Spezifikation der Schichtaufbauten der untersuchten Glasträger

Schichtstruktur	Elementbeschichtung	Schichtdicke [nm]
Einzelschicht	Aluminium (Al)	500
Einzelschicht	Titan (Ti)	500
Einzelschicht	Nickel-Vanadium (NiV)	500
Einzelschicht	Gold-Zinn (AuSn)	500
Gestapelte Schicht	Al/ Ti/ NiV/AuSn	400/400/75/1200

Als Beispiel ist in Abbildung 4 die Variation der mittleren Laserleistung (W_{avg}) anhand des Glasträgers mit der gestapelten Beschichtung dargestellt. Eine Erhöhung der Laserleistung führt zu einer teilweisen Ablösung der Metallschicht bis hin zur vollständigen Abtragung der

Legierungsschicht bei einer mittleren Laserleistung von 2,1 W (Abbildung 4 UM). Oberhalb dieser Schwelle wird das darunter liegende Glassubstrat abgetragen.

Weiterhin wurden Untersuchungen unter dem Einfluss von Prozessgas wie Stickstoff und Druckluft durchgeführt, die zu vergleichbaren Ergebnissen wie ohne Gaszufuhr führten. Anhand der vorgestellten Versuchsergebnisse konnten die Parameter für den Abtrag der AuSn-Legierungsschicht optimiert und somit eine Prozesszeit von 1 min für einen Glaträger mit Laserpulsen von $E_p = 200 \mu\text{J}$, $t_p = 5 \text{ ns}$, $f_{rep} = 400 \text{ kHz}$ sowie $v_{scan} = 5 \text{ m/s}$ und $v_{rot} = 5,3 \text{ }^\circ/\text{s}$ für das Bewegungsregime erreicht werden. Obwohl das selektive Entschichten bereits bei $80 \mu\text{J}$ erreicht werden konnte, wurde die Pulsenergie maximiert, um eine höhere Verarbeitungsgeschwindigkeit und ein stärkeres Plasmasignal für Diagnosezwecke zu erzielen, ohne die Oberfläche des Glaträgers zu beschädigen.

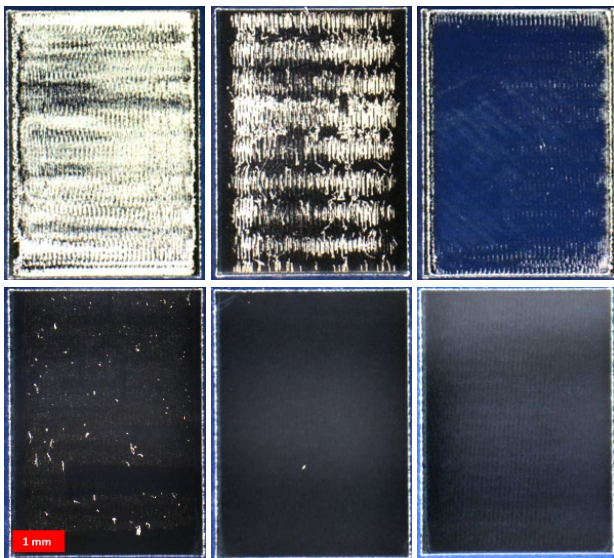


Abbildung 4: Mikroskopische Bildserie zur Auswertung des Laserentschichtens von Glaträgern (einheitlich beschichtet mit 400 nm Al, 400 nm Ti, 75 nm NiV, 1200 nm AuSn) durch Veränderung W_{avg} in % bei $v_{XYtable} = 10 \text{ mm/s}$, $v_{scan} = 5 \text{ m/s}$, $f_{rep} = 150 \text{ kHz}$, $t_p = 5 \text{ ns}$:

OL: anfänglicher Materialabtrag ($2 \% \pm 0,6 W_{avg}$)

OM: ungleichmäßiger Abtrag ($3 \% \pm 0,9 W_{avg}$)

OR: ungleichmäßiger Abtrag ($5 \% \pm 1,5 W_{avg}$)

UL: Partikelrückstände ($6 \% \pm 1,8 W_{avg}$)

UM: erfolgreiche selektive Entfernung ($7 \% \pm 2,1 W_{avg}$)

UR: Schäden am Glassubstrat ($10 \% \pm 3 W_{avg}$).

3.3. Prozessüberwachung und spektrometrische Analyse des Entschicht-Prozesses

Zur Prozessüberwachung wird der Entschichtvorgang inline per Kamera aufgezeichnet und in ein Falschfarnebild umgewandelt, das die Reste des abgetragenen Materials sichtbar macht. Auf diese Weise kann eine schnelle visuelle Rückmeldung über den Reinigungserfolg gegeben werden. In Abbildung 5 sind Falschfarnebildausschnitte einer Glassubstratkante dargestellt, in

denen die Veränderung vor und nach der Laserbearbeitung sichtbar ist. Im oberen Bildausschnitt hebt sich die AuSn-Legierungsschicht (I) farblich deutlich vom Glassubstrat (II) ab. Nach der Bearbeitung (5 unten) ist die Metallschicht nicht mehr sichtbar und es sind nur noch geringe Reflexionen von den Rattermarken (III) und der abgerundeten Kante (IV) des Glaträgers zu erkennen.

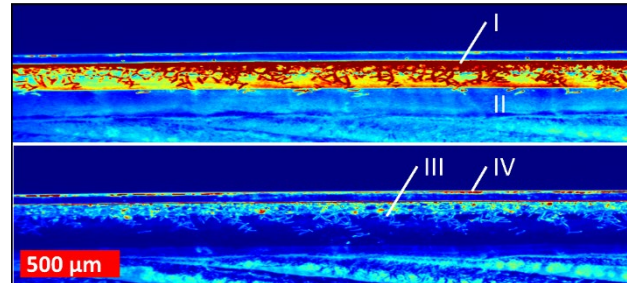


Abbildung 5: Falschfarnebildausschnitt der Glassubstratkante vor (oben) und nach (unten) selektivem Laserabtrag mit AuSn-Legierungsschicht (I), Glassubstrat (II), Rattermarken (III) und der abgerundeten Glassubstratkante (IV), aufgenommen während der Kameraüberwachung.

Erweitert wird diese Überwachung durch eine in den Messaufbau integrierte LIBS-Detektionseinheit, mit der der Erfolg des Entschicht-Prozesses bewertet und die Zusammensetzung der abgetragenen Schichten analysiert werden kann. Die Messeinheit ist schräg zum Laserstrahl angeordnet, die beide auf die Kante des Glaträgers fokussiert sind. Zur Demonstration des Inline-Monitoring-Verfahrens wird ein Glaträger mit den in 3.2 genannten Parametern bearbeitet und gleichzeitig das Plasmasignal mit einer auf Signalstärke und Vermeidung von Übersteuerung des Detektors optimierten Integrationszeit von 30 ms detektiert. Aufgrund der Integrationszeit des Spektrometers und der Dauer der Datenverarbeitung zur Realisierung des Inline-Monitorings ist die Anzahl der Messpositionen pro Umdrehung des Glaträgers auf ausreichende 167 Messpositionen begrenzt. Die aufgenommenen Spektren werden normalisiert, um sie miteinander vergleichen zu können. Zur Erhöhung der Genauigkeit sowie zum Ausgleich von Unterschieden in der Probenzusammensetzung wird der Mittelwert aus jeweils zehn Spektren berechnet. Um sicherzustellen, dass die im Randbereich detektierten Elemente unabhängig voneinander ausgewertet werden können, ohne dass sich die Wellenlängen überschneiden, und um eine hohe Peakintensität für die Auswertung zu erhalten, wurden folgende Parameter gewählt:

- Au: 312,261 nm mit dem Übergang 6s2 2D - 6p 2P0, [9, 10] und
- Sn: 326,221 nm mit dem Übergang 5p2 1D - 6s 1P, [9, 11].

Abbildung 6 zeigt für diese beiden Elemente den Verlauf des Plasmasignals mit der entsprechenden Wellenlänge für zwei Umdrehungen (0° bis 720°) des Glaträgers bei konstanter Laserleistung. Auf diese Weise kann der Erfolg der Reinigung während der zweiten Umdrehung bewertet werden. Während der ersten Umdrehung sind

ähnliche ansteigende und abfallende Kurven zu beobachten, die auf die inhomogene Beschichtung der Metallschicht zurückzuführen sind. Zum einen ist die Metallschicht über den Umfang des Glasträgers unterschiedlich breit, zum anderen ist weder die Schicht konzentrisch auf dem Glasträger aufgebracht noch der Glasträger exakt konzentrisch auf dem Drehtisch positioniert. Da die Detektoreinheit nur auf eine bestimmte Position am Rand des Glasträgers fokussiert ist, wird das daraus resultierende schwankende Plasmasignal erfasst. Darüber hinaus ist die statistische Komponente des Plasmaprozesses zu berücksichtigen. Die unterschiedliche Intensität der Kurven für Gold und Zinn im Verhältnis zueinander ergibt sich aus den Peak-Intensitäten der normierten Spektren. Die kleineren Peaks in der Grafik sind auf Merkmale im Randbereich zurückzuführen, die von früheren Abscheide- und Ätzprozessen des bereits mehrfach verwendeten und wiederaufbereiteten Glasträgers stammen. Das Plasmasignal kann nur als Rauschen im zweiten Zyklus detektiert werden, da die Metalllegierungsschicht bereits im vorherigen Ablationsprozess vom Rand des Glasträgers entfernt wurde.

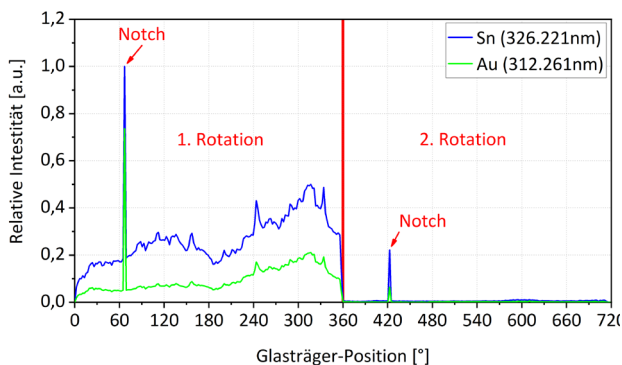


Abbildung 6: Diagramm der normierten relativen Plasmaintensität für die Wellenlängen von Gold und Zinn für zwei Rotationen des Glasträgers bei konstanter Laseraktivität (Prozessparameter siehe 3.2) zur Demonstration der LIBS-Überwachung (erste Rotation) und der vollständigen Entfernung der Metallschicht auf dem Glasträgerend (zweite Rotation).

Bei der Glasträgerposition von 67 ° sind im Diagramm überhöhte Peaks beider Kurven zu erkennen. Dies ist auf eine Aussparung im Wafer zurückzuführen, die auch als "Notch" bezeichnet wird und zur Ausrichtung des Wafers dient. Dies hat zur Folge, dass der unmaskierte Bereich der Glasträgerkante durch Abscheidungsprozesse beschichtet wird. Dies führt zu einer höheren Plasmakonzentration beim Laserabtrag des betroffenen Bereichs und damit zu einer Übersteuerung des Detektors. Dieses Signal tritt auch während der zweiten Drehung des Glasträgers bei Position 422 ° auf. Dabei handelt es sich jedoch um ein Messartefakt, da die Notch eine Übersteuerung des Silizium-Wellenlängenkanals (Si) und damit der benachbarten Gold- und Zinn-Wellenlängenkanäle bewirkt. Außerdem zeigen EDX-Analysen von Glasträgern, die mit denselben Parametern entschichtet wurden, eine vollständige Entfernung der

Metalllegierungsschicht. In Kombination mit der visuellen Überwachung durch den Kameraaufbau kann auf diese Weise der selektive Laserabtrag der Metallschicht am Rand des Glasträgers zuverlässig überwacht werden. Mit dem hier beschriebenen Verfahren bearbeitete Glasträger wurden bereits erfolgreich in den Produktionskreislauf der Halbleiterindustrie zurückgeführt und weiterverwendet.

4. Zusammenfassung

Es wurde das selektive Laserentschichten und die Oberflächenmaterialdetektion von Partikelrückständen auf Glasträgern untersucht, um den umweltbelastenden nasschemischen Reinigungsschritt im Recyclingprozess zu ersetzen. Dazu wurde ein Versuchsaufbau bestehend aus einer mehrachsigen Vakuum-Chuck, einer Laserscanner-Konfiguration und einem optischen Prozessüberwachungssystem realisiert. Auf dieser Plattform wurden verschiedene Parametersätze getestet, um ein selektives und gleichmäßiges Entschichten unterschiedlicher Schichtzusammensetzungen ohne Beschädigung des Glassubstrats zu erreichen. Die Parameter wurden für die spezifische Bearbeitung einer AuSn-Legierungsschicht auf der Glasträgerkante evaluiert und optimiert. Gleichzeitig kann dieser Prozess durch ein duales Monitoring mittels industrieller Inline-Bildgebung und spektrometrischer Analyse mittels LIBS überwacht und gesteuert werden. Sowohl die Prozessparameter als auch das LIBS-Monitoring konnten für unterschiedliche Zusammensetzungen der Metallschicht angepasst werden, die sich aus alternativen vorherigen Abscheidungsprozessen ergeben. Um den Aufbau in Zukunft noch stärker in den Prozessablauf zu integrieren, wäre eine mögliche Gewinnung, Wiederverwertung und Wiedereinführung in die Wertschöpfungskette des abgetragenen Materials denkbar. Untergebracht in einem industrietauglichen Gehäuse mit der notwendigen Sicherheitsinfrastruktur, kann das System Glasträger aus der Halbleiterindustrie innerhalb einer Minute verarbeiten.

Danksagung

Die Autoren danken der Europäischen Union (Horizon 2020), dem Bundesministerium für Bildung und Forschung und dem Sächsischen Staatsministerium für Wirtschaft, Arbeit und Verkehr für die finanzielle Förderung im Rahmen der Fördernummern

16MEE0089S/16MEE0104S/16MEE0082S.

Kontakt Daten

Westfälische Hochschule Zwickau (WHZ)

Kornmarkt 1, 08056 Zwickau

Clemens Richter

Clemens.Richter@fh-zwickau.de

Literaturverzeichnis

- [1] Gary R Trott and Aric Shorey. "Glass wafer mechanical properties: A comparison to silicon". In: 2011 6th International Microsystems, Packaging, Assembly and Circuits Technology Conference (IMPACT). IEEE. 2011, pp. 359–362.
- [2] Aric Shorey, Bor Kai Wang, and Rachel Lu. "Glass carrier wafers for the silicon thinning process for stack IC applications". In: 2013 IEEE 63rd Electronic Components and Technology Conference. IEEE, May 2013. doi: 10.1109/ectc.2013.6575807.
- [3] Tobias Baselt et al. Verfahren zur Entfernung von Werkstoffen eines Substrats mittels elektromagnetischer Strahlung. Patent DE102019212400B4. 2019.
- [4] Tobias Baselt et al. Vorrichtung zum selektiven Materialabtrag an Strukturelementen oder Schichten, die auf Oberflächen von Substraten ausgebildet sind. Patent DE1020222030567A1. 2022.
- [5] Andrzej W. Miziolek, Vincenzo Palleschi, and Israel Schechter, eds. Laser-Induced Breakdown Spectroscopy (LIBS). Cambridge University Press, 2006. doi: 10.1017/cbo9780511541261.
- [6] Kyuseok Song, Yong-Il Lee, and Joseph Sneddon. "Applications of Laser-Induced Breakdown Spectrometry". In: Applied Spectroscopy Reviews 32.3 (Aug. 1997), pp. 183–235. doi: 10.1080/05704929708003314.
- [7] Celio Pasquini et al. "Laser Induced Breakdown Spectroscopy". In: Journal of the Brazilian Chemical Society 18.3 (2007), pp. 463–512. doi: 10.1590/s0103-50532007000300002.
- [8] Alexander Ohnesorge. "Bestimmung des Aufmischungsgrades beim Laser-Pulver-Auftragschweißen mittels laserinduzierter Plasmaspektroskopie (LIPS)". German. PhD thesis. Dresden, 2009.
- [9] Alexander Kramida and Yuri Ralchenko. NIST Atomic Spectra Database, NIST Standard Reference Database 78. en. 1999. doi: 10.18434/T4W30F.
- [10] James C. Ehrhardt and Sumner P. Davis. "Precision Wavelengths and Energy Levels in Gold_". In: Journal of the Optical Society of America 61.10 (Oct. 1971), p. 1342. doi: 10.1364/josa.61.001342.
- [11] W.F. Meggers. "First spectrum of tin". In: Journal of Research of the National Bureau of Standards 24.2 (Feb. 1940), p. 153. doi: 10.6028/jres.024.005.