

Femtosekunden-Faserlaser für die Materialbearbeitung

Hans-Erik Swoboda, Horiba Jobin Yvon GmbH, Bensheim

Die sehr kurzen Pulse von Femtosekunden-Lasern erlauben präzise Materialbearbeitung und haben daher großes Potential z.B. für die Mikro- und Nano-Bearbeitung. Die niedrige mittlere Leistung sowie die niedrige Repetitionsrate dieser Laser schränken die kommerzielle Anwendung jedoch ein. Erste Ergebnisse aus dem Applikationslabor zeigen den fs-Laser auf Faserbasis als potentielle Alternative.

Femtosekunden-Verstärkersysteme ($1\text{ fs} = 10^{-15}\text{ s}$) auf Basis der CPA-Technologie (Chirped Pulse Amplification) [1], bei der die Pulse zunächst gestreckt und nach der Verstärkung wieder komprimiert werden, haben seit ihrer kommerziellen Einführung zu Beginn der 90er Jahre eine weite Verbreitung gefunden. Vor allem in der Grundlagenforschung wird die Pulslänge als Maßstab für die Messung extrem schneller Vorgänge in den unterschiedlichsten Systemen genutzt. Die Genauigkeit des entstehenden Messsystems ist nur durch die Länge der Pulse begrenzt, zudem arbeitet es schneller als jeder konventionelle Detektor.

Parallel dazu wurden fs-Laser schon früh im Bereich der Materialbearbeitung eingesetzt, wie zahlreiche Literaturstellen zeigen, z.B. [2]. Bei dieser Anwendung wird neben der Kürze der Pulse auch ihre extrem hohe Intensität ausgenutzt. Diese beiden Eigenschaften zusammen ermöglichen eine „kalte“ Bearbeitung der Materialien, da die Wechselwirkung zwischen Laserpuls und bearbeitetem Material auf einer sehr viel kürzeren Zeitskala stattfindet als der Wärmeübergang in das Material. **Bild 1** illustriert am Beispiel einer Lochbohrung schematisch, worin im Vergleich mit der Bearbeitung mit langen Laser-Pulsen (links) die Vorteile der Materialbearbeitung mit

Femtosekundenpulsen (rechts) liegen können: Erstens ist der Wärmeeintrag erheblich verringert. Im Bereich der sog. „Heat Affected Zone“ (HAZ) wird das Material auch jenseits des Bearbeitungspunktes ungewollt durch Wärmeeintrag modifiziert und in seiner Konsistenz verändert. Zweitens ist der Auswurf von störendem geschmolzenem Material, welches die unbearbeitete Oberfläche verunreinigt, stark reduziert oder gar nicht vorhanden. Und auch Oberflächenmodulationen, Mikrorisse und Schockwellen im Inneren des Materials treten beim Einsatz mit Femtosekundenpulsen in geringerem Maße auf.

Damit erhält man mit Femtosekunden-Pulsen insgesamt eine sehr viel sauberere und besser reproduzierbare Bearbeitung im Mikrometer- und Nanometerbereich. In den letzten 10 Jahren haben weltweit viele Gruppen in der Grundlagenforschung und in der Industrie den Einsatz von fs-Lasern für die verschiedensten Anwendungen überprüft [z.B. 3-5]. Auch im Applikationslabor von Clark-MXR wurden viele unterschiedliche Materialien (Keramiken, Glas, Kupfer, Aluminium, Diamant, Rhenium etc.) mit vollkommen unterschiedlichen Geometrien bearbeitet – Beispiele unter Photonik-Webcode **100X**. So sind in **Bild 2** z.B. Bohrungen durch ein ca. 2mm-Glassubstrat zu sehen, die einen Durchmesser von ca. 400 µm haben.

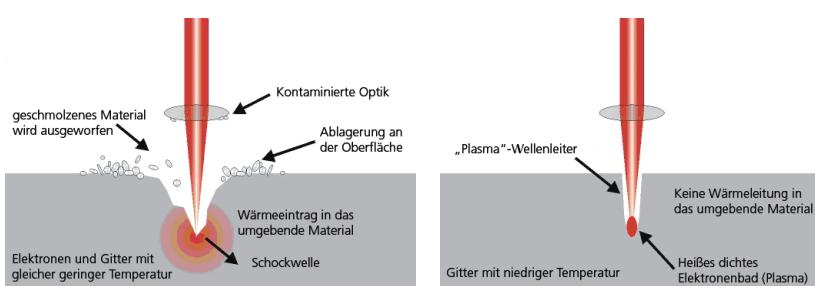


Bild 1: Unterschiede in der Lasermaterialbearbeitung mit langen (links) und fs-Laserpulsen: geringerer Wärmeeintrag in das umliegende Material, keine Kontamination mit ausgeschmolzenem Material
(Bilder: Clark-MXR)



Bild 2: 400 μm -Bohrungen in einem Glassubstrat, links mit einem ns-Laser, rechts mit einem fs-Laser ausgeführt

Es zeigten sich aber auch immer wieder Beschränkungen, vor allem in Bezug auf den Durchsatz bei der Bearbeitung, die zum großen Teil durch die Laser-Quelle bedingt waren.. Das Ti:Saphir-basierte Festkörperverstärker-System der CPA-2000-Serie von Clark-MXR z.B. produziert bei einer Pulslänge von 150 fs eine Pulsennergie von ca. 1 mJ bei einer Repetitionsrate von ca. 1 kHz. Diese Repetitionsrate ist schlicht zu niedrig. Und auch die mittlere Leistung von 1 W ist für viele Anwendungen zu wenig. Zwar sind diese Systeme auf Grund der hohen Pulsennergie sehr variabel für alle möglichen verschiedenen Anwendungen einsetzbar und eignen sich damit sehr gut für Forschungsprojekte, bei denen die optimale Pulsennergie oft nicht bekannt ist. Für kommerzielle Anwendungen dagegen zählt die Bearbeitungsgeschwindigkeit pro Stück. Um hier in Bereiche vorzustoßen, die für industrielle Anwendungen angemessen sind, müssen andere Wege gegangen werden.

Systeme auf der Basis von Ti:Saphir sind in dieser Hinsicht auf Grund der inhärenten thermischen Eigenschaften des Lasermaterials eingeschränkt. So gibt es zwar Systeme auf dem Markt, die bis zu 10 W bei einer entsprechenden Repetitionsrate erzielen können. Dazu muss man aber einen gewissen Aufwand treiben, der die Systeme insgesamt im Betrieb sehr unhandlich macht und einen kommerziellen Einsatz in der Industrie zum gegenwärtigen Zeitpunkt im Wesentlichen ausschließt.

Zusätzlich zeigt sich beim Optimieren verschiedener Anwendungen (z.B. bei der Bearbeitung transparenter Materialien wie in Bild 2), dass die Pulsennergie von 1 mJ tatsächlich sogar zu hoch sein kann. Diese

hohe Pulsennergie kann zu zusätzlichen Problemen führen, wenn man sie nicht geeignet einsetzen oder abführen kann. Als Alternative bieten sich Faserlaser an. Statt eines Festkörperkristalls wird im Faserlaser eine mehrere Meter lange Faser zur Verstärkung der Femtosekundenpulse benutzt. Dies führt u.a. zu den folgenden Vorteilen:

- Der zu verstärkende Strahl kann über eine sehr viel längere Wegstrecke im Verstärkermaterial mit dem Pump-Licht überlappt werden, womit eine sehr viel höhere mittlere Leistung erzielt werden kann.
- Einschränkende thermische Randbedingungen gibt es fast nicht, da die überflüssige Wärme über die große Oberfläche der Faser sehr effizient abgeführt werden kann.
- Durch die effiziente Wärmeabführung ist das System hinsichtlich der Repetitionsrate sehr flexibel. Während sich bei einer Repetitionsratenänderung im Falle von Ti:Saphir sehr viele Parameter im Laser ändern und damit eine mehr oder weniger aufwendige Neujustage notwendig wird, ist dieser Effekt bei Faserlasern stark reduziert.
- Der Faserlaser liefert quasi automatisch immer eine sehr gute Strahlqualität, da die Faser nur die Grundmode unterstützt.
- Es lassen sich Systeme finden, die direkt Dioden-gepumpt werden können ohne den Umweg über weitere Pump-Laser. Das macht das gesamte System sehr viel effizienter und einfacher im Gesamtaufbau. Zudem sind die Folgekosten reduziert.

Dementsprechend konnte ein Femtosekundenlaser mit der sehr viel höheren mittleren Leistung von 20 W realisiert werden. Und das bei sehr viel höheren Repetitionsraten als 1 kHz. Im Modell Impulse (**Bild 3**) werden Femtosekundenpulse eines Ytterbium-dotierten Faserlasers in mehreren Vor- und

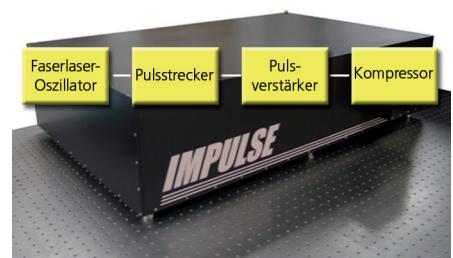


Bild 3: Aufbau des Faserlaser-Systems

Haupt-Faserverstärkern intensiviert. Die Pulslängen liegen dabei bei ca. 200 fs, die Repetitionsrate kann im Bereich zwischen 200 kHz und 25 MHz eingestellt werden. Damit lassen sich mit Faser-basierten Systemen vergleichbare Pulslängen erzielen wie bei den bisher für Materialbearbeitung eingesetzten Ti:Saphir-Verstärker-Systemen, wobei die mittlere Leistung um eine und die Repetitionsrate gleich um mehrere Größenordnungen gesteigert wird. Die Abnahme der Pulsennergie auf ca. 10 μJ ist für viele Anwendungen in der Materialbearbeitung zu verkräften.

Entsprechende Versuche wurden wieder im Applikationslabor durchgeführt [6]. **Bild 4** zeigt typische Ergebnisse an Messing, links mit dem neuen Faserlaser bei hohen Repetitionsraten (ca. 500 kHz), rechts mit dem herkömmlichen CPA mit einer Repetitionsrate von 1 kHz. Die Schnittkanten sind an den beiden unterschiedlichen Proben mit ca. 50 μm ähnlich groß. Die Qualität der Bearbeitung mit den beiden Lasern ist vergleichbar.

Ebenfalls an Messing sind die Ergebnisse in **Bild 5** erzielt worden. In diesem Fall wurde eine komplexere Struktur ausgearbeitet, bestehend aus 100 μm breiten und ca. 100 μm tiefen Kanälen. Auch hier ist die Bearbeitungsqualität beider Laser-Quellen vergleichbar. Betrachtet man die Bearbeitungsgeschwindigkeit, sprich: wie viele Kanäle können in der gleichen Zeiteinheit produziert werden, ist man mit dem Faser-Laser ca. 2000 mal schneller als mit dem CPA. Dieser Effekt ist damit sogar stärker ausgeprägt als das Verhältnis der Repetitionsraten (500 kHz vs. 1 kHz) nahelegt, und lässt sich wahrscheinlich auf die bessere Fokussierbarkeit zurückführen.

Die geringfügig längeren Pulse des Faserlasers haben bei dieser Anwendung keinen offensichtlichen Einfluss – eine

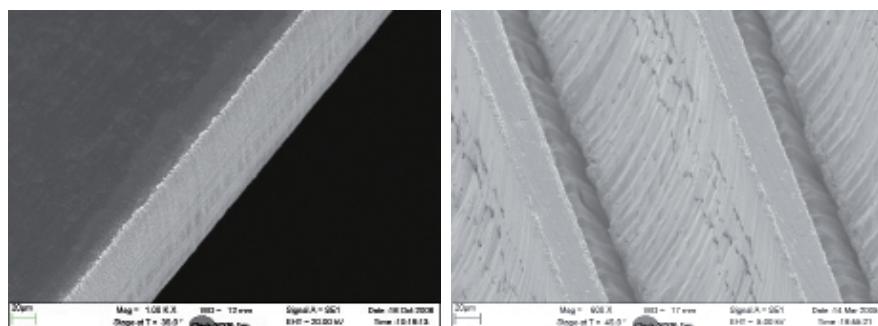


Bild 4: Arbeitsproben an Messing: die Oberflächenqualität nach der Trennung mit dem Faserlaser (links), ist vergleichbar mit der der per Ti:Saphir-Laser bearbeiteten Stegflächen (rechts). In beiden Fällen betragen die Schnittbreiten ca. 50 μm

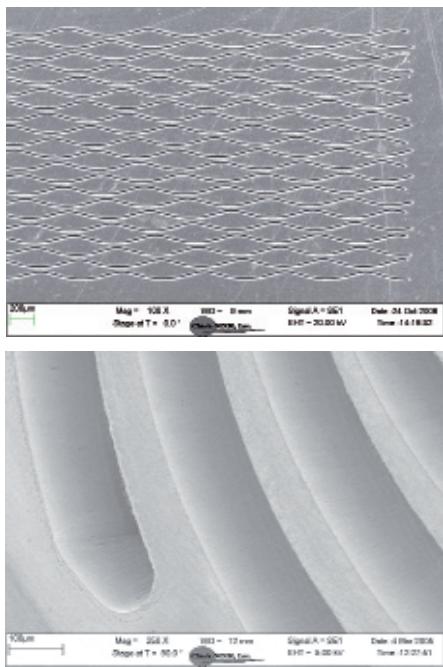


Bild 5: Struktur in Messing, Kanaltiefe und -breite je 100 µm. Die Bearbeitungsqualität von Faser-(oben) und Ti:Saphir-laser ist vergleichbar, allerdings ist der Faserlaser etwa 2000-mal schneller

Erkenntnis, die auch schon von anderen Lasern bekannt ist.

Bei der Einschätzung dieser Resultate muss noch eines betont werden: Für die Bearbeitung mit dem Ti:Saphir-basierten kHz-System besitzt das Anwendungslabor von Clark-MXR 10 Jahre Erfahrung. Im Laufe dieser Zeit konnten viele Parameter optimiert werden. Die Ergebnisse mit dem Faserlaser dagegen ergaben sich aus ersten Untersuchungen ohne jegliche Optimierung anderer Prozessparameter und ohne den Einsatz von z.B. speziellen Bearbeitungsgasen, Masken etc., wodurch Effizienz und Qualität sicher noch gesteigert werden können. Mit diesen ersten Erfolgen verstärkt sich die Hoffnung, dass eine höhere Repetitionsrate gepaart mit einer höheren mittleren Leistung Materialbearbeitung mit Femtosekundenpulsen attraktiver machen wird. Faserlaser können einen guten Beitrag zur Überwindung einiger Hürden beim Einsatz von Femtosekundenlasern in der Materialbearbeitung leisten.

Literatur

- [1] D. Strickland, G. Mourou, *Compression of amplified chirped optical pulses*, Optics Communication 56, (1985), S. 219

- [2] P.P. Pronko, S.K. Dutta, J. Squier, J.V. Rudd, D. Du, G. Mourou, *Machining of submicron holes using a femtosecond laser at 800nm*, Optics Communication 114 (1995), S. 106
- [3] P.P. Pronko, S.K. Dutta, D. Du, R.K. Singh, *Thermophysical effects in laser processing of materials with picosecond and femtosecond pulses*, J. Appl. Phys., 78, 6233-6240 (1995)
- [4] H.K. Tonshoff, A. Ostendorf, K. Korber, T. Wagner, *Micromachining of semiconductors with femtosecond lasers*, Proc. ICALEO 2000, Laser Microfabrication, Dearborn, MI, (2000) pp D16-25
- [5] G. Kamrage, T. Bauer, A. Ostendorf, B.N. Chichkov, *Deep drilling of metals with femtosecond laser pulses*, Appl. Phys. A 77, p. 307 (2003)
- [6] W. Clark, L. Walker, *Laser Material Processing with High Average Power Ultrafast Fiber-Lasers*, Proceedings ICALEO 2006

Kontakt

Dr. Hans-Erik Swoboda
Horiba Jobin Yvon GmbH
Clark-MXR Ultrakurz-
puls-Laser
Neuhofstr. 9
D-64625 Bensheim
Tel. 06251/8475-15
Fax 06251/8475-20
hans-erik.swoboda@jobinyvon.de
www.jobinyvon.de



www.photonik.de

Webcode **1001**

1/2 ANZEIGE/N