
Mikrostrukturierung von Dielektrika und Halbleitern mit ultrakurzen Laserpulsen

Sandra Zoppel^a

^a *FH Vorarlberg, Forschungszentrum Mikrotechnik, Hochschulstraße 1, A-6850 Dornbirn, AUSTRIA*

ABSTRACT

Im Bereich der Materialbearbeitung stehen eine Vielzahl sehr unterschiedlicher Laserstrahlquellen zur Verfügung. Laser, welche im Bereich der Mikro- und Nanotechnologie immer mehr an Bedeutung gewinnen sind ultrakurz gepulste Systeme. Aufgrund der hohen Spitzenintensitäten kann mit diesen Laserquellen nahezu jedes Material bearbeitet werden obwohl deren fundamentale Wellenlänge im Infraroten liegt.

Der nichtthermische Abtragsprozess ermöglicht die Herstellung von Strukturen hoher Auflösung bis in den sub- μm Bereich in einer Vielzahl von Materialien bzw. Schichtsystemen. Ziel des Projektes ist die Entwicklung flexibler Prozesse auf Basis der Laserablation zur Herstellung mikrotechnischer Strukturen bzw. Bauteile im Bereich von MEMs.

Kontakt: Sandra.zoppel@fhv.at

1 EINLEITUNG

Die Wahl des geeigneten Lasersystems zur Anwendung in der Mikrobearbeitung entscheidet über die Art der Licht-Materie-Wechselwirkung bzw. den physikalischen Vorgang, welcher der Bearbeitung zugrunde liegt. Generell ist die Wellenlänge eine der Hauptkriterien für die Wahl des Systems. Für Materialien mit einer großen Bandlücke wie beispielsweise Gläser ermöglichen Laser mit einer Wellenlänge im UV eine ausreichende Absorption, für längere Wellenlängen sind diese Materialien transparent. Für die Bearbeitung solcher Werkstoffe werden unter anderem Excimerlaser, welche im UV bzw. im tiefen UV emittieren, oder frequenzvervielfachte Festkörperlaser eingesetzt.

Laserquellen, welche in der Materialbearbeitung immer mehr an Bedeutung gewinnen sind ultrakurz gepulste Systeme. Als „ultrakurz“ werden Laserpulse mit einer zeitlichen Dauer von einigen Pikosekunden bis hinunter zu einigen Femtosekunden bezeichnet. Durch die hohen Intensitäten, welche diese Laserquellen ermöglichen, dominieren nichtlineare Absorptionsmechanismen (Multiphotonenabsorption) was dazu führt dass nahezu jedes Material bearbeitet werden kann obwohl die fundamentale Wellenlänge meist im Infraroten liegt (1). Ein weiterer Vorteil liegt in der minimalen thermischen Belastung während der Bearbeitung da der Materialabtrag in einem Zeitfenster geschieht, in dem noch keine signifikante Temperaturdiffusion stattfinden kann (2).

Die Möglichkeit der Mikromaterialbearbeitung mittels Laserablation erstreckt sich unter anderem über die Herstellung von Bohrungen (beliebigen Querschnitts), Schneiden bzw. Vereinzeln von Substraten über Oberflächenstrukturierungen bis hin zur selektiven Ablation von Schichten.

2 LASERSYSTEME UND EXPERIMENTELLER AUFBAU

Die für die Versuche verwendeten Lasersysteme sind SESAM (SEmiconductor Saturable Absorber Mirror) modengekoppelte Festkörperlaser mit regenerativem Verstärker (*femto*REGEN, *pico*REGEN, Fa. High Q Laser). Zum einen wurde ein Nd:Van Laser verwendet, welcher bei einer Wellenlänge von 1064 nm eine Pulsenergie von 300 μJ und eine Pulsdauer von 10 ps vorweist. Des weiteren wurde ein System eingesetzt, welches Pulsdauern von 300 fs bei einer fundamentalen Wellenlänge von 1040 nm und einer Pulsenergie von 100 μJ zur Verfügung stellt. Die Systeme zeichnen sich durch eine sehr hohe Strahlqualität aus ($M^2 < 1.2$), welches einen einfachen optischen Aufbau zur Fokussierung des Strahls erlaubt. Weiters wurde zur Einstellung der Leistung ein stufenlos variabler Abschwächer eingesetzt, welcher durch die Kombination einer Lambda-halbe Platte und einem Polarisator realisiert wurde. Die Probe wurde relativ zum Laserstrahl durch den Einsatz eines motorischen xyz-Tisches bewegt. Das Einbringen eines mechanischen Shutters in den Strahlengang ermöglichte das Ein- und Ausblenden des Strahls synchron zur Bewegung der Linearachsen.

3 STRUKTURIERUNGSVERFAHREN UND ERGEBNISSE

3.1 Laserbohren und -schneiden mittels ultrakurz gepulster Laser

Wie bereits erwähnt erlangen Laser mit einer Pulsdauer im Piko- oder Femtosekundenbereich besondere Bedeutung durch die Möglichkeit, Materialien mit hoher Bandlücke zu bearbeiten. Die hohen Spitzenintensitäten ermöglichen einerseits die Bearbeitung von für die Wellenlänge transparenten Materialien und andererseits minimiert die kurze Pulsdauer die thermische Beeinträchtigung des umliegenden Materials. Als charakteristische Tiefe des Energieeintrages entspricht hier nicht mehr die thermischen Diffusionslänge sondern die optischen Eindringtiefe der Strahlung.

Abbildung 1 zeigt eine Bohrung in PZT-Keramik, ein Material das mit herkömmlichen Verfahren nur sehr schwer bearbeitbar ist. Die Bohrung wurde mit einer Wellenlänge von 1064 nm bei einer Pulsdauer von 10 ps hergestellt. Die Pulswiederholrate in diesem Fall war 1 kHz, die Fluenz betrug 45 J/cm^2 . Die Probe, welche eine Dicke von 400 μm aufweist, konnte in einer Zeit < 10 s durchgebohrt werden.

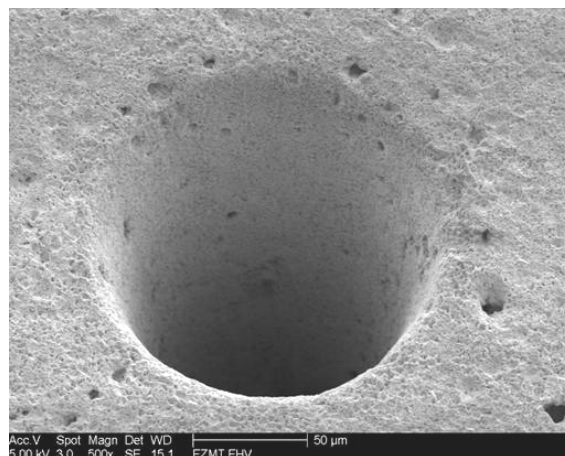


Abbildung 1. Bohrung in PZT-Keramik, $\lambda = 1064$ nm, $\tau = 10$ ps, $f = 1$ kHz, $F = 45$ J/cm^2 , Bearbeitungszeit < 10 s ($t = 400$ μm)

Bei der Bearbeitung mit Pulsdauern im Nanosekunden-Bereich zeigen Keramiken die Tendenz zu Rissbildungen im umliegenden Material. Wie aus Abbildung 1 ersichtlich ist, zeigt der Bereich um die Bohrung keinerlei thermische Einflusszonen; die Seitenwände der Kavität weisen eine hohe Qualität

auf und es ist kein Debris in der unmittelbaren Umgebung der Bohrung erkennbar. Die Bohrung wurde im Trepanierverfahren hergestellt indem der Strahl relativ zum Werkstück bewegt wird.

Ein weiteres Einsatzgebiet des Lasers ist das Vereinzeln bzw. Schneiden von Substraten. Der Vorteil gegenüber herkömmlicher Verfahren liegt in der Möglichkeit, Schnitte beliebiger Geometrien herzustellen. Weiters stellt die Laserbearbeitung ein kontaktfreies Fertigungsverfahren dar, welches keinem mechanischen Verschleiß unterworfen ist. Abbildung 2 zeigt kreisförmige Ausnehmungen, welche in einen 250 μm dicken Siliziumwafer geschnitten wurden. Die Stege zur Fixierung der inneren Ringe weisen lediglich eine Stärke von 100 μm auf. Die Schnitte wurden mit einer Wellenlänge von 1040 nm bei einer Pulsdauer von 300 fs hergestellt. Durch mehrmaliges Überfahren der Schnittkontur erreicht man eine minimale thermische Belastung des Materials auch bei höheren Fluenzen durch die Verteilung der eingebrachten Laserintensität auf eine größere Fläche. Weiters sind die radialen Schneidkanten um ca. 40° nach außen geneigt (d.h. trapezförmiger Ringquerschnitt) was durch konkurrierende Fertigungsverfahren nur sehr schwer umsetzbar ist. Lediglich die Bohrung im Zentrum ist zylindrisch.

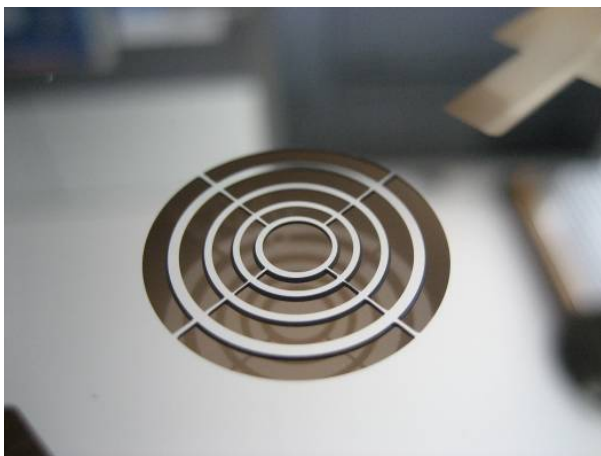


Abbildung 2. Durch Laserschneiden hergestelltes Bauteil aus Silizium Einkristall, Schnitte sind radial um ca. 40° geneigt



Abbildung 3. Zahnrad aus kubischem Siliziumkarbid Einkristall (3C-SiC)

Abbildung 3 zeigt ein Zahnrad mit evolventer Verzahnung aus Siliziumkarbid. Die Wellenlänge des verwendeten Systems war 1040 nm bei einer Pulsdauer von 300 fs. Die Struktur wurde direkt aus einem 400 μm starken Wafer aus einkristallinem kubischen SiC geschnitten. Es handelt sich dabei um ein Halbleitermaterial mit großer Bandlücke (6 eV direkt, 2.36 indirekt (3)) und zeichnet sich durch seine Härte (Moh 9.3) und chemische Resistenz aus, was es zu einem schwer bearbeitbaren Werkstoff machen. Die mit dem Ultrakurzpuls-Laser generierten Schnittkanten weisen eine hohe Oberflächengüte auf, das umliegende Material ist vollkommen gratfrei bzw. zeigt keine thermische Beeinträchtigung.

3.2 Oberflächenstrukturierung

Im Gegensatz zu Bohr- und Schneidaufgaben, wo möglichst hohe Intensitäten eine hohe Bearbeitungsgeschwindigkeit bei guter Schnittqualität ermöglichen, wird zur Herstellung laserstrukturierter Oberflächen in Leistungsbereichen gearbeitet, die knapp oberhalb der Ablationsschwelle liegen. Dies ermöglicht einerseits eine hohe Oberflächenqualität, andererseits können durch eigens gewählte Scanstrategien dreidimensionale Geometrien erarbeitet werden. Durch die geringen Fluenzen im Bereich von einigen J/cm^2 besteht nur ein geringer Materialabtrag pro Laserpuls. Dies wird mit hohen Repetitionsraten kompensiert. Mittlerweile sind Lasersysteme verfügbar welche Repetitionsraten bis zu einem Megahertz liefern bei Pulsenergien die eine Ablation nahe der Abtragsschwelle ermöglichen. Abbildung 4 zeigt eine laserbearbeitete Oberfläche in Glas. Zur Erstellung der Geometrie wurde die

Fläche gescannt wobei der Linienabstand mit $5\ \mu\text{m}$ wesentlich kleiner als der Strahldurchmesser war. Dies ermöglicht die Generierung von glatten Seitenwänden wie sie in der Abbildung deutlich ersichtlich sind.

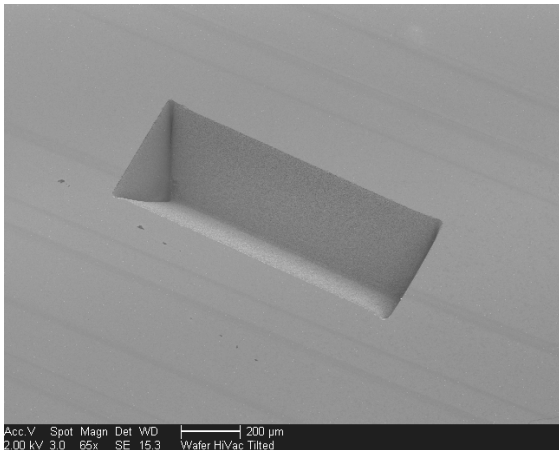


Abbildung 4. Keilförmige Ausnehmungen in Glas hergestellt durch fs-Laserablation

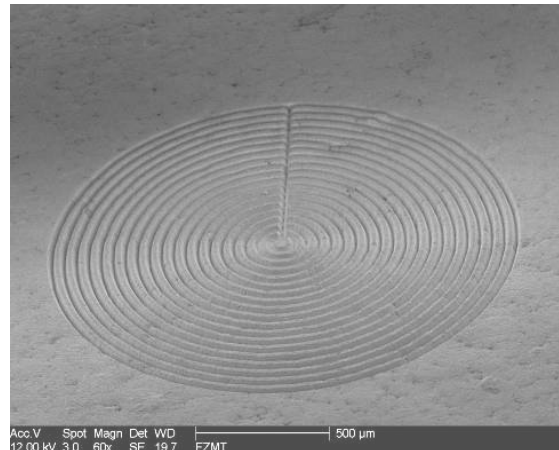


Abbildung 5. Teststrukturen hergestellt in Al_2O_3 -Keramik

Gerade bei Glas zeigt sich der nichtlineare Absorptionsprozess. Standardgläser wie Borosilikat- oder Natron-Kalk-Glas sind in einem Wellenlängenfenster von ca. $300\text{-}3000\ \text{nm}$ nahezu transparent. Durch die kurze Pulsdauer von $300\ \text{fs}$ ist es jedoch auch mit einer Wellenlänge $1040\ \text{nm}$ möglich, solche Materialien mit hoher Präzision zu bearbeiten. Die Seitenwände lassen keine Anzeichen von Aufschmelzungen erkennen und weisen eine hohe Oberflächengüte auf. Die Kanten sind scharf und zeigen keinerlei Absplitterungen oder Rissbildungen. Abbildung 5 zeigt eine Teststruktur, welche in Al_2O_3 Keramik gefertigt wurde. Sie wurde ebenfalls mit einer Wellenlänge von $1040\ \text{nm}$ und einer Pulsdauer von $300\ \text{fs}$ bearbeitet.

3.3 Selektive Bearbeitung von Schichten

Durch die Wahl der geeigneten Strahlintensitäten besteht bei der Laserbearbeitung die Möglichkeit, gezielt einzelne Schichten abzutragen ohne das darunter liegende Substrat zu beschädigen bzw. zu beeinträchtigen. Notwendig dafür ist ein Parameterfenster welches sich unter der Voraussetzung ergibt dass die Schwellfluenz des Substrates höher ist als die der Beschichtung.

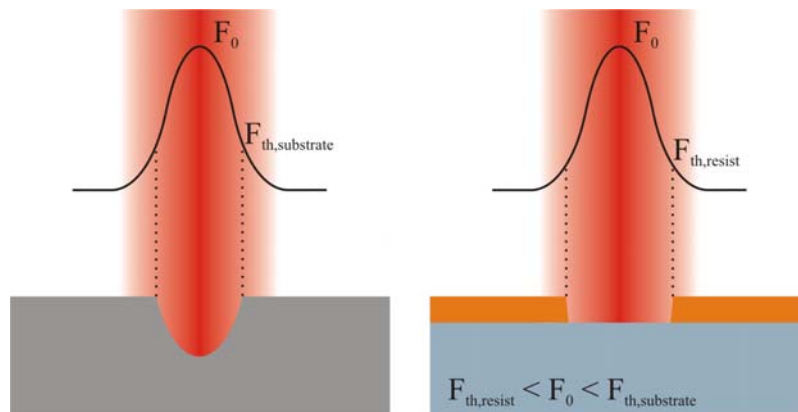


Abbildung 6. Schematische Darstellung der selektiven Ablation im Vergleich zur herkömmlichen Strukturierung

Der Vorteil dieser Methode liegt unter anderem darin, dass das Substrat als „Ätz-stop“ fungiert. Die Strukturtiefe ist aufgrund dessen lediglich von der Dicke der Beschichtung abhängig wie in Abbildung 6 schematisch dargestellt ist. Die für die Arbeiten verwendeten Schichtsysteme basieren vorwiegend auf Glassubstraten, welche eine hohe Ablationsschwelle vorweisen, mit metallischen oder dielektrischen Beschichtungen (z.B. SnO₂, TCO). Die Schwellfluenzen für die Ablation zur Bestimmung des Parameterfensters wurden mit einer Methode nach Liu bestimmt (4).

Die auf diesem Regime basierende Bearbeitung von dicken Fotolackschichten ermöglicht die flexible, maskenlose Herstellung von 2½-dimensionalen Strukturen. Es wurden Versuche mit AZ-Lacken sowie mit SU-8 durchgeführt mit Lackdicken von bis zu 200 µm. Bei den Substraten handelte es sich vorwiegend um Glaswafer (Schott). Die Strukturierungen wurden mit dem Femtosekundensystem bei einer Wellenlänge von 520 nm durchgeführt.

Ein Nebeneffekt, welcher bei der Laserablation kaum vermeidbar ist, ist die Entstehung von Debris. Dieser scheidet sich teilweise in der unmittelbaren Umgebung der Bearbeitungsstelle wieder ab. Aus diesem Grund wurde zusätzlich zur formgebenden Lackschicht ein dünner positiver Lackfilm als Opferschicht aufgebracht. Dieser wird nach der Laserstrukturierung mit dem passenden Entwickler zur Reinigung des Substrates entfernt.

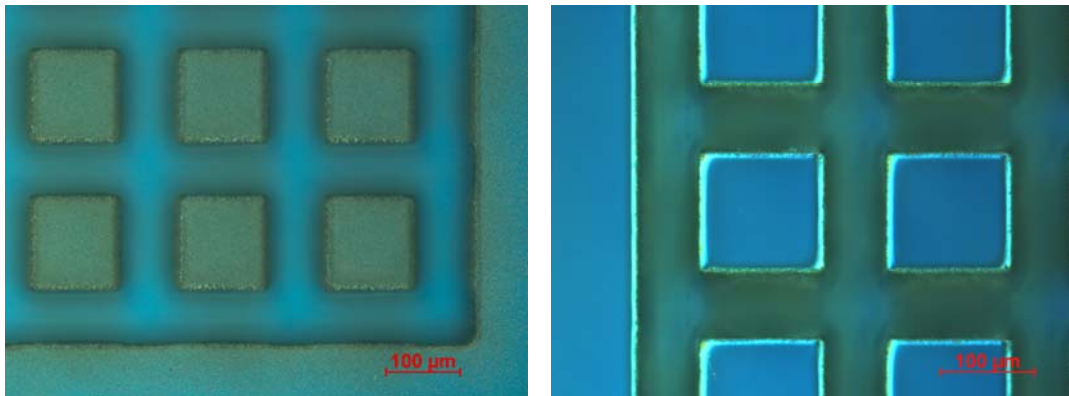


Abbildung 7. zeigt eine Teststruktur vor (a) und nach (b) der Entfernung der dünnen Opferschicht (Lackdicken 41µm + 2µm). Die Ablagerungen können mit dem Lack rückstandsfrei entfernt

Abbildung 7 zeigt die fertige Struktur direkt nach der Bearbeitung (a) und nach der Entfernung der Opferschicht (b). Die durch den Materialabtrag entstandenen Ablagerungen konnten rückstandsfrei entfernt werden ohne den darunterliegenden Lack zu beeinträchtigen. Da beim Materialabtrag der mögliche Fluenzbereich durch die Abtragsschwelle des Substrates zu höheren Werten limitiert ist, besteht ein relativ geringer Materialabtrag pro Puls. Dieser wird durch die hohen Repetitionsraten der Lasersysteme ausgeglichen. Weiters erhöht sich, wie bei der Oberflächenstrukturierung, die Bearbeitungsqualität bei der Verwendung von niedrigen Intensitätswerten. Die Oberflächengüten sind bei der selektiven Ablation höher im Vergleich zur herkömmlichen Strukturierung. Messungen mit dem Weißlichtinterferometer ergeben an der Grundfläche der Struktur (Lack-Glas-Grenzfläche) eine mittlere Oberflächenrauigkeit bis zu $R_a < 0.01 \mu\text{m}$. Im Vergleich dazu erreicht die strukturierte Fläche, welche mit denselben Parametern bearbeitet wurde, ohne Substrat als Ätzstop eine Rauigkeit von $R_a = 0.79 \mu\text{m}$.

Durch galvanische Abscheidung wurde aus dem strukturierten Fotolack eine metallische Negativform aus Nickel hergestellt. Diese kann für abformende Verfahren zur Vervielfältigung des Bauteiles unter anderem in Polymere oder Keramiken eingesetzt werden. Abbildung 8a zeigt eine Aufnahme mittels Weißlichtinterferometer einer bearbeiteten und gereinigten Lackschicht, in 8b ist die aus dieser Struktur hergestellte Nickelmatrize dargestellt. Dafür wurde vor dem Galvanikprozess durch sputtern

eine 200 nm dünne Startschicht aus Titan abgeschieden. Der Durchmesser des innersten Kreises in 8a beträgt 170 μm .

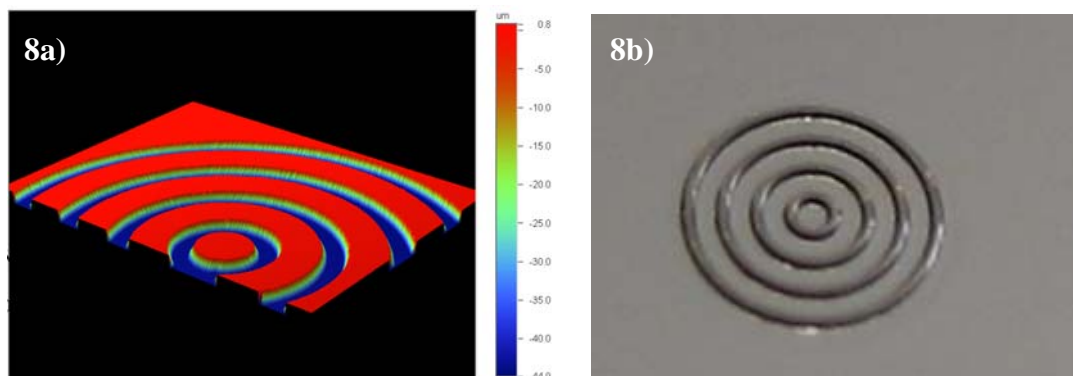


Abbildung 8. Teststruktur in Fotolack selektiv strukturiert mit einer Wellenlänge von 520 nm und einer Pulsdauer von 300 fs; 8a zeigt eine Aufnahme der Struktur mittels Weißlichtinterferometer, 8b eine Kameraaufnahme der über galvanische Nickelabscheidung hergestellten Negativform derselben Struktur

Wie aus Abbildung 8a ersichtlich ist weisen die Seitenkanten der ausgearbeiteten Kavitäten eine leichte Kantenschräge auf. Sie kommt durch die Gaußsche Intensitätsverteilung des Laserstrahls zustande. Dies kann von Vorteil sein wenn die Strukturen, wie vorher beschrieben, für abformende Verfahren eingesetzt werden. In diesem Fall fungiert die aus dem Prozess entstandene Neigung der Kanten als Entformungshilfe und ermöglicht dadurch einen stabileren Prozess.

4 DISKUSSION UND SCHLUSSFOLGERUNGEN

Der Einsatz von ultrakurz gepulsten Laserstrahlquellen bietet eine flexible und schnelle Methode zur Herstellung von Mikrostrukturen bzw. Bauteilen. Durch die speziellen Eigenschaften dieser Laserpulse können Materialien wie z.B. SiC bearbeitet werden, die mit herkömmlichen Verfahren nur sehr schwer bearbeitbar sind. Es wurden Prozesse zur Oberflächenstrukturierung ebenso wie zum Bohren, Schneiden und zur Schichtstrukturierung umgesetzt. Die dabei verwendeten Materialien sind meist Halbleiter oder Isolatoren, bei welchen die konkurrierenden Verfahren entweder an ihre Grenzen stoßen oder nur durch kostspielige Anlagen umzusetzen sind.

REFERENZEN

- [1] Feit, M.D., Komashko, A.M., Rubenchik, A.M. (2004): Ultra-short pulse laser interaction with transparent dielectrics, *Appl. Phys. A*, 79, 1657-1661.
- [2] Bäuerle, D. (2000): *Laser processing and chemistry*. Springer, Berlin.
- [3] Dalven, R. (1965): *J. Phys. Chem. Solids* 26, 439
- [4] Liu, J.M., (1982): Simple technique for measurements of pulsed Gaussian-beam spot sizes. *Opt. Lett.*, 7(5), 196-198.