

Mikromaterialbearbeitung mit ultrakurzen Laserpulsen

Stefan Nolte¹, Matthias Will¹, Andreas Tünnermann

¹Friedrich-Schiller-Universität Jena, Institut für Angewandte Physik



Stefan Nolte



Matthias Will



Andreas Tünnermann

Einleitung

Die Mikromaterialbearbeitung gewinnt mit der zunehmenden Miniaturisierung von Komponenten und Baugruppen immer mehr an Bedeutung. Jedoch sind der Herstellung kleiner Strukturen mit Mikrometer- oder sogar Nanometergenauigkeit heutzutage enge Grenzen gesetzt. Insbesondere die hochflexible Strukturierung mit Hilfe von Laserstrahlung scheitert im Allgemeinen – trotz entsprechender Fokussierbarkeit der Strahlung – an dem hohen Wärmeintrag in das Werkstück.

Wechselwirkung ultrakurzer Laserpulse mit Materie

Thermische oder mechanische Schäden lassen sich minimieren bzw. vermeiden, wenn ultrakurze Laserpulse mit Pulsdauern unterhalb weniger Piko- oder sogar im Femtosekundenbereich eingesetzt werden (Abb. 1). Bei geeigneter Wahl der Bearbeitungsparameter ist so eine nahezu schmelzfreie Bearbeitung aller Werkstoffe mit entsprechender Präzision möglich.

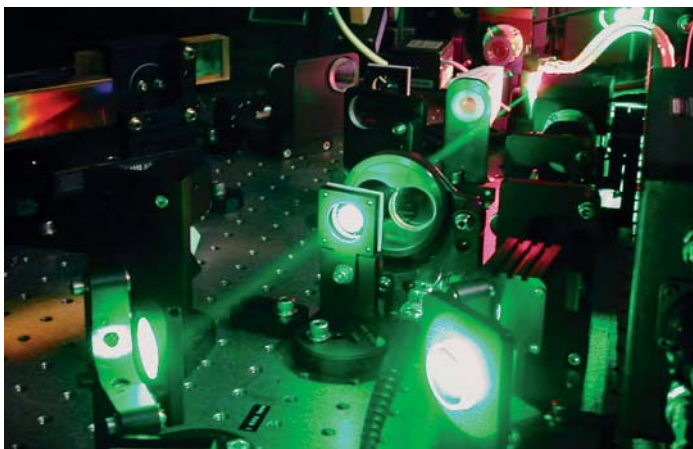


Abb.1:
Detailaufnahme eines Ultrakurzpulslasersystems.

Fig. 1:
Detail of an ultra-short pulse laser system.

Dies liegt an der Wechselwirkung zwischen Laserstrahlung und Materie, die sich deutlich von der Bearbeitung mit langen Pulsen unterscheidet. Bei der Bearbeitung von Metallen koppeln ultrakurze Pulse direkt an die freien Elektronen, bei Halbleitern oder Dielektrika werden zunächst freie Ladungsträger durch Multiphotonenabsorption erzeugt, die dann weiter Laserstrahlung absorbieren und durch Stöße neue freie Elektronen erzeugen (Avalancheionisation). Erst nach dem Laserpuls kommt es zu einem schnellen Energieübertrag an das Festkörpergitter, was schließlich zur Sublimation und Plasmabildung führt. Diese Prozesse verlaufen schnell im Vergleich zu Wärmeleitungsprozessen. Entsprechend können sehr feine Strukturen in praktisch allen Materialien ohne eine thermische Beeinflussung des Werkstücks eingebracht werden.

Anwendungen

Seit Mitte der neunziger Jahre wurden grundlegende Untersuchungen zur Ablation mit ultrakurzen Laserpulsen durchgeführt /1/, /2/, /3/. Mittlerweile ist die Prozessentwicklung so weit fortgeschritten, dass sich fertigungsrelevante Bauteile mit entsprechend hoher Präzision strukturieren lassen (Abb. 2) /4/, /5/.

Micro-materials processing using ultrashort laser pulses

Stefan Nolte¹, Matthias Will¹, Andreas Tünnermann

¹Friedrich-Schiller-Universität Jena, Institut für Angewandte Physik

Introduction

Micro-materials processing is gaining more and more importance due to the increasing miniaturization of components and devices. However, the availability of techniques for the manufacture of fine structures with micrometer or even nanometer precision are limited. Particularly the use of laser radiation for highly flexible structuring – although focusable to micron spot size – fails in general due to the high heat generation within the workpiece.

Interaction of ultra short laser pulses with matter

However, thermal or mechanical damage can be minimized or even avoided through the use of ultrashort laser pulses with a duration of a few picoseconds or in the femtosecond regime (Fig. 1). The choice of appropriate parameters enables an almost melting-free processing of all materials at the highest level of precision.

The reason for this can be found in the interaction process between the laser radiation and the workpiece which differs significantly from long pulse processing. In case of metals the laser radiation is directly coupled to the free electrons. For the processing of semiconductors or dielectrics free electrons are generated by multi-photon absorption in the initial step. These electrons are then accelerated in the laser field and generate more free electrons by impact ionization (avalanche ionization).

After the laser pulse a fast energy transfer to the lattice takes place, resulting in sublimation and plasma generation. These processes are fast compared to typical time-scales for heat diffusion. As a consequence, fine structures can be generated in practically any material without thermal influence.

Applications

Basic investigations on ablation using ultrashort laser pulses have been performed since the mid 1990s /1/, /2/, /3/. Meanwhile, the progress in process development allows for the structuring of real components with the appropriate precision (Fig. 2) /4/, /5/.

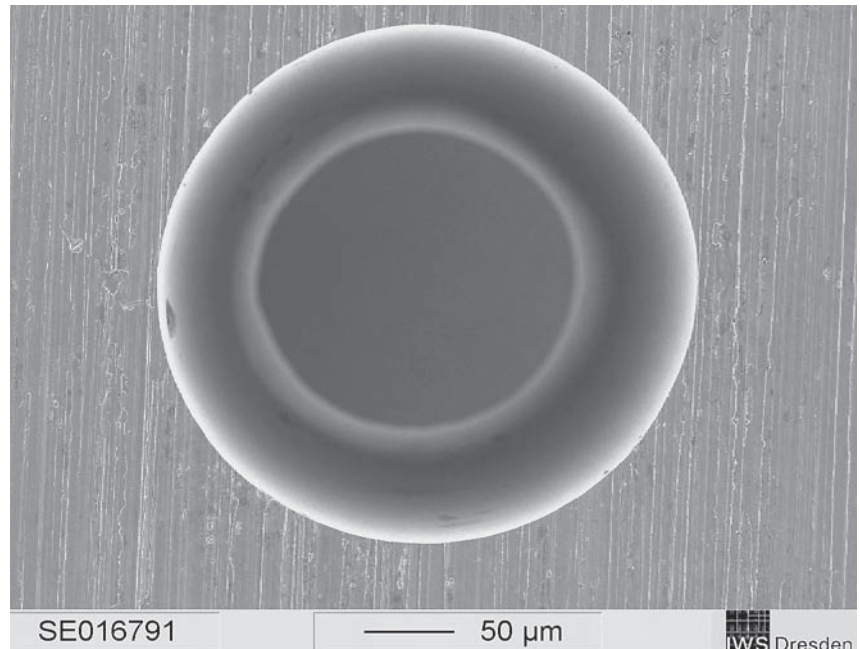


Abb. 2:
Bohrung in 1 mm Chrom-Nickel-Stahl (Durchmesser 300 µm).
Weder Aufschmelzungen noch Gefügeveränderungen sind zu beobachten.

Fig. 2:
Hole drilled in 1 mm stainless steel (diameter 300 µm).
Neither a melt recast layer nor structural damages are visible.

Neben der klassischen Lasermaterialbearbeitung erlauben Ultrakurzpuls-lasersysteme aber auch völlig neue Anwendungen, so können z. B. optische Eigenschaften gezielt verändert werden.

Dazu wird die Laserstrahlung in das Volumen transparenter Materialien fokussiert. Aufgrund der hohen Intensitäten kommt es im Fokus durch Mehrphotonen- und Avalancheprozesse zur lokalen Energieabsorption, woraus ein optischer Durchbruch und die Bildung eines Mikroplasmas resultiert. In der Folge kommt es zu Bindungsbrüchen und zur Ausbildung von Spannungen, die zu einer lokalen permanenten Veränderung des Brechungsindex führen. Durch Bewegen des Fokus lassen sich so ausgedehnte Strukturen erzeugen (Abb. 3), in denen Licht geführt werden kann. So lassen sich z. B. vergrabene Wellenleiter im Inneren verschiedenster transparenter Gläser und Kristalle schreiben (Abb. 4) /6/.

Durch entsprechende Fokusbewegung können leicht dreidimensionale Wellenleiterstrukturen erzeugt werden /7/, wodurch sich einerseits die Packungsdichte optischer Funktionen erhöhen und Kreuzungspunkte vermeiden, aber auch völlig neuartige integriert-optische Bauelemente realisieren lassen /8/.

Ausblick

Derzeit scheidet eine wirtschaftliche industrielle Umsetzung dieser Technologie im Allgemeinen noch an der Komplexität und der relativ geringen Leistung kommerzieller Ultrakurzpuls-laser. Alternative Laserkonzepte, z. B. auf Faserbasis, die eine deutliche Steigerung der mittleren Leistung erlauben, befinden sich aber in der Entwicklung /9/.

Literatur:

- /1/ Stuart, B. C.; Feit, M. D.; Herman, S.; Rubenchik, A. M.; Shore, B. W.; Perry, M. D.: „Optical ablation by high-power short-pulse lasers“, J. Opt. Soc. Am. B 13 (1996) 459.
- /2/ Chichkov, B.N.; Momma, C.; Nolte, S.; von Alvensleben, F.; Tünnermann, A.: „Femtosecond, picosecond and nanosecond laser ablation of solids“, Appl. Phys. A 63 (1996) 109.
- /3/ Nolte, S.; Momma, C.; Jacobs, H.; Tünnermann, A.; Chichkov, B. N.; Wellegehausen, B.; Welling, H.: „Ablation of metals by ultrashort laser pulses“, J. Opt. Soc. Am. B 14 (1997) 2716.
- /4/ Willert, M.; Nolte, S.; Tünnermann, A.: „Einfluss der Laserpulsdauer auf die Qualität von Präzisionsbohrungen“, Thüringer Werkstofftag 2002.
- /5/ Willert, M.: „Strukturierung von metallischen Werkstoffen mit Laserstrahlung unter Vermeidung von Gefügeveränderungen“, Dissertation Friedrich-Schiller-Universität Jena 2003, Bosch Schriftenreihe.
- /6/ Davies, K. M.; Miura, K.; Sugimoto, N.; Hirao, K.: „Writing waveguides in glass with a femtosecond laser“, Opt. Lett. 21 (1996) 1729.
- /7/ Nolte, S.; Will, M.; Burghoff, J.; Tünnermann, A.: „Femtosecond waveguide writing: a new avenue to three-dimensional integrated optics“, Appl. Phys. A 77 (2003) 109.
- /8/ Pertsch, T.; Peschel, U.; Lederer, F.; Burghoff, J.; Will, M.; Nolte, S.; Tünnermann, A.: „Discrete diffraction in two-dimensional arrays of coupled waveguides in silica“, Opt. Lett. 29 (2004) 468.
- /9/ Limpert, J.; Clausnitzer, T.; Liem, A.; Schreiber, T.; Fuchs, H.-J.; Zellmer, H.; Kley, E.-B.; Tünnermann, A.: „High average power femtosecond fiber CPA system“, Opt. Lett. 28 (2003) 1984.

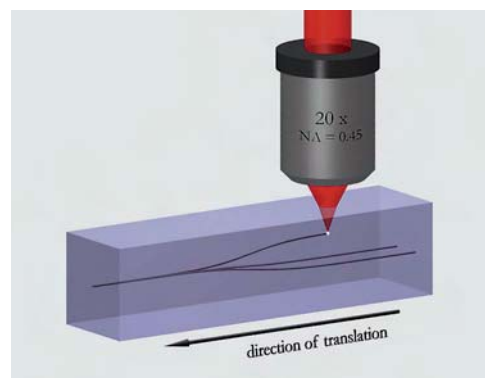


Abb. 3:
Schematische Darstellung des direkten Schreibens von Wellenleitern im Volumen transparenter Festkörper.

Fig. 3:
Schematic diagram of the direct writing of optical waveguides within the volume of transparent solids.

In addition to classical materials processing, ultrashort pulse laser systems open up completely new applications, e.g. the specific alteration of optical properties by directly focusing intense laser radiation inside the volume of a transparent substrate.

Nonlinear absorption of the laser energy in the focal volume takes place leading to an optical breakdown and the formation of a micro-plasma. This induces stress and permanent structural changes resulting in a modification of the refractive index. It is therefore possible to generate light-guiding structures by moving the laser focus (Fig. 3). Using this technique optical waveguides buried inside various transparent glasses and crystals can be manufactured (Fig. 4) /6/.

Through the appropriate movement of the focus position true three-dimensional waveguiding structures can be generated easily /7/. This allows not only for an increase of the packaging density of optical functions and the avoidance of crossings, but also for the realization of completely new integrated optical devices /8/.

Outlook

An economical industrial use of this technology is currently hindered by the complexity and limited available power of today's commercial ultrashort pulse laser systems. However, alternative laser concepts such as those based on optical fibers, which promise a significant improvement of the average power, are under development /9/.

References:

- /1/ Stuart, B. C.; Feit, M. D.; Herman, S.; Rubenchik, A. M.; Shore, B. W.; Perry, M. D.: „Optical ablation by high-power short-pulse lasers”, *J. Opt. Soc. Am. B* 13 (1996) 459.
- /2/ Chichkov, B.N.; Momma, C.; Nolte, S.; von Alvensleben, F.; Tünnermann, A.: „Femtosecond, picosecond and nanosecond laser ablation of solids”, *Appl. Phys. A* 63 (1996) 109.
- /3/ Nolte, S.; Momma, C.; Jacobs, H.; Tünnermann, A.; Chichkov, B. N.; Wellegehausen, B.; Welling, H.: „Ablation of metals by ultrashort laser pulses”, *J. Opt. Soc. Am. B* 14 (1997) 2716.
- /4/ Willert, M.; Nolte, S.; Tünnermann, A.: „Einfluss der Laserpulsdauer auf die Qualität von Präzisionsbohrungen”, Thüringer Werkstofftag 2002.
- /5/ Willert, M.: „Strukturierung von metallischen Werkstoffen mit Laserstrahlung unter Vermeidung von Gefügeveränderungen”, Dissertation Friedrich-Schiller-Universität Jena 2003, Bosch Schriftenreihe.
- /6/ Davies, K. M.; Miura, K.; Sugimoto, N.; Hirao, K.: „Writing waveguides in glass with a femtosecond laser”, *Opt. Lett.* 21 (1996) 1729.
- /7/ Nolte, S.; Will, M.; Burghoff, J.; Tünnermann, A.: „Femtosecond waveguide writing: a new avenue to three-dimensional integrated optics”, *Appl. Phys. A* 77 (2003) 109.
- /8/ Pertsch, T.; Peschel, U.; Lederer, F.; Burghoff, J.; Will, M.; Nolte, S.; Tünnermann, A.: „Discrete diffraction in two-dimensional arrays of coupled waveguides in silica”, *Opt. Lett.* 29 (2004) 468.
- /9/ Limpert, J.; Clausnitzer, T.; Liem, A.; Schreiber, T.; Fuchs, H.-J.; Zellmer, H.; Kley, E.-B.; Tünnermann, A.: „High average power femtosecond fiber CPA system”, *Opt. Lett.* 28 (2003) 1984.

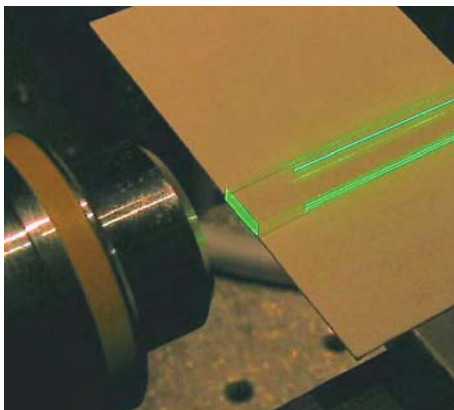


Abb. 4:
Volumenwellenleiter in gebondetem Material mit aktivem (Er/Yb-dotiert) und passivem Bereich. Licht wird in den passiven Teil eingekoppelt, geführt und regt die Fluoreszenz im aktiv dotierten Bereich an.

Fig. 4:
Femtosecond written waveguide in a bonded glass with a doped (Er/Yb) and an undoped region. Pump light is coupled into the device through the undoped region (where it is guided) and excites the fluorescence in the doped region.