

# Hochleistungs-Mikrobearbeitung von Halbleitern und Metallen mit Ultrakurzpulslasern im kW-Bereich

Für die Hochleistungs-Mikrobearbeitung von Siliziumwafern wurde im Rahmen des EU-Projekts HIPERDIAS sowohl eine neuartige Ultrakurzpuls-Laserstrahlquelle mit mittlerer Leistung über 1 kW als auch der Bearbeitungsprozess für qualitativ hochwertige Oberflächen bei gleichzeitig hohem Durchsatz entwickelt. Neben einer rekordverdächtigen Abtragsrate von 3,8 mm<sup>3</sup>/s bei geringer Rauheit  $S_a < 0,6 \mu\text{m}$  konnte erstmalig Hochleistungs-Mikrobearbeitung mit über 1 kW mittlerer Laserleistung bei Laserpulsen mit Sub-Pikosekunden Pulsdauer demonstriert werden.

Aufgrund des geringen und lokalen Wärmeeintrags ermöglicht die Mikrobearbeitung mit Ultrakurzpulslasern die Erzeugung von technischen, qualitativ hochwertigen Oberflächen mit geringer Rauheit und minimierter Schmelzebildung. Für einen Einsatz der Laser-Mikrobearbeitung in Prozessen mit größeren Bearbeitungsvolumina wie z. B. der Nachbearbeitung von additiv gefertigten Metallbauteilen zur Verbesserung der Formgenauigkeit und Oberflächenqualität [1] und Entfernung beschädigter Bereiche bei der Reparatur von CFK-Bauteilen [2] ist eine schnelle und lokale Entfernung des Materials notwendig. In der Vergangenheit wurde die Einsatzmöglichkeit der Laser-Mikrobearbeitung in vielen potenziellen Anwendungen aufgrund der geringen verfügbaren mittleren Laserleistung und daraus resultierenden geringen Durchsätzen begrenzt. Durch die Entwicklung von Strahlquellen im kW Bereich in der jüngeren Vergangenheit entstehen nun neue Herausforderungen bei der Umsetzung der hohen Laserleistung in hohe Qualität bei gleichzeitig hohen Durchsätzen. Um sich diesen Herausforderungen zu widmen, wurde am IFSW deshalb ein Applikationslabor für Ultrakurzpulslaser mit mittlerer Leistung im kW Bereich eingerichtet [3]. Zusätzlich wurde im

Rahmen des EU-Projekts „HIPERDIAS“ sowohl eine neuartige Laserstrahlquelle als auch der Bearbeitungsprozess für die Hochleistungs-Mikrobearbeitung von Silizium mit einem kW-UKP-Laser entwickelt. Die Strahlquelle wurde am IFSW entwickelt und aufgebaut und emittierte bei einer Wellenlänge von 1030 nm und einer Strahlqualität von  $M^2 < 1,5$  Laserpulse mit Pulsdauer  $< 600 \text{ fs}$  [4]. Der linear polarisierte Laserstrahl wurde mittels Umlenkspiegel in eine Bearbeitungsstation gelenkt. Nach der Fokussieroptik mit einer Brennweite von 580 mm und einem Galvanometer-Scanner zur schnellen Strahlableitung konnte eine maximal verfügbare mittlere Leistung von 1010 W auf dem Werkstück gemessen werden. Der Laser wurde bei einer Repetitionsrate von 500 kHz betrieben, was einer maximal verfügbaren Einzelpulsenergie von 2,02 mJ entspricht. Die Einzelpulsenergie konnte durch Einstellen des Burstmodus gleichmäßig auf fünf Sub-Pulse innerhalb eines Burstzugs mit einem zeitlichen Abstand von jeweils 23 ns verteilt werden. Der minimale Strahldurchmesser auf der Werkstückoberfläche mit der Fokusslage auf der Werkstückoberfläche betrug etwa 90  $\mu\text{m}$ . Die Prozessentwicklung wurde an Umgebungsatmosphäre auf der polierten Seite von ein-

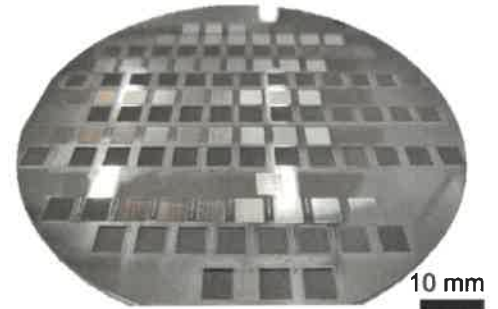


Abbildung 1: Mit ultrakurzen Laserpulsen strukturierter Siliziumwafer

seitig polierten Siliziumwafern (Durchmesser 100 mm, Dicke 1 mm) durchgeführt. Zur Erzeugung von Kavitäten wurden Quadrate von 5 x 5 mm<sup>2</sup> entlang paralleler Versatzlinien gescannt. Abbildung 1 zeigt beispielhaft die resultierenden Oberflächen nach der Laser-Mikrobearbeitung bei verschiedenen Bearbeitungsparametern. Um die Tiefe der Kavitäten zu erhöhen, wurden mehrere Scans über dieselben Quadrate durchgeführt.

Bei der Bearbeitung mit der Fokusslage auf der Werkstückoberfläche resultierte bei 950 W mittlerer Laserleistung eine Laserfluenz  $F$  (Energiedichte) pro Sub-Puls von 12 J/cm<sup>2</sup> auf dem Werkstück und liegt damit Faktor 120 über der Abtragsschwelle von 0,1 J/cm<sup>2</sup>. Die Bearbeitung mit hohen Laserfluenzen verursachte eine hohe Rauheit  $S_a = 16,6 \mu\text{m}$  sowie Nanorisse und Schmelzeanhäufungen auf der Oberfläche (Abbildung 2 a)). Zur Reduktion der Laserfluenz  $F$  auf etwa 0,7 J/cm<sup>2</sup> wurde die Fokusslage um etwa vier Rayleighlängen (17 mm) unterhalb der Werkstückoberfläche verschoben, wodurch der Strahldurchmesser auf etwa 370  $\mu\text{m}$  vergrößert wurde. Die Bearbeitung mit geringer Laserfluenz verursachte eine signifikant reduzierte Rauheit  $S_a = 3,6 \mu\text{m}$ , allerdings waren Nanorisse und erstarrte Schmelze noch immer auf der Oberfläche auszumachen (Abbildung 2 b)). Aufgrund des vergrößerten Strahl-

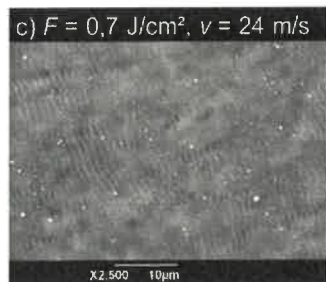
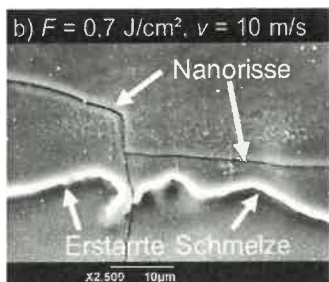
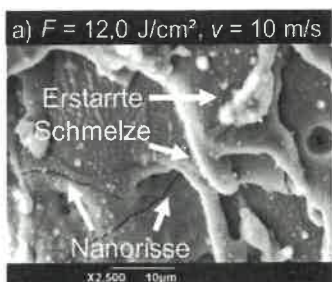
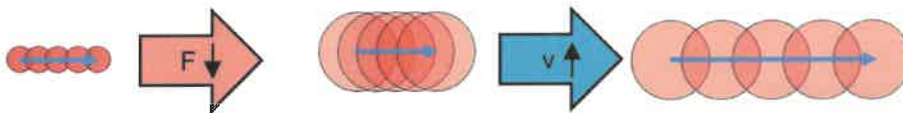


Abbildung 2: Bearbeitungsstrategien und resultierende Oberflächenstruktur bei der Mikrobearbeitung von Silizium mit ultrakurzen Laserpulsen und 950 W mittlerer Laserleistung.

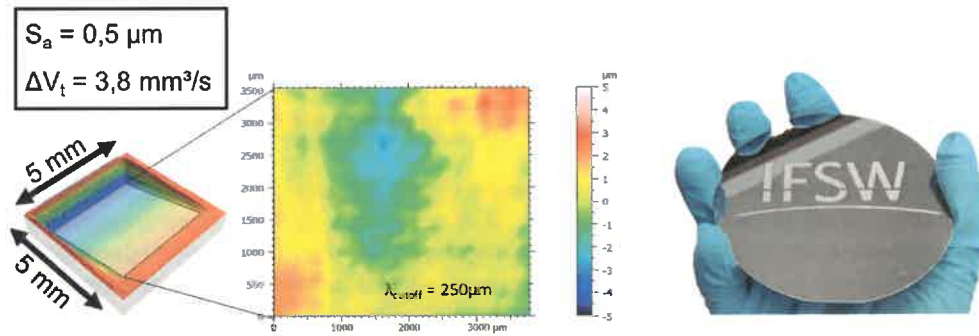


Abbildung 3: Hochwertige 3D-Mikrobearbeitung und großflächige Oberflächenstrukturierung von Silizium mit ultrakurzen Laserpulsen und 1,01 kW mittlerer Laserleistung.

durchmessers bei konstanter Scangeschwindigkeit  $v$  von 10 m/s über das Werkstück kam es zu einer erhöhten Puls-zu-Puls Wärmeakkumulation und Überhitzung der Oberfläche. Mit der Steigerung der Scangeschwindigkeit  $v$  auf 24 m/s konnte die Rauheit auf  $S_a = 0,4 \mu\text{m}$  weiter reduziert und Oberflächendefekte wie Nanorisse und Schmelzbildung vollständig vermieden werden. Die resultierende Oberfläche mit feiner Riffelstruktur ist in Abbildung 2 c) dargestellt. Ausführlichere Untersuchungen und Zusammenhänge zum Einfluss der Bearbeitungsparameter auf die Oberflächenqualität und Abtragsrate bei der Mikrobearbeitung von Silizium sind in [5] und [6] veröffentlicht.

Bei 1,01 kW mittlerer Laserleistung konnte mit der Bearbeitungsstrategie aus geringer Laserfluenz und hoher Scangeschwindigkeit die hochwertige 3D-Mikrobearbeitung anhand einer keilförmigen Geometrie mit einer Fläche von  $5 \times 5 \text{ mm}^2$  und kontinuierlicher Tiefenzunahme bis über  $300 \mu\text{m}$  Abtrags-tiefe gezeigt werden (Abbildung 3 links). Die geringe mittlere Rauheit von  $S_a = 0,6 \mu\text{m}$  und Peak-to-Valley Rauheit von  $5,7 \mu\text{m}$  über die gesamte Keilfläche demonstrieren eine hohe Bearbeitungsqualität und damit einen möglichen Ein-

satz in Applikationen mit hohen Anforderungen an die Oberflächengüte. Gleichzeitig wurde ein für die Mikrobearbeitung rekordverdächtiger Durchsatz mit einer sehr hohen Abtragsrate von  $3,8 \text{ mm}^3/\text{s}$  bzw.  $230 \text{ mm}^3/\text{min}$  erreicht und entspricht damit einer Zunahme von etwa Faktor 440 bei vergleichbaren Oberflächengüten. Aufgrund des großen Bearbeitungsfelds von  $300 \times 300 \text{ mm}^2$  konnten auch großflächige und hochwertige Oberflächenstrukturierungen auf Siliziumwafern hergestellt werden (Abbildung 3 rechts).

Die Vereinbarkeit von hoher Qualität bei gleichzeitig hohem Durchsatz bei der Mikrobearbeitung mit Ultrakurzpulslasern im kW Bereich ist mit der entwickelten Bearbeitungsstrategie dabei nicht auf Silizium begrenzt. Die Anwendung auf den weit verbreitet eingesetzten Metallen Edelstahl, Kupfer und Aluminium zeigte vergleichbare Ergebnisse zu Silizium mit einer feinen Riffelstruktur auf der Oberfläche sowie Rauheiten  $S_a$  im Bereich um  $1 \mu\text{m}$  bei Abtragsraten von  $2 \text{ mm}^3/\text{s}$  bis  $3 \text{ mm}^3/\text{s}$  (Abbildung 4). Die hier dargestellten Ergebnisse zeigen das große Potenzial von Ultrakurzpulslasern hoher mittlerer Leistung bei der qualitativ hochwertigen Mikrobearbeitung von Halbleitern und Metallen mit

hohen Durchsätzen. Zukünftige Forschungsthemen in diesem Zusammenhang sind dabei die Erarbeitung von Strategien und Entwicklung von Technologien zur Umsetzung der hohen Leistungen auf dem Werkstück für Anwendungen mit kleineren Zielgeometrien, beispielsweise mittels Strahlformung und Strahlteilung.

REFERENZEN:

[1] D. Holder, A. Leis, M. Buser, R. Weber, and T. Graf, High-quality net shape geometries from additively manufactured parts using closed-loop controlled ablation with ultrashort laser pulses, *Advanced Optical Technologies* 9, 101–110 (2020).  
 [2] D. Holder, M. Buser, S. Boley, R. Weber, and T. Graf, Image processing based detection of the fibre orientation during depth-controlled laser ablation of CFRP monitored by optical coherence tomography, *Materials & Design* 203, 109567 (2021).  
 [3] A. Peter and V. Onuseit, Applikationslabor für ultrakurzgepulste Laser mit mittlerer Leistung im kW Bereich, *Laser Magazin* 3 (2020).  
 [4] C. Röcker, A. Loescher, M. Delaigue, C. Hönninger, E. Mottay, T. Graf, and M. A. Ahmed, Flexible Sub-1 ps Ultrafast Laser Exceeding 1 kW of Output Power for High-Throughput Surface Structuring, in *Laser Congress 2019 (ASSL, LAC, LS&C) (OSA), AM4A.2*.  
 [5] D. Holder, R. Weber, C. Röcker, G. Kunz, D. Bruneel, M. Delaigue, T. Graf, and M. A. Ahmed, High-quality high-throughput silicon laser milling using a 1 kW sub-picosecond laser, *Optics letters* 46, 384–387 (2021).  
 [6] D. Holder, R. Weber, C. Röcker, G. Kunz, D. Bruneel, M. Delaigue, T. Graf, and M. A. Ahmed, Scaling the throughput of high-quality silicon laser micro-machining, *Lasers in Manufacturing Conference* (2021).

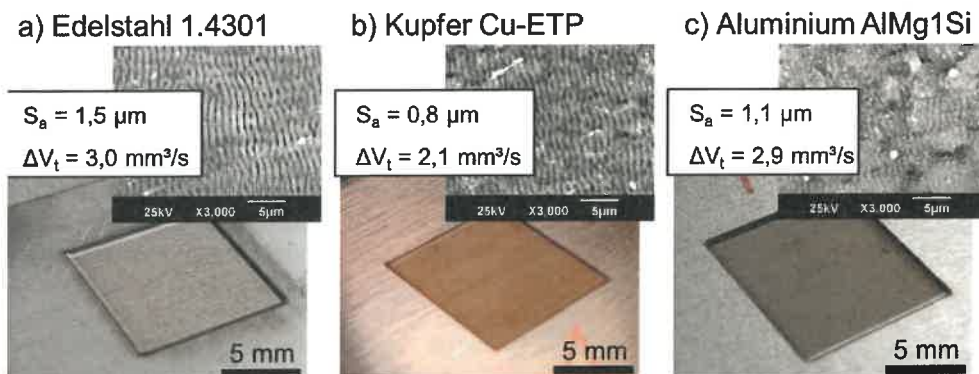


Abbildung 4: Hochwertige Mikrobearbeitung von a) Edelstahl, b) Kupfer und c) Aluminium bei gleichzeitig hohen Durchsätzen mit ultrakurzen Laserpulsen und 1,01 kW mittlerer Laserleistung.

**KONTAKT:**  
 Daniel Holder, M. Sc.  
 Institut für Strahlwerkzeuge (IFSW)  
 Pfaffenwaldring 43  
 70569 Stuttgart  
 Tel.: +49 (0)711 685 69740  
 daniel.holder@ifsw.uni-stuttgart.de  
 www.ifsw.uni-stuttgart.de

apl. Prof. Dr. Rudolf Weber  
 Institut für Strahlwerkzeuge (IFSW)  
 Pfaffenwaldring 43  
 70569 Stuttgart  
 Tel.: +49 (0)711 685 66844  
 rudolf.weber@ifsw.uni-stuttgart.de  
 www.ifsw.uni-stuttgart.de