

Lichtpropagation in fs-Lasergeschriebenen Wellenleitern



Alexander Szameit ¹



Jonas Burghoff ¹



Stefan Nolte ¹



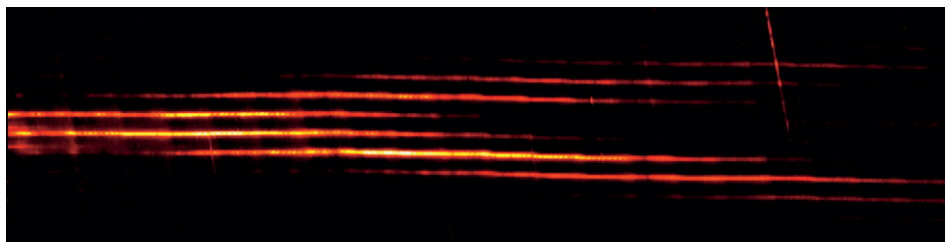
Andreas Tünnermann ^{1,2}

Mit Hilfe ultrakurzer Laserpulse im Femtosekundenbereich lassen sich die optischen Eigenschaften transparenter Materialien gezielt verändern. Werden diese intensiven Pulse in ein Volumenmaterial fokussiert, so kommt es im Fokus zu nichtlinearer Absorption, was in einem optischen Durchbruch und der Bildung eines Mikroplasmas resultieren kann. Daraus resultieren Bindungsbrüche, strukturelle Änderungen und die Ausbildung von Spannungen, die zu einer lokalen permanenten Veränderung des Brechungsindex führen. Durch Bewegen des Fokus lassen sich so ausgedehnte Strukturen erzeugen, in denen Licht geführt werden kann. So können z. B. vergrabene Wellenleiter im Inneren verschiedenster transparenter Gläser realisiert werden ^{/1/}. Durch die dreidimensionale Geometrie lassen sich Kreuzungspunkte leicht vermeiden und die Packungsdichte erhöhen. Ein weiteres Anwendungsbeispiel ist die lokale periodische Brechzahlmodifikation in Fasern und Wellenleitern, wodurch flexibel Faser-Bragg-Gitter ^{/2/} auch in nicht photosensitiven Fasern realisiert werden können.

Die Technologie des direkten Einschreibens von Wellenleitern in das Volumen transparenter Materialien mit Hilfe von fs-Pulsen kann relativ einfach auf die Erzeugung verschiedener ein- und zweidimensionaler Wellenleiterarrays erweitert werden ^{/3/}. Solche Wellenleiterarrays eignen sich als Modell für die Untersuchung der Physik diskreter Systeme. Dabei unterscheidet sich die Lichtausbreitung in diskreten Wellenleitersystemen fundamental von der Lichtausbreitung in herkömmlichen (isotropen) Medien. Dies führt zu einer Vielzahl an ungewöhnlichen und interessanten Effekten, deren genaues Verständnis für eine spätere technologische Nutzung unabdingbar ist. In Wellenleiterarrays, in denen die einzelnen Wellenleiter dicht genug beieinander liegen, können die Wellenleiter nicht mehr einzeln betrachtet werden. Vielmehr koppelt das Licht evaneszent von einem Wellenleiter in seine Nachbarwellenleiter über, was dazu führt, dass sich das Licht selbst bei ursprünglich nur einem angeregten Wellenleiter im Laufe der Lichtausbreitung über mehrere Wellenleiter verteilt.

Abb. 1:
Lichtausbreitung in einem fs-geschriebenen Wellenleiterarray, wobei in zwei benachbarte Wellenleiter eingekoppelt wurde. Eine direkte Visualisierung ist über die Fluoreszenz von Farbzentren, die den Wellenleitern überlagert sind, möglich.

Fig. 1:
Light propagation in a fs-written waveguide array. The light is coupled into two adjacent waveguides. A direct visualization is realized by observing the fluorescence of color centers collocated with the waveguides.



Propagation of light in femtosecond laser written waveguides

Ultra-short laser pulses with duration in the femtosecond range permit the modification of the optical properties of transparent materials. When these intense pulses are focused into the bulk of a transparent material, nonlinear absorption in the focal volume takes place. At sufficiently high intensities this will lead to optical breakdown and the formation of a micro-plasma, resulting in bond breaking, structural changes and induced stress. As a consequence the refractive index will be permanently modified at the location of the laser focus. By moving the sample with respect to the focal spot, buried refractive index profiles can be generated in various transparent glasses which allow guiding of light /1/. Due to the three-dimensional flexibility, crossings can be easily avoided and the packaging density can be significantly increased in such optical network architecture. Further applications can be found in localized periodic refractive index changes in waveguides and fibers. Here, this technique allows the flexible realization of Fiber-Bragg gratings even in non-photosensitive fibers /2/.

It is straightforward to use the fs direct writing technology for the fabrication of one- and two-dimensional waveguide arrays /3/. Such waveguide structures serve as a model for investigating the behavior of discrete systems. In these devices the light propagation is fundamentally different from light propagation in conventional (isotropic) media. This leads to numerous unusual and interesting effects, which require an exact understanding before any technical exploitation.

If the waveguides within the array are stacked closely together the optical properties of the system are no longer defined by the single waveguides. Instead light couples from one waveguide to another via the evanescent field. This leads to a spreading of the intensity distribution even if only one waveguide is excited. To study these effects, a direct visualization of the light propagation would be ideal. However, scattered light cannot be used in this case due to the low propagation losses. Instead, use can be made of color centers which are generated during the writing process. Their fluorescence can be directly used to monitor the light propagation. This works extremely well in OH rich fused silica as was shown recently (Fig. 1).

In addition to linear light propagation, nonlinear effects arising at high intensities are of special interest in discrete media. In glasses the nonlinear Kerr-effect starts to balance the evanescent coupling for increasing input power. As a consequence, the light is trapped in the excited waveguide – a so-called discrete spatial soliton is formed (Fig. 2). The formation and propagation of these solitons is especially interesting in two-dimensional waveguide arrays /4/. While the solitons are stable in the arrays, no stable solutions can be found in isotropic media. This makes the array structures interesting candidates for opto-optical switches. However, one has to be aware that the fs-direct writing process does not only modify the linear but also the nonlinear optical properties /5/. This can be used as an additional degree of freedom in the design of such nonlinear waveguide arrays.

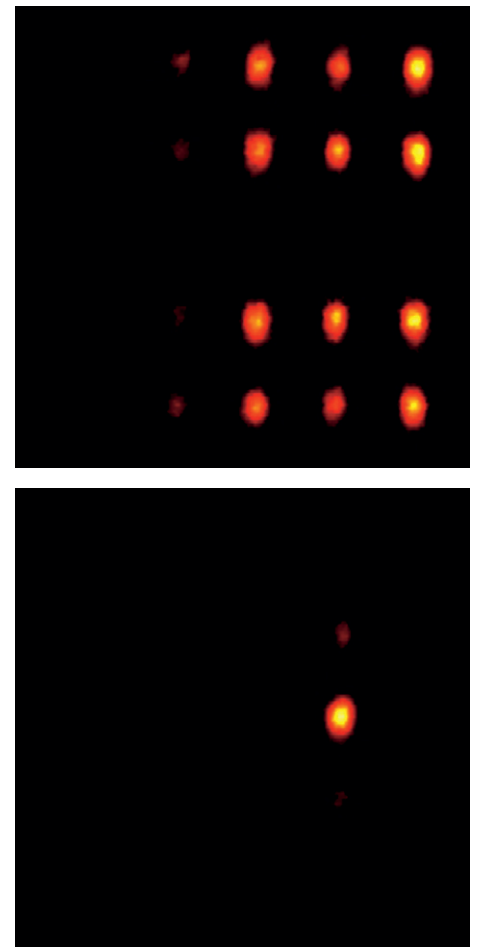


Abb. 2: Intensitätsverteilung am Ende eines 5 x 5 Wellenleiterarrays bei geringer (oben) und hoher (unten) Eingangsleistung. Die Ausbildung eines diskreten Solitons, dessen Intensitätsverteilung sich bei der Propagation nicht ändert, kann so beobachtet werden.

Fig. 2: Near-field intensity distribution at the exit of a 5 x 5 waveguide array for low (top) and high (bottom) input power. The formation of a discrete spatial soliton is visible.

Für eine Untersuchung dieser Effekte ist die direkte Visualisierung der Lichtverteilung während der Propagation wünschenswert, aufgrund der geringen Streulichtverluste jedoch nur schwer zu realisieren. Eine direkte Visualisierung gelingt allerdings durch Detektion der Fluoreszenz von Farbzentren, die bei der Wellenleiterherstellung erzeugt werden. Wie wir kürzlich zeigen konnten, funktioniert dies besonders effizient in OH-reichem Quarzglas (Abb. 1).

Neben der angesprochenen linearen Lichtausbreitung ist insbesondere die Erforschung nichtlinearer Effekte in diskreten Medien, die bei der Propagation von Licht bei hohen Intensitäten auftreten, ein wichtiger Aspekt. In Gläsern sorgt der nichtlineare Kerr-Effekt bei ansteigender Eingangsleistung zu einer Kompensation der evaneszenten Kopplung – das Licht ist im angeregten Wellenleiter »gefangen« (Abb. 2). Die Bildung und Ausbreitung solcher sog. räumlichen Solitonen ist insbesondere in zweidimensionalen Wellenleiterarrays interessant /4/. In solchen diskreten Strukturen sind die Solitonen stabil – im Gegensatz zu isotropen Medien. Damit sind diese Strukturen beispielsweise für opto-optische Schalter interessant. Allerdings konnten wir beobachten, dass nicht nur der lineare, sondern auch der nichtlineare Brechungsindex durch die Laserstrukturierung verändert wird /5/*. Dies bietet einen weiteren Designfreiheitsgrad bei der Realisierung nichtlinearer Wellenleiterarrays.

Besonders interessant ist die Erweiterung der Technologie fs-geschriebener Wellenleiter auf kristalline Materialien. Hier ist neben der Ausnutzung kubischer nichtlinearer Effekte vor allem die Untersuchung quadratischer nichtlinearer Effekte von Bedeutung, die in Gläsern nicht auftreten. Neben Wellenleitern in kristallinem Silizium – die Basis für eine elegante Kombination von Optik und Elektronik auf einem Chip – /6/ konnten wir jüngst dämpfungsarme Wellenleiter in Lithiumniobat erzeugen. In diesen Wellenleitern gelang durch Phasenanpassung Frequenzverdopplung von Laserstrahlung bei 1064 nm auf 532 nm (Abb. 3). Die Konversionseffizienz betrug 49 %, was einer normierten Konversionseffizienz von 0,6 %/(W cm²) entspricht /7/. Die Ausnutzung des elektrooptischen Effektes eröffnet zudem das Potential für eine direkte Modulation der Phase, was für die Realisierung eines elektrooptischen Modulators genutzt werden kann.

Teile dieser Arbeiten wurden durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft gefördert (Schwerpunktprogramm 1157 und Forschergruppe 532). Jonas Burghoff wird durch den Schott-Jenaer-Glas-Fonds und Alexander Szameit durch die Jenoptik AG unterstützt.

Literatur:

- /1/ Itoh, K.; Watanabe, W.; Nolte, S.; Schaffer, C. B.: Ultrafast processes for bulk modification of transparent materials, *MRS Bulletin* 31, 620 – 625 (2006).
- /2/ Wikszak, E.; Thomas, J.; Burghoff, J.; Ortac, B.; Limpert, J.; Nolte, S. Fuchs, U.; Tünnermann, A.: Erbium Fiber Laser based on intracore femtosecond written Fiber Bragg Grating, *Opt. Lett.* 31, 2390 – 2392 (2006).
- /3/ Szameit, A.; Blömer, D.; Burghoff, J.; Pertsch, T.; Nolte, S.; Tünnermann, A.: Hexagonal Waveguide Arrays Written with fs-Laser Pulses, *Appl. Phys. B* 82, 507 – 512 (2006).
- /4/ Szameit, A.; Burghoff, J.; Pertsch, T.; Nolte, S.; Tünnermann, A.; Lederer, F.: Two-dimensional soliton in cubic fs laser written waveguide arrays in fused silica, *Opt. Express* 14, 6055 – 6062 (2006).
- /5/ Blömer, D.; Szameit, A.; Dreisow, F.; Schreiber, T.; Nolte, S.; Tünnermann, A.: Nonlinear refractive index of fs-laser-written waveguides in fused silica, *Opt. Express* 14, 2151 – 2157 (2006).
- /6/ Nejadmalayeri, A. H.; Herman, P. R.; Burghoff, J.; Will, M.; Nolte, S.; Tünnermann, A.: Inscription of optical waveguides in crystalline silicon by mid-infrared femtosecond laser pulses, *Opt. Lett.* 30, 964 – 966 (2005).
- /7/ Burghoff, J.; Grebing, C.; Nolte, S.; Tünnermann, A.: Efficient frequency doubling in femtosecond laser-written waveguides in lithium niobate, *Appl. Phys. Lett.* 89, 081108 (2006).

Another interesting topic is the transfer of the fs-direct writing approach to crystalline media. Alongside cubic non-linearity, quadratic nonlinear effects which cannot be found in glasses are especially important. Apart from waveguides in crystalline silicon providing the basis for an elegant combination of optics and electronics onto the same chip /6/ low loss waveguides in lithium niobate could recently be manufactured. These waveguides allowed phase-matched frequency doubling of 1064 nm laser radiation with a conversion efficiency of 49 % corresponding to a normalized conversion efficiency of $0.6 \text{ \%}/(\text{W cm}^2)$ /7/.

Furthermore, the use of the electro-optic effect provides the potential for direct phase modulation as necessary for the realization of an electrooptical modulator.

Parts of this work were funded by the Deutsche Forschungsgemeinschaft (Priority Program 1157 and Research Unit 532). J. Burghoff acknowledges support by the Schott-Jenaer-Glas-Fonds and A. Szameit by the Jenoptik AG.

References:

- /1/ Itoh, K.; Watanabe, W.; Nolte, S.; Schaffer, C. B.: Ultrafast processes for bulk modification of transparent materials, *MRS Bulletin* 31, 620 – 625 (2006).
- /2/ Wikszak, E.; Thomas, J.; Burghoff, J.; Ortac, B.; Limpert, J.; Nolte, S. Fuchs, U.; Tünnermann, A.: Erbium Fiber Laser based on intracore femtosecond written Fiber Bragg Grating, *Opt. Lett.* 31, 2390 – 2392 (2006).
- /3/ Szameit, A.; Blömer, D.; Burghoff, J.; Pertsch, T.; Nolte, S.; Tünnermann, A.: Hexagonal Waveguide Arrays Written with fs-Laser Pulses, *Appl. Phys. B* 82, 507 – 512 (2006).
- /4/ Szameit, A.; Burghoff, J.; Pertsch, T.; Nolte, S.; Tünnermann, A.; Lederer, F.: Two-dimensional soliton in cubic fs laser written waveguide arrays in fused silica, *Opt. Express* 14, 6055 – 6062 (2006).
- /5/ Blömer, D.; Szameit, A.; Dreisow, F.; Schreiber, T.; Nolte, S.; Tünnermann, A.: Nonlinear refractive index of fs-laser-written waveguides in fused silica, *Opt. Express* 14, 2151 – 2157 (2006).
- /6/ Nejadmalayeri, A. H.; Herman, P. R.; Burghoff, J.; Will, M.; Nolte, S.; Tünnermann, A.: Inscription of optical waveguides in crystalline silicon by mid-infrared femtosecond laser pulses, *Opt. Lett.* 30, 964 – 966 (2005).
- /7/ Burghoff, J.; Grebing, C.; Nolte, S.; Tünnermann, A.: Efficient frequency doubling in femtosecond laser-written waveguides in lithium niobate, *Appl. Phys. Lett.* 89, 081108 (2006).

Abb. 3:
Frequenzkonversion in einem fs-geschriebenen Wellenleiter in Lithiumniobat.

Fig. 3:
Frequency conversion in a fs-written waveguide in lithium niobate.

