

## Fachverband Kurzzzeitphysik (K)

Andreas Görtler  
DZG  
Landsberg  
am Lech  
AGoertler@gmx.de

### Übersicht der Hauptvorträge und Fachsitzungen

(Hörsaal HS 4; Poster EG)

#### Hauptvorträge

K 1.1	Mo	14:00–14:30	HS 4	<b>Physikalische Messung am Beispiel von Photo und Film</b> — ●RUDOLF GERMER
K 3.1	Mo	16:30–17:00	HS 4	<b>Excimer-Lichtemission doppelt ionisierter Ar-Kr Moleküle</b> — ALEXEY TRESHCHALOV, ALEXANDER LISSOVSKI, ●ANDREAS ULRICH
K 4.1	Di	11:15–11:45	HS 4	<b>Kurzpuls-Scheibenlaser hoher mittlerer Leistung bei hoher Pulsenergie</b> — ●INGO WILL, JOHANNES TÜMMLER, ROBERT JUNG, THOMAS NUBBEMEYER, DOMINIK KANDULA, WOLFGANG SANDNER

#### Hauptvorträge des fachübergreifenden Symposiums SYOS

Das vollständige Programm dieses Symposiums ist unter SYOS aufgeführt.

SYOS 1.2	Di	11:10–11:50	HS 2	<b>Plasma und optische Technologien: PluTO</b> — ●NORBERT KAISER
SYOS 1.3	Di	11:50–12:20	HS 2	<b>Entspiegelung von Oberflächen durch plasmageätzte Nanostrukturen</b> — ●ULRIKE SCHULZ
SYOS 1.4	Di	12:20–12:50	HS 2	<b>Untersuchungen an PIAD Schichten</b> — ●OLAF STENZEL, STEFFEN WILBRANDT, DIETER GÄBLER, NORBERT KAISER, JENS HARHAUSEN, RÜDIGER FOEST, ANDREAS OHL
SYOS 2.1	Di	14:00–14:30	HS 2	<b>Diagnostik und Steuerung von PIAD-Prozessen</b> — ●JENS HARHAUSEN, RÜDIGER FOEST, ANDREAS OHL, DIETER GÄBLER, NORBERT KAISER, OLAF STENZEL, STEFFEN WILBRANDT, RALF-PETER BRINKMANN, BENJAMIN SCHRÖDER, ROBERT STORCH, TIM STYRNOLL
SYOS 2.2	Di	14:30–15:00	HS 2	<b>Charakterisierung beschichtender Plasmen</b> — ●PETER AWAKOWICZ
SYOS 2.3	Di	15:00–15:30	HS 2	<b>Plasmadiagnostik und Prozessüberwachung mit der Multipolresonanzsonde</b> — ●RALF PETER BRINKMANN, MICHAEL FRIEDRICH, MARTIN LAPKE, JENS OBERRATH, CHRISTIAN SCHULZ, ROBERT STORCH, TIM STYRNOLL, PETER AWAKOWITZ, THOMAS MUSSENBRÖCK, THOMAS MUSCH, ILONA ROLFES
SYOS 2.4	Di	15:30–16:00	HS 2	<b>Analyse des Ionenstrahlerstäubens mittels Plasmadiagnostik</b> — ●CARSTEN SCHMITZ
SYOS 3.1	Di	16:30–17:00	HS 4	<b>Design von amorphen optischen Schutzschichten mittels Multiskalenmodellierung</b> — ●THOMAS FRAUENHEIM

#### Hauptvorträge des fachübergreifenden Symposiums SYLL

Das vollständige Programm dieses Symposiums ist unter SYLL aufgeführt.

SYLL 1.1	Mi	13:45–14:15	HS 4	<b>Ultrashort pulsed lasers in mass production: Applications and still open questions in fundamental physics</b> — ●JENS KÖNIG, ANDREAS MICHALOWSKI
SYLL 1.2	Mi	14:15–14:45	HS 4	<b>Ultrafast Lasers in Industrial Micromachining - Established Status and Future Trends</b> — ●DIRK SUTTER, OLIVER HECKL, CHRISTOF SIEBERT
SYLL 1.3	Mi	14:45–15:15	HS 4	<b>Laser für die Medizintechnik</b> — ●MARTIN LEITNER
SYLL 1.4	Mi	15:15–15:45	HS 4	<b>Optisch-Parametrische Verstärker hoher mittlerer Leistung für Pulse weniger Femtosekunden Dauer</b> — ●UWE MORGNER, ANNE HARTH, JAN MATYSCHOK, MARCEL SCHULTZE, TINO LANG, THOMAS BINHAMMER

SYLL 1.5	Mi	15:45–16:15	HS 4	<b>Faserverstärker für ultrahohe Pulsspitzen- und Durchschnittsleistungen</b> — •TINO EIDAM, SVEN BREITKOPF, ARNO KLENKE, THOMAS SCHREIBER, JENS LIMPERT, ANDREAS TÜNNERMANN
SYLL 2.1	Mi	16:30–17:00	HS 4	<b>Extreme Licht Infrastruktur - Eine einzigartige EU Laser-Forschungseinrichtung</b> — •MIKHAIL KALASHNIKOV
SYLL 2.2	Mi	17:00–17:30	HS 4	<b>High Power and High Energy Cryogenic Yb-Lasers for Soft-X-ray Sources</b> — •FRANZ X. KAERTNER
SYLL 2.3	Mi	17:30–18:00	HS 4	<b>A single frequency laser at 191 nm</b> — •JÜRGEN STUHLER, MATTHIAS SCHOLZ, DMITRIJS OPALEVS, WILHELM KAENDERS
SYLL 2.4	Mi	18:00–18:30	HS 4	<b>The Innoslab Laser Platform - ns to fs pulse duration at kW class output power</b> — •DIETER HOFFMANN, PETER RUSSBÜLDT, MARCO HÖFER, PETER LOOSEN, REINHART POPRAWA

## Fachsitzungen

K 1.1–1.5	Mo	14:00–15:30	HS 4	<b>Optische Methoden und Verfahren</b>
K 2.1–2.1	Mo	15:30–15:45	HS 4	<b>Pulsed Power Technik</b>
K 3.1–3.6	Mo	16:30–18:15	HS 4	<b>Licht- und Strahlungsquellen, EUV-Quellen</b>
K 4.1–4.5	Di	11:15–12:45	HS 4	<b>Lasersysteme und -komponenten</b>
K 5.1–5.8	Di	14:00–16:00	HS 4	<b>Laserstrahlwechselwirkung und Laseranwendungen</b>
K 6.1–6.2	Di	16:30–18:30	Poster EG	<b>Poster</b>
K 7.1–7.4	Do	11:15–12:30	HS 4	<b>Laseranwendungen und Lasermaterialbearbeitung I</b>
K 8.1–8.8	Do	14:00–16:00	HS 4	<b>Laseranwendungen und Lasermaterialbearbeitung II</b>
K 9.1–9.3	Do	16:30–17:15	HS 4	<b>Laseranwendungen und Lasermaterialbearbeitung III</b>

## Mitgliederversammlung des Fachverbands Kurzzzeitphysik

Dienstag 12:45–13:15 HS 4

- Bericht des Vorsitzenden
- Wahlen
- Tagungsplanung
- Verschiedenes

## K 1: Optische Methoden und Verfahren

Zeit: Montag 14:00–15:30

Raum: HS 4

### Hauptvortrag

K 1.1 Mo 14:00 HS 4

**Physikalische Messung am Beispiel von Photo und Film** — ●RUDOLF GERMER — ITPeV www.itp-berlin.net — TUBerlin

Aufgabe einer Messung ist es, Informationen zu erlangen. Die Genauigkeit ist dabei begrenzt durch Unschärfen physikalischer Natur ( $\Delta x \cdot \Delta p > \hbar$ ,  $\Delta E \cdot \Delta t > \hbar$ ) oder aus der begrenzten Genauigkeit der Messung selbst resultierend. Größen, die man beobachten kann, sind entweder physikalisch fundamental oder abgeleitet. Fundamental ist z.B. die abzählbare Größe der Ladung ( $Q = n \cdot e$ ), wie wir sie gespeichert auf einem Kondensator messen können. Abgeleitet in diesem Sinne ist der Strom ( $I = dQ/dt$ ), bei dem wir die Änderung der Ladung oder vorbeilaufende Ladungen während eines Zeitintervalls  $dt$ , der beliebig wählbaren Meßdauer, registrieren. Die grundsätzlichen Probleme des Messens lassen sich anschaulich bei der Bildaufnahme beobachten. Elementar registrieren wir einzelne Photonen. Die passende Addition solcher registrierter Photonen führt zu den Größen Helligkeit, Farbe und ggf. den beobachteten räumlichen Strukturen und Bewegungen im Bild. So zeigen sich Unschärferelationen zwischen der Dynamik von Graustufen und zeitlichen oder örtlichen Auflösungsgrenzen. Interessant ist die Frage, wieviel auswertbare Information unsere Messung liefern kann oder wo die Art der Auswertung Teile der ursprünglich vorhandenen Information verschwinden lassen. In einem solchen Fall ist es nämlich möglich, durch unterschiedliche Wege der Datenverarbeitung jeweils einzelne Größen getrennt voneinander und parallel zueinander optimal zu projizieren. Die Zeit wird uns bei den Betrachtungen in unterschiedlichen Formen begegnen.

K 1.2 Mo 14:30 HS 4

**Observing surface charges in oxide coatings on silicon surfaces with THz emission spectroscopy** — ●ULRIKE BLUMRÖDER<sup>1</sup>, STEFAN NOLTE<sup>1,2</sup>, and ANDREAS TÜNNERMANN<sup>1,2</sup> — <sup>1</sup>Institute of Applied Physics, Abbe Center of Photonics, Friedrich-Schiller-University, Max-Wien-Platz 1, 07743 Jena, Germany — <sup>2</sup>Fraunhofer Institute for Applied Optics and Precision Engineering, Albert-Einstein-Straße 7, 07745 Jena, Germany

One mechanism leading to the emission of pulsed THz-radiation at semiconductor surfaces is the acceleration of photogenerated carriers in depletion or accumulation layers usually existing at semiconductor surfaces due to occupied surface states lying within the bandgap. The opposite direction of the depletion field in n- and p-doped semiconductors results in a flipping of the polarity of the emitted THz pulse as it has been observed for differently doped GaAs samples. On the other hand surface charges are also known to be present in oxide layers that are used for the passivation of silicon surfaces in the photovoltaic industry. Therefore they lead to the formation of a space charge layer beneath the silicon surface as well. We investigate the THz emission of thermally oxidized and ALD coated silicon wafers with THz emission spectroscopy and proved the existence of surface charges by investigating the polarity of the emitted THz pulse.

K 1.3 Mo 14:45 HS 4

**Time-resolved measurements of magnetization precession in different exchange bias systems** — ●ANDREA EHRMANN<sup>1</sup> and TOMASZ BLACHOWICZ<sup>2</sup> — <sup>1</sup>Hochschule Niederrhein, Faculty of Textile and Clothing Technology, Mönchengladbach, Germany — <sup>2</sup>Institute of Physics, Silesian University of Technology, Gliwice, Poland

Due to the large technological relevance, magnetization reversal processes in exchange bias systems are of great interest in recent research projects. In time-resolved measurements, the change of the anisotropy field (by a laser pulse, a field pulse etc.) leads to a precession of the magnetic moments in the sample. Angle-resolved measurements of the precession frequencies, e.g. by MOKE (Magneto-Optic Kerr-Effect)

give rise to the sample's anisotropies. These experiments are significantly faster than common BLS (Brillouin Light Spectroscopy) measurements, thus allowing for a large number of detection angles.

In this way, different anisotropies in the exchange bias systems Fe/MnF<sub>2</sub> and Fe/FeF<sub>2</sub> can be detected. Additional to the form anisotropy, the interface anisotropy, and the magneto-crystalline anisotropy, the exchange bias anisotropy can be depicted. Our measurements show that in both systems under examination, a new mathematical model for the exchange bias has to be found, which leads to the assumption that accurate time-resolved measurements on other material systems can also give rise to novel theoretical descriptions of the exchange bias anisotropy.

[1] A. Tillmanns: Magnetisierungsumkehr und -dynamik in Exchange-Bias-Systemen, Dissertation, RWTH Aachen 2006

K 1.4 Mo 15:00 HS 4

**Magnetization oscillations and rapid transient states in ferromagnetic nano-half-balls and wire systems with shape modifications** — ●TOMASZ BLACHOWICZ<sup>1</sup> and ANDREA EHRMANN<sup>2</sup> — <sup>1</sup>Institute of Physics, Silesian University of Technology, Gliwice, Poland — <sup>2</sup>Hochschule Niederrhein, Faculty of Textile and Clothing Technology, Mönchengladbach, Germany

Hysteresis loops of 3D ferromagnetic nano-half-balls with 100 nm base diameter and different shape modifications have been examined using LLG micromagnetic simulations and finite element methods [1]. Depending on the direction of the externally applied field, strong oscillations of the magnetization can be recognized.

Comparing hysteresis loops with demagnetization and exchange energy densities and taking into account "snapshots" of the space-resolved magnetization, these oscillations can be attributed to different mechanisms, such as vortex precessions or domain wall oscillations. It can be shown that precession frequencies give rise to identification of the respective oscillation / precession mechanisms.

By taking into account different shape modifications, the simulations show feasible ways to diminish these oscillations, which can be critical in spin-valve systems, magnetic storage systems and other applications.

[1] T. Blachowicz, A. Ehrmann: Anatomy of Demagnetizing and Exchange Fields in Magnetic Nanodots Influenced by 3D Shape Modifications, Condensed Matter/Mesoscale and Nanoscale Physics arXiv.org preprint, cond-mat arXiv:1207.4673 (2012)

K 1.5 Mo 15:15 HS 4

**Mass-selective discrimination of chirality by femtosecond coincidence imaging** — ●CARL STEFAN LEHMANN<sup>1</sup>, BHARGAVA RAM<sup>1</sup>, IVAN POWIS<sup>2</sup>, and MAURICE JANSSEN<sup>1</sup> — <sup>1</sup>LaserLaB, Vrije Universiteit Amsterdam, Niederlande — <sup>2</sup>University of Nottingham, UK

In 1976 Ritchie [1] predicted that one-photon ionization with circular polarized light of chiral molecules results in a forward-backward asymmetry in the angular distribution of electrons. Experimentally, this asymmetry was first observed in 2001 in one-photon ionization with synchrotron radiation. This photo-electron circular dichroism (PECD) effect is up to three orders of magnitude larger than the conventional CD, as it results from normal electric dipole excitation.

Here we report femtosecond multi-photon ionization in combination with electron-ion coincidence imaging to mass-selectively discriminate chiral molecules. We demonstrate that this novel technique, using a table-top reaction microscope [2,3], can be used to detect mass-selected chiral molecules with high selectivity and sensitivity, which makes very promising as an analytical technique to characterize chiral samples.

[1] Phys. Rev. A 13, 1411 (1976).

[2] Rev. Sci. Instrum. 79, 063108 (2008).

[3] Rev. Sci. Instrum. 83, 093103 (2012).

## K 2: Pulsed Power Technik

Zeit: Montag 15:30–15:45

Raum: HS 4

K 2.1 Mo 15:30 HS 4

### Operation of an Array of Parallel Micro-Plasma Spark Gaps

— ●KLAUS FRANK<sup>1</sup>, HASIB RAHAMAN<sup>2</sup>, BYUNG LEE<sup>2</sup>, and SANG NAM<sup>2</sup> — <sup>1</sup>University of Erlangen, Physics Department, Erlangen — <sup>2</sup>Pohang Accelerator Laboratory, Pohang, South Korea

Micro-plasma spark gaps in the high pressure region have specific applications in pulsed power due to their fast switching and high peak power capability. The peak power of short impulses at a load by a single spark gap at a very high repetition rates ( $\sim 1$  MHz) is limited due to the relatively low breakdown voltage. The breakdown voltage at high repetition rate of a micro-plasma spark gap is significantly lower than the initial breakdown voltage. Operation of two or multiple

micro-plasma spark gaps increases the breakdown voltage by enhanced recovery time at the cost of reduced repetition rate of each spark gap. The operation of an array of parallel operating micro-plasma spark gaps is studied at the Pohang Accelerator Laboratory, Pohang, South Korea. Experimental results of switching four spark gaps in parallel in the non-synchronized mode for two different configurations and additional results related to breakdown voltage waveform and their reproducibility will be presented. Furthermore, some experimental work was done to improve the operation of the spark gaps by optimizing external parameters, such as resistance and capacitance, with the goal to increase the output peak power as well as the average output power of the system.

## K 3: Licht- und Strahlungsquellen, EUV-Quellen

Zeit: Montag 16:30–18:15

Raum: HS 4

### Hauptvortrag

K 3.1 Mo 16:30 HS 4

### Excimer-Lichtemission doppelt ionisierter Ar-Kr Moleküle

— ALEXEY TRESHCHALOV<sup>1</sup>, ALEXANDER LISSOVSKI<sup>1</sup> und ●ANDREAS ULRICH<sup>2</sup> — <sup>1</sup>Institute of Physics, University of Tartu, Riia 142, 51014 Tartu, Estonia — <sup>2</sup>Physik Department E12, Technische Universität München, James-Franck-Str. 1, 85748 Garching

Die Lichtemission von Mischungen der Edelgase Argon und Krypton wurde bei Anregung mit einer gepulsten Entladung wellenlängenorts- und zeitaufgelöst studiert. Dabei wurden im Bereich von ca. 315 nm neue Excimer-Emissionen gefunden, welche optischen Übergängen zweifach geladener Ar-Kr Mischmoleküle zugeordnet werden können. Die Experimente wurden bei unterschiedlichen Mischungsverhältnissen bei einem Gasdruck von ca. 100 mbar durchgeführt. Die neue Emissionsstruktur tritt in einer Schicht nahe der Kathode auf. Der experimentelle Aufbau, die Datenanalyse und die Interpretation der Ergebnisse wird beschrieben. Aus zeitaufgelösten Messungen wird auf die gaskinetischen Prozesse geschlossen. Ausgehend von der Interpretation der Ergebnisse können zudem die Wellenlängenbereiche vorhergesagt werden, bei denen bei Mischungen der Edelgase Helium bis Xenon die analogen Emissionen zur hier gefundenen Struktur in Ar-Kr erwartet bzw. ausgeschlossen werden können.

Gefördert durch das Erasmus-Programm zur Dozentenmobilität und der Estonian Scientific Foundation (Grant no.7971)

K 3.2 Mo 17:00 HS 4

### Coherent Synchrotron Emission from ultraintense laser foil interactions

— ●MATT ZEPF — Helmholtz Institut Jena, 07743 Jena

Several processes can lead to the emission of coherent XUV emission in laser solid foil interactions \* most notably to date Relativistic Oscillating Mirror (ROM) and Coherent Wake Emission (CWE). Under the correct interaction conditions, the electrons driven by the laser-field from nano-bunches which can radiate in the XUV via a process very similar to synchrotron emission. The small scale of the electron bunches allows the synchrotron like emission to be coherent. Here we observe and theoretically investigate such a synchrotron-like mechanism in the transmitted laser direction for the first time. Coherent XUV emission with low divergence and synchrotron like scaling is observed experimentally and discussed theoretically.

K 3.3 Mo 17:15 HS 4

### Space Radiation Tests with Laser Plasma Accelerators

— ●OLIVER KARGER<sup>1,2</sup>, THOMAS KÖNIGSTEIN<sup>3</sup>, GEORG PRETZLER<sup>3</sup>, JAMES B. ROSENZWEIG<sup>4</sup>, and BERNHARD HIDDING<sup>1,2,4</sup> — <sup>1</sup>Institut für Experimentalphysik, Universität Hamburg — <sup>2</sup>DESY, FLA Arbeitsbereich Beschleunigerphysik, Hamburg — <sup>3</sup>Institut für Laser- und Plasmaphysik, Heinrich-Heine-Universität Düsseldorf — <sup>4</sup>Department of Physics and Astronomy, University of California, Los Angeles

Ionizing radiation in the Van-Allen belt is a substantial hazard for electronic components aboard spacecrafts in Earth orbit and on missions to other planets with a magnetosphere. Hence all radiation sensitive components have to be tested thoroughly as regards their radiation resistivity before any mission. In stark contrast to conventional accelerators such as linacs or cyclotrons, laser-plasma accelerator can accurately

reproduce the radiation belt flux, and therefore provide more meaningful testing scenarios. In proof-of-concept projects, seed funded by European Space Agency, laser-plasma-interaction with solids was used to reproduce the radioation belt electrons and electronic componetns were irradiated. The intensity dependence of the electron temperature and the spatial distribution of emission was analyzed. Due to the high electron flux the daily dose of  $3 \cdot 10^{12}$  electrons/cm<sup>2</sup> in a typical orbit of a navigation satellite can be reached within 140 seconds. Today's state-of-the-art testing methods would need several hours to apply the same dose.

This talk presents the results of the measurments and the further development.

K 3.4 Mo 17:30 HS 4

### Attosekundenpulserzeugung mit Pulswiederholraten im Megahertzbereich

— ●MANUEL KREBS<sup>1</sup>, STEFFEN HÄDRICH<sup>1,2</sup>, STEFAN DEMMLER<sup>1</sup>, JAN ROTHHARDT<sup>1,2</sup>, AMELLE ZAÏR<sup>3</sup>, LUKE CHIPPERFIELD<sup>4</sup>, JENS LIMPET<sup>1,2</sup> und ANDREAS TÜNNERMANN<sup>1,2,5</sup>

— <sup>1</sup>Friedrich-Schiller-Universität Jena, Abbe Center of Photonics, Institut für Angewandte Physik, Albert-Einstein-Straße 15, 07745 Jena, Germany — <sup>2</sup>Helmholtz-Institut Jena, Fröbelstieg 31, 07743 Jena, Germany — <sup>3</sup>Blackett Laboratory, Imperial College London, Prince Consort Road, London SW7 2AZ, UK — <sup>4</sup>Max-Born-Institut für Nichtlineare Optik und Kurzzeitspektroskopie, Max-Born-Straße 2A, 12489 Berlin, Germany — <sup>5</sup>Fraunhofer-Institut für Angewandte Optik und Feinmechanik, Albert-Einstein-Straße 7, 07745 Jena, Germany

Attosekundenpulse ermöglichen erstmals einen direkten experimentellen Zugang zu ultraschnellen elektronischen Prozesse in Atomen und Molekülen. Die meisten Anwendungen werden jedoch durch die niedrigen Puls wiederholraten verwendeter Lasersysteme limitiert, die zu langen Messzeiten führen. Für die Weiterentwicklung dieser komplizierten Experimente sind hochrepetierende Laserquellen nötig. Basierend auf einem neuartigen faserlasergepumpten optisch-parametrischen Verstärkersystem präsentieren wir hier erstmals isolierte Attosekundenpulse bei 0,6 MHz Repetitionsrate. Die gegenüber herkömmlichen Quellen um das mindestens 200-fache erhöhte Puls wiederholrate ermöglicht und verbessert eine Vielzahl neuer Anwendungen wie Pump-Probe-Koinzidenzmessungen oder Photoemissions-Elektronenspektroskopie mit Attosekundenauflösung.

K 3.5 Mo 17:45 HS 4

### Skalierung der Brillanz von entladungsbasierten EUV-Quellen

— ●JOCHEN VIEKER und KLAUS BERGMANN — Fraunhofer Institut für Lasertechnik, Steinbachstraße 15, 52074 Aachen, Deutschland

Gasentladungsquellen haben sich im kommerziellen Einsatz für die Forschung im Technologiezweig der EUV-Lithographie bewährt. Weiterhin bietet sich dieser Quellentyp durch seine Flexibilität als Basis für die Wasserfenstermikroskopie und -reflektometrie sowie die Interferenzlithographie an. Neben diesen in F&E eingesetzten Quellen zeichnet sich ein Bedarf an Quellen für die an die Chipproduktion gekoppelte Qualifikation optischer Komponenten ab. Herausfordernd ist hierbei die Maskeninspektion durch "Aerial Imaging Microscopy" (AIMS) mit

hohen Ansprüchen an Standzeit und Brillanz. Als geeigneter Ausgangspunkt für Hochbrillanz- und Wasserfensterquellen hat sich ein Quellenkonzept auf Basis einer Pseudofunkenentladung erwiesen. Es sollen grundlegende Untersuchungen zu Mechanismen vorgestellt werden, welche die Brillanz und Konversionseffizienz bei der EUV-Erzeugung beeinflussen.

K 3.6 Mo 18:00 HS 4

**Kompakte kohärente EUV Quellen basierend auf Überhöhungsresonatoren** — ●IOACHIM PUPEZA<sup>1,2</sup>, SIMON HOLZBERGER<sup>1,2</sup>, HENNING CARSTENS<sup>1,2</sup>, TINO EIDAM<sup>3</sup>, DOMINIK ESSER<sup>4</sup>, JOHANNES WEITENBERG<sup>5</sup>, PETER RUSSEBÜLDT<sup>4</sup>, JENS LIMPERT<sup>3</sup>, THOMAS UDEM<sup>1</sup>, ANDREAS TÜNNERMANN<sup>3</sup>, THEODOR W. HÄNSCH<sup>1,2</sup>, ALEXANDER APOLONSKI<sup>2</sup>, ERNST FILL<sup>2</sup> und FERENC KRAUSZ<sup>1,2</sup> — <sup>1</sup>Max-Planck-Institut für Quantenoptik, Garching, Deutschland — <sup>2</sup>Fakultät für Physik, LMU München, Deutschland — <sup>3</sup>Institut für Angewandte Physik, FSU Jena, Deutschland — <sup>4</sup>Fraunhofer-Institut für Laser-

technik, Aachen, Deutschland — <sup>5</sup>Lehrstuhl für Lasertechnik, RWTH Aachen, Deutschland

Die kohärente Überhöhung ultrakurzer Laserpulse in einem passiven optischen Resonator bietet günstige Bedingungen für die Erzeugung hoher Harmonischer in einem Gas mit Repetitionsraten von einigen 10 MHz. Das Potential dieses 2005 zum ersten Mal realisierten Ansatzes wurde 2012 durch die Demonstration des höchsten Photonenflusses einer kompakten Quelle kohärenter Strahlung mit Wellenlängen um 60 nm bestätigt. In jüngsten Experimenten erreichten wir zum ersten Mal Wellenlängen von unter 13 nm bei diesen Repetitionsraten und bereiteten mit neuen Resonatordesigns, die Strahlradianen von etwa 5 mm auf allen Spiegeln ermöglichen, die Grundlage für die Skalierung der Durchschnittsleistung ultrakurzer Pulse in einem Resonator in Richtung der Megawatt Grenze vor. Solche leistungsstarken EUV Quellen, die durch diese Fortschritte in Reichweite rücken, bieten die Aussicht auf zahlreiche Anwendungen in Wissenschaft und Technik.

## K 4: Lasersysteme und -komponenten

Zeit: Dienstag 11:15–12:45

Raum: HS 4

### Hauptvortrag

K 4.1 Di 11:15 HS 4

**Kurzpuls-Scheibenlaser hoher mittlerer Leistung bei hoher Pulsenergie** — ●INGO WILL, JOHANNES TÜMLER, ROBERT JUNG, THOMAS NUBBEMEYER, DOMINIK KANDULA und WOLFGANG SANDNER — Max-Born-Institut für Nichtlineare Optik und Kurzzeitspektroskopie, Berlin

Im Vortrag wird über unser Projekt berichtet, das die Skalierung der Scheibenlasertechnologie zu Pulsenergien von 1 bis 2 Joule bei Pulslängen von wenigen Pikosekunden und mittleren Laserleistungen von mehreren hundert Watt zum Ziel hat.

Die Hauptkomponenten eines Kurzpuls-Scheibenlasersystems, insbesondere der Laserverstärker, sowie der Pulsstreck- und -kompressor, werden vorgestellt. Im Detail werden die regenerativen und Multipass-Verstärker des Lasersystems beschrieben, das derzeit Pulsenergien von 400 mJ bei Pulslängen von 2 bis 5 ps bei Repetitionsraten bis 200 Hz erreicht.

Die entwickelten Kurzpuls-Scheibenlaser mit hoher Pulsenergie dienen in erster Linie zum Pumpen von OPCPA-Systemen, die energiereiche Laserpulse mit Pulslängen von 5...10 fs produzieren. Letztere werden anschließend durch Harmonischen-Erzeugung zu intensiven Attosekundenpulsen konvertiert.

Somit sind die vorgestellten Kurzpuls-Scheibenlaser ein Schlüsselement zur Erzeugung von Attosekunden-Pulsen mit hoher Energie, die zur Steuerung und Beobachtung extrem schneller Prozesse in Atomen, Molekülen und Ionen erforderlich sind.

K 4.2 Di 11:45 HS 4

**10MHz-Überhöhungsresonator zur Skalierung der Pulsspitzenleistung von Ultrakurzpuls-Lasersystemen** — ●SVEN BREITKOPF<sup>1</sup>, HENNING CARSTENS<sup>4,5</sup>, SIMON HOLZBERGER<sup>4,5</sup>, IOACHIM PUPEZA<sup>4,5</sup>, TINO EIDAM<sup>1</sup>, ARNO KLENKE<sup>1,3</sup>, ERNST FILL<sup>4,5</sup>, JENS LIMPERT<sup>1,2,3</sup> und ANDREAS TÜNNERMANN<sup>1,2,3</sup> — <sup>1</sup>Institut für Angewandte Physik, Abbe-Center of Photonics, Friedrich Schiller Universität Jena, Germany — <sup>2</sup>Fraunhofer Institut für Angewandte Optik und Feinmechanik, Jena, Germany — <sup>3</sup>Helmholtz-Institut Jena, Germany — <sup>4</sup>Max-Planck-Institut für Quantenoptik, Garching, Germany — <sup>5</sup>Ludwig-Maximilians-Universität München, Fakultät für Physik, Garching, Germany

Die Pulsspitzenleistung von Laserpulsen wird durch nichtlineare Effekte oder Zerstörungsschwellen im Verstärkermedium begrenzt. Daher hat sich in den letzten Jahrzehnten das Prinzip der Chirped-Pulse-Amplification (CPA) durchgesetzt. Eine weitere Möglichkeit zur Skalierung der Pulsspitzenleistung, die mit dem CPA-Konzept kombiniert werden kann, ist das Überlagern von hochrepetierenden Pulsen in einem Überhöhungsresonator um so die Repetitionsrate zu reduzieren und damit einhergehend die Pulsspitzenleistung zu steigern. Es sollen grundlegende Überlegungen und Konzepte zur Realisierung eines solchen Systems vorgestellt werden inklusive von Möglichkeiten zur Auskopplung der überhöhten Pulse aus dem Resonator. Außerdem werden die Ergebnisse der ersten erfolgreichen Experimente mit einem 10MHz-Überhöhungsresonator vorgestellt und ein Ausblick auf die möglichen Anwendungen eines solchen Systems gegeben.

K 4.3 Di 12:00 HS 4

**550fs Laserpulse bei 1038nm mit einem passiv gütegeschalteten Nd:YVO4 MikrochipLasersystem** — ●REINHOLD LEHNEIS<sup>1</sup>, ALEXANDER STEINMETZ<sup>1</sup>, JENS LIMPERT<sup>1</sup> und ANDREAS TÜNNERMANN<sup>1,2</sup> — <sup>1</sup>Institut für Angewandte Physik, Abbe Center of Photonics, Friedrich-Schiller-Universität Jena, Albert-Einstein-Str. 15, 07745 Jena — <sup>2</sup>Fraunhofer-Institut für Angewandte Optik und Feinmechanik, Albert-Einstein-Str. 7, 07745 Jena

Wir zeigen ein neuartiges Konzept für ultrakurze Sub-Pikosekunden Pulse bei einstellbarer Wellenlänge von 1030 bis 1050nm mit einem passiv gütegeschalteten MikrochipLasersystem. Dabei werden zunächst die durch Selbstphasenmodulation (SPM) spektral verbreiterten Mikrochippulse mit einem Gitter komprimiert. Diese Pulse werden dann in einen Wellenleiter für eine zweite SPM eingekoppelt und nachfolgend mit einem Bandpass gefiltert. Die hohe Spitzenleistung sowie kurze Pulsdauer aus der Pulskompression erzeugt breite Spektren mit nahezu ungechirpten Rändern. Dort führt eine spektrale Filterung neben einer zeitlichen Verkürzung zu hoher Pulsqualität und einer Wellenlängenverschiebung. Der Versuchsaufbau besteht aus einer verstärkten und SPM verbreiterten Nd:YVO4 Mikrochipquelle bei 1064nm. Die emittierten 82ps Pulse werden in einem Gitterkompressor auf 5.5ps verkürzt und dann in eine passive Monomodefaser eingekoppelt, was zu Pulsbreiten von 52nm (-25dB) führt. Die nachfolgende Filterung mit einem Bandpass (6nm) am Rand des Spektrums führt zu ultrakurzen Pulsen von 550fs. Die dabei erzeugte Wellenlänge beträgt 1038nm, was z.B. für eine Nachverstärkung mit Yb-dotierten Fasern vorteilhaft ist.

K 4.4 Di 12:15 HS 4

**Control of timing jitter in high power optical parametric chirped-pulse amplifiers** — ●STEFAN DEMMLER<sup>1</sup>, STEFFEN HÄDRICH<sup>1,2</sup>, JAN ROTHHARDT<sup>1,2</sup>, MANUEL KREBS<sup>1</sup>, JENS LIMPERT<sup>1,2</sup>, and ANDREAS TÜNNERMANN<sup>1,2,3</sup> — <sup>1</sup>Institute of Applied Physics, Abbe Center of Photonics, Friedrich-Schiller-University Jena, Albert-Einstein-Strasse 15, 07745 Jena, Germany — <sup>2</sup>Helmholtz Institute Jena, Fröbelstieg 3, 07743 Jena, Germany — <sup>3</sup>Fraunhofer Institute of Applied Optics and Precision Engineering, Albert-Einstein-Strasse 7, 07745 Jena, Germany

A fiber laser pumped ultra broadband optical parametric chirped-pulse amplifier (OPCPA) is presented, which delivers carrier-envelope phase (CEP) stable near infrared pulses with a duration of only two optical cycles at repetition rates of up to 1 MHz. Thanks to pulse energies of tens of microjoules this source provides sufficient peak power for the generation of isolated attosecond pulses via high harmonic generation in noble gases. For this process precise control and stabilization of the CEP of the amplified pulses is indispensable. It is shown that timing jitter between the signal and pump pulses in the OPCPA induces spectral drifts of the amplified signal, which transfer to CEP instabilities via dispersion. Synchronization between both pulses is achieved optically via low jitter soliton shift in a special photonic crystal fiber. In addition, the detection of the angularly dispersed idler allows the implementation of an active feedback loop to eliminate remaining temporal drifts. Furthermore, a new scheme of measuring the CEP drifts in OPCPA systems by utilizing parasitic second harmonic is presented.

K 4.5 Di 12:30 HS 4

**Towards high-power CEP-stabilized few-cycle thin-disk oscillators** — OLEG PRONIN<sup>1</sup>, ●MARCUS SEIDEL<sup>2</sup>, JONATHAN BRONS<sup>2</sup>, FABIAN LÜCKING<sup>1</sup>, IVAN B. ANGELOV<sup>2</sup>, VLADIMIR PERVAK<sup>1</sup>, ALEXANDER APOLONSKIY<sup>1,2</sup>, and FERENC KRAUSZ<sup>1,2</sup> — <sup>1</sup>Ludwig-Maximilians-Universität München, Garching, Germany — <sup>2</sup>Max-Planck Institut für Quantenoptik, Garching, Germany

The thin-disk laser concept made it possible to achieve average output powers of more than 100 W, pulse energies of several tens of  $\mu\text{J}$  and pulse durations below 200 fs directly from a mode-locked Yb:YAG oscillator. In contrast, Ti:Sa-oscillators reach only a few Watts of output power. However, they can operate in a few-cycle regime. Such short pulses cannot be directly generated in a thin-disk oscillator due to the

limited bandwidth of the gain medium. To overcome this problem, the spectrum of a Kerr-lens mode-locked Yb:YAG thin-disk oscillator [1] was broadened in a  $35\ \mu\text{m}$  core diameter photonic crystal fiber and compressed by means of chirped mirrors. Overall throughputs of more than 60 % of the incident power and pulses with duration of less than 30 fs were measured. Furthermore, the spectrally broadened and compressed pulses were sent to an f-to-2f interferometer which gave access to the carrier envelope offset (CEO) frequency. In order to gain higher intrinsic CEO frequency stability, the intensity noise fluctuations of the oscillator were characterized and reduced. Finally, the CEO frequency fluctuations were decreased through a feedback loop that controlled the oscillator pump diodes current.

[1] O. Pronin et al., Optics Letters 36, 4746 (2011)

## K 5: Laserstrahlwechselwirkung und Laseranwendungen

Zeit: Dienstag 14:00–16:00

Raum: HS 4

K 5.1 Di 14:00 HS 4

**Selective mode filter in a large mode area fiber inscribed by ultrashort laser pulses** — ●RIA G. KRÄMER<sup>1</sup>, CHRISTIAN VOIGTLÄNDER<sup>1</sup>, JENS U. THOMAS<sup>1</sup>, DANIEL RICHTER<sup>1</sup>, ANDREAS TÜNNERMANN<sup>1,2</sup>, and STEFAN NOLTE<sup>1,2</sup> — <sup>1</sup>Institute of Applied Physics, Abbe Center of Photonics, Friedrich-Schiller-University Jena, Max-Wien-Platz 1, D-07743 Jena, Germany — <sup>2</sup>Fraunhofer Institute for Applied Optics and Precision Engineering, Albert-Einstein-Str. 7, D-07745 Jena, Germany

We demonstrate a selective mode filter in a few mode large mode area (LMA) fiber inscribed directly with ultrashort pulses. The mode filter consists of refractive index modifications written alongside the core, into the cladding, where the change of the refractive index is of the same order of magnitude as the difference between core and cladding. The presence of the modulation causes a perturbation of the guiding modes, leading to coupling between the modes. Depending on length and position of the modification, light will couple from the higher order to the fundamental mode or vice versa. To characterize the functionality of the mode filter, a femtosecond inscribed fiber Bragg grating (FBG) providing spectral separation of the core modes was used. First, the FBG was written, followed then by the mode filter. During the inscription process the reflection spectrum of the FBG was measured in situ using a supercontinuum source, providing a length dependent feedback of the mode filter. The reflectivity of the individual modes yields information about the suppression of the modes. We could filter separately either the fundamental or higher order mode.

K 5.2 Di 14:15 HS 4

**Ultrasmall divergence of laser-driven ion beams from nanometer thick foils** — ●JIANHUI BIN<sup>1,2</sup>, WENJUN MA<sup>1,2</sup>, KLAUS ALLINGER<sup>1,2</sup>, HONGYONG WANG<sup>3</sup>, DANIEL KIEFER<sup>1,2</sup>, SABINE REINHARDT<sup>1</sup>, PETER HILZ<sup>1</sup>, KONSTANTIN KHRENNIKOV<sup>1,2</sup>, STEFAN KARSCH<sup>1,2</sup>, XUEQING YAN<sup>3</sup>, FERENC KRAUSZ<sup>1,2</sup>, TOSHIKI TAJIMA<sup>1</sup>, DIETER HABS<sup>1,2</sup>, and JOERG SCHREIBER<sup>1,2</sup> — <sup>1</sup>Faculty of Physics, Ludwig-Maximilians-Universität München, Am Coulombwall 1, 85748 Garching, Germany — <sup>2</sup>Max Planck Institute of Quantum Optics, Hans-Kopfermann-Str. 1, 85748 Garching, Germany — <sup>3</sup>State Key Laboratory of Nuclear Physics and Technology, Peking University, Beijing 100871, China

We report on experimental studies of divergence of proton beams from nanometer thick diamond-like carbon (DLC) foils irradiated by an intense laser with high contrast. Proton beams with extremely small divergence (half angle) of 2 degree are observed in addition with a remarkably well-collimated feature over the whole energy range, showing one order of magnitude reduction of the divergence angle in comparison to the results from  $\mu\text{m}$  thick targets. We demonstrate that this reduction arises from a steep longitudinal density gradient and an exponentially decaying transverse profile at the rear side of the ultrathin foils. Agreements are found both in an analytical model and in particle-in-cell simulations. Those novel features make nm foils an extremely attractive alternative for high flux experiments relevant for fundamental research in nuclear and warm dense matter physics.

K 5.3 Di 14:30 HS 4

**Ultrafast electron kinetics in SiO<sub>2</sub> under X-ray femtosecond irradiation** — ●NIKITA MEDVEDEV and BEATA ZIAJA — Center for

Free Electron Laser Science (CFEL at DESY), Notkestr. 85, 22706 Hamburg

When a dielectric is irradiated with an ultrashort laser pulse at X-ray photon energy, various physical processes take place. The photons are absorbed mostly by the deep-shell electrons, which are then excited to the high energy states of the conduction band and/or to the continuum. These electrons propagate further and perform secondary scatterings via elastic and inelastic channels. All these processes occur on femtosecond timescales. Material properties are then defined by the transient state of the electronic distribution within the solid. In this contribution we present a theoretical study of the ultrafast electron kinetics in solid SiO<sub>2</sub>, irradiated with the femtosecond X-ray laser pulse ( $\sim 40$  fs duration). The Monte-Carlo code, similar to [1,2], is applied to model the electron kinetics, which includes the primary ionization, secondary scattering of electrons, and Auger-decays of deep-shell holes. With the calculated transient electron density, the transient change of the optical properties (reflection, transmittance of visible light) of the material is estimated. The analysis of the results allows us to conclude that in the X-ray excited dielectric, the holes in the valence band give the dominant contribution to the optical properties of the material on femtosecond scales.

[1] N. Medvedev, B. Rethfeld, NJP 12, 073037 (2010) [2] B. Ziaja, R.A. London, J. Hajdu, JAP 97, 064905 (2005)

K 5.4 Di 14:45 HS 4

**Nonthermal phase transitions of semiconductors under femtosecond XUV irradiation** — ●NIKITA MEDVEDEV<sup>1</sup>, HARALD JESCHKE<sup>2</sup>, and BEATA ZIAJA<sup>1</sup> — <sup>1</sup>Center for Free Electron Laser Science (CFEL at DESY), Notkestr. 85, Hamburg — <sup>2</sup>Institut für Theoretische Physik, Goethe-Universität Frankfurt am Main

After high energy deposition into a semiconductor, an ultrafast phase transition can occur within  $\sim 100$  fs, driven by the changes in the interatomic potential. This ultrafast damage takes place much before the electron-phonon coupling heats up the lattice. To study this, we apply a new hybrid model for tracing the XUV laser induced atom dynamics, taking into account non-equilibrium electron kinetics [1]. The atomic motion is modeled with tight binding molecular dynamics. For tracing the electron distribution we used a hybrid model: Monte Carlo method for high energy electrons combined with a temperature equation for the partially thermalized low energy electrons [1,2]. We found that the electron relaxation kinetics in diamond, leading to a transition to graphite, took place within  $\sim 50$  fs after the exposure with the short laser pulse (10 fs). It was stimulated by a collapse of the band gap, when the number of electrons excited into the conduction band overcame 1.5 % of the valence electrons (corresponds to 0.7 eV/atom dose) [1]. These results demonstrate for the first time the non-thermal melting of semiconductors under the femtosecond XUV irradiation [1].

[1] N. Medvedev, H.O. Jeschke, B. Ziaja, NJP 14 (2012) [2] B. Ziaja, N. Medvedev, HEDP 8 (2012)

K 5.5 Di 15:00 HS 4

**High Harmonic Generation from Relativistic Plasma Surfaces in Steep Plasma Density Gradients** — ●ERICH ECKNER<sup>1</sup>, CHRISTIAN RÖDEL<sup>1,2</sup>, DANIEL AN DER BRÜGGE<sup>3</sup>, JANA BIERBACH<sup>1,2</sup>, MARK YEUNG<sup>4</sup>, THOMAS HAHN<sup>5</sup>, BRENDAN DROMEY<sup>4</sup>, DIRK HEMMERS<sup>5</sup>, GEORG PRETZLER<sup>5</sup>, OSWALD WILLI<sup>5</sup>, ALEXANDER

PUKHOV<sup>3</sup>, MATTHEW ZEPF<sup>2,3</sup>, and GERHARD PAULUS<sup>1,2</sup> — <sup>1</sup>Institut für Optik und Quantenelektronik, Friedrich-Schiller-Universität Jena, Max-Wien-Platz 1, 07743 Jena — <sup>2</sup>Helmholtz-Institut Jena, Fröbelstieg 3, 07743 Jena, Germany — <sup>3</sup>Institut für Theoretische Physik, Heinrich-Heine Universität Düsseldorf, Universitätsstraße 1, 40225 Düsseldorf — <sup>4</sup>Centre for Plasma Physics, Queen's University Belfast, BT7 1NN, United Kingdom — <sup>5</sup>Institut für Laser- und Plasma-physik, Heinrich-Heine-Universität Düsseldorf, Universitätsstraße 1, 40225 Düsseldorf, Germany

High harmonic generation by the interaction of intense laser pulses from relativistically oscillating surface plasmas is studied experimentally. Our observations reveal that efficient generation ( $10^{-4} \dots 10^{-6}$  at 20-40 eV) requires steep plasma density scale lengths ( $L_p/\lambda < 1$ ). However, the harmonic efficiency declines for the steepest plasma density scale lengths  $L_p \rightarrow 0$ . We have further observed a strong influence of the plasma scale length on the spectral fine structure of the high harmonics. While sharp harmonic lines are obtained for short plasma scale lengths, an extended plasma profile leads to strongly modulated harmonic spectra. Our experimental findings are reproduced by numerical simulations and simple analytical models.

K 5.6 Di 15:15 HS 4

**Modeling of finite systems irradiated by intense ultrashort hard X-ray pulses** — ●ZOLTAN JUREK<sup>1</sup>, BEATA ZIAJA<sup>1,2</sup>, and ROBIN SANTRA<sup>1,3</sup> — <sup>1</sup>Center for Free-Electron Laser Science, Deutsches Elektronen-Synchrotron, Notkestrasse 85, D-22607 Hamburg, Germany — <sup>2</sup>Institute of Nuclear Physics, Polish Academy of Sciences, Radzikowskiego 152, 31-342 Krakow, Poland — <sup>3</sup>Department of Physics, University of Hamburg, Jungiusstrasse 9, 20355 Hamburg, Germany

Large number of experiments have already been carried out at the existing hard X-Ray Free-Electron Laser facilities (LCLS, SACLA) during the recent years. Their great success generates even higher anticipation for the forthcoming X-ray sources (European XFEL).

Single molecule imaging and nanoplasma formation are the challenging projects with XFELs that investigate the interaction of finite, small objects, e.g. single molecules, atomic clusters with intense X-ray radiation. Accurate modelling of the time evolution of such irradiated systems is required in order to understand the current experiments and to inspire new directions of experimental investigation.

In this presentation we report on our theoretical molecular-dynamics tool able to follow non-equilibrium dynamics within finite systems irradiated by intense X-ray pulses. We introduce the relevant physical processes, present computational methods used, discuss their limitations

and also the specific constraints on calculations imposed by experimental conditions. Finally, we conclude with a few simulation examples.

K 5.7 Di 15:30 HS 4

**Ab initio simulations of laser-induced structural changes in solids** — ●EEUWE S. ZIJLSTRA — Theoretische Physik und CINSaT, Universität Kassel, Germany

The excitation of electrons in crystals by a femtosecond laser pulse leads to an abrupt change of the interatomic bonding properties, which can be described by means of laser-excited potential energy surfaces (PES). After introducing our in-house Code for Highly-excited Valence Electron Systems (CHIVES), which can be used to perform ab initio molecular dynamics simulations on laser-excited PESs for cells with up to 1000 atoms. I will present results for TiO<sub>2</sub> and silicon as a function of fluence, including coherent phonons, ultrafast phonon squeezing [1], and nonthermal melting. [1] E. S. Zijlstra, A. Kalitsov, T. Zier, and M. E. Garcia, Physical Review X (accepted).

K 5.8 Di 15:45 HS 4

**Atomistic-continuum modeling of short pulse laser melting of semiconductors** — ●VLADIMIR LIPP<sup>1,2</sup>, DMITRY IVANOV<sup>1,2</sup>, MARTIN GARCIA<sup>2</sup>, and BAERBEL RETHFELD<sup>1</sup> — <sup>1</sup>Technical University of Kaiserslautern, 67663 Kaiserslautern, Germany — <sup>2</sup>University of Kassel, 34132 Kassel, Germany

A combined atomistic-continuum computational technique for the description of the melting kinetics following short laser-pulse excitation of semiconductors is developed and applied to silicon. The method is based on the coupling of two different approaches: (i) the continuum model [1], which describes the laser light absorption, electron-phonon nonequilibrium and fast heat transport due to free carriers, and (ii) the molecular dynamics method, which accounts for the description of laser-induced nonequilibrium phase transition processes at atomic level. The combined model presented here unifies the advantages of both mentioned approaches [2] and allows a comprehensive study of the material behavior under the extreme conditions generated by ultrashort laser irradiation. Preliminary results on depth of laser-induced melting obtained with the combined model show good agreement with experiment. A recently developed new potential accounting for changes of the bonding state due to photo-excited free carriers [3] is a promising tool for the introduction of nonthermal processes in the description of silicon kinetics under strong nonequilibrium conditions. [1]. H.M. van Driel, Phys. Rev. B 35 (1987) 8166-8176. [2]. Dmitriy S. Ivanov and Leonid V. Zhigilei, Phys. Rev. B 68, 064114 (2003). [3]. Lalit Shokeen and Patrick K. Schelling, J. Appl. Phys. 109, 073503 (2011).

## K 6: Poster

Zeit: Dienstag 16:30–18:30

Raum: Poster EG

K 6.1 Di 16:30 Poster EG

**Untersuchung von Feldemissions-Elektronenstrahlquellen auf der Basis von Carbon Nanotubes** — ●MAXIMILIAN GRABNER<sup>1</sup>, THOMAS DANDL<sup>1</sup>, ANDREAS HIMPSL<sup>1</sup>, JOCHEN WIESER<sup>2</sup> und ANDREAS ULRICH<sup>1</sup> — <sup>1</sup>Physik Department E12, Technische Universität München, James-Frank-Str. 1, 85748 Garching — <sup>2</sup>Optimare Analytik GmbH & Co KG, Emsstr. 20, 26382 Wilhelmshaven

Durch die Verwendung von sehr dünnen Siliziumnitridmembranen können Experimente zur Elektronenstrahlanregung von Gasen in einem kompakten Laboraufbau durchgeführt werden. Diese Technik hat sich bei Verwendung von Glühkathoden (CRTs) als Elektronenstrahlquelle bereits vielfach bewährt. Die benötigte Heizspannung von wenigen Volt muss hierfür jedoch auf Hochspannungspotential (12 kV) geregelt werden, wodurch eine aufwändige elektronische Steuerung notwendig ist. Auch im Pulsbetrieb stößt diese Methode an gewisse Grenzen. Um den Aufbau zu vereinfachen wird der Einsatz von kalten Kathoden getestet. Hierzu werden Feldemitterkathoden auf der Basis von Carbon Nanotubes entwickelt und charakterisiert. Es werden die grundlegende Technik sowie erste Testmessungen vorgestellt. Neben den typischen Strom-Spannungs-Kennlinien wird hierbei vor allem auch das Verhalten im Pulsbetrieb untersucht.

Gefördert durch das BMBF Förderkennzeichen 13N11376.

K 6.2 Di 16:30 Poster EG

**Ripple-Bildung mittels Femtosekundenlaserstrahlung auf Oberflächen von Metallen und Hartstoffen** — ●MANUEL PFEIFFER, ANDY ENGEL und STEFFEN WEISSMANTEL — Hochschule Mittweida, University of Applied Sciences, Technikumplatz 17, 09648 Mittweida, Germany

Es werden Ergebnisse von Untersuchungen zur Ripple-Bildung auf Metallen und Hartstoffen durch Bestrahlung mit Ultrakurzpuls-Laserstrahlung präsentiert. Für die Untersuchungen stand eine Femtosekundenlaseranlage mit einem integrierten Clark-MXR CPA 2010 (Lasersystem: Wellenlänge 775 nm, Repetitionsrate 1 kHz, maximale Pulsenergie 1 mJ @ 775 nm, Pulsdauer 150 fs) zur Verfügung. Ziel dieser Studie war es, die Ripple-Eigenschaften in Abhängigkeit von den Laser- und Prozessparametern zu untersuchen. Hierfür wurden grundlegende Untersuchungen zur Entstehung der Ripple-Strukturen durchgeführt. Der Einfluss der Oberflächenmorphologie, der Schichtdicke aufgebrachtener Hartstoffschichten sowie der Polarisierung der auftretenden Laserstrahlung auf die Ripple-Strukturen wird präsentiert.

## K 7: Laseranwendungen und Lasermaterialbearbeitung I

Zeit: Donnerstag 11:15–12:30

Raum: HS 4

### Fachvortrag

K 7.1 Do 11:15 HS 4

**Influence of sample temperature on the expansion dynamics and the optical emission of laser-induced plasma** — SIMON ESCHLBÖCK-FUCHS<sup>1</sup>, MICHAEL HASLINGER<sup>1</sup>, ANDREAS HINTERREITER<sup>1</sup>, PHILIPP KOLMHOFFER<sup>1</sup>, NORBERT HUBER<sup>1</sup>, ROMAN RÖSSLER<sup>2</sup>, JOHANNES HEITZ<sup>1</sup>, and •JOHANNES PEDARNIG<sup>1</sup> — <sup>1</sup>Christian Doppler Laboratory Laser-Assisted Diagnostics, Institute of Applied Physics, Johannes Kepler University, A-4040 Linz, Austria — <sup>2</sup>voestalpine Stahl GmbH, A-4031 Linz, Austria

We investigate the influence of sample temperature on the dynamics and optical emission of laser induced plasma for various solid materials. Aluminium, silicon, and slag samples are heated to temperature  $T_s = 500$  °C and ablated in air by Nd:YAG laser pulses. The plasma dynamics is investigated by fast time-resolved photography. For laser-induced breakdown spectroscopy (LIBS) the optical emission of plasma is measured by Echelle spectrometers and intensified CCD cameras. For all sample materials the temporal evolution of plume size and broadband plasma emission vary systematically with  $T_s$ . The size and brightness of expanding plumes increase at higher  $T_s$  while the mean intensity remains independent of temperature. The intensity of emission lines increases with temperature for all samples. Plasma temperature and electron number density do not vary with  $T_s$ . We apply the calibration-free LIBS method to determine the concentration of major oxides in slag and find good agreement to reference data up to  $T_s = 450$  °C. The LIBS analysis of multi-component materials at high temperature is of interest for technical applications.

K 7.2 Do 11:45 HS 4

**Laser induced breakdown spectroscopy signal enhancement for atomic chlorine with a second orthogonal laser pulse** — •MICHAEL HASLINGER<sup>1</sup>, PHILIPP KOLMHOFFER<sup>1</sup>, ANDREAS HINTERREITER<sup>1</sup>, SIMON ESCHLBÖCK-FUCHS<sup>1</sup>, JOSEF HOFSTADLER<sup>1</sup>, NORBERT HUBER<sup>1</sup>, HERMANN WOLFMER<sup>2</sup>, JOHANNES HEITZ<sup>1</sup>, and JOHANNES PEDARNIG<sup>1</sup> — <sup>1</sup>Christian Doppler Laboratory Laser-Assisted Diagnostics, Institute of Applied Physics, Johannes Kepler University, A-4040 Linz, Austria — <sup>2</sup>voestalpine Stahl GmbH, A-4031 Linz, Austria

Laser Induced Breakdown Spectroscopy (LIBS) is an upcoming diagnostics method that enables to analyse almost all chemical elements. A strong improvement of sensitivity for the detection of trace elements by excitation with a second laser pulse is reported in literature. The aim of our work is to analyze iron oxide materials by LIBS and to search for possible enhancement of chlorine signals by double-pulse excitation. A 1064 nm laser pulse was used to ablate a pressed FeO sample and induce plasma, and an orthogonal second laser pulse was used to excite this plasma. The wavelength of the second laser was either 1064 nm or 193 nm. We measured the plasma properties for different laser wavelengths and inter pulse delay times. The plasma emission was monitored by optical spectroscopy from 200 nm to 850

nm. Our results show enhanced double-pulse LIBS signals for Cl under optimized conditions.

K 7.3 Do 12:00 HS 4

**Topographische Elementanalyse unebener Oberflächen mittels laserinduzierter Plasmaspektroskopie** — •CHRISTIAN BERESKO, CHRISTIAN PÖTZ, PETER KOHNS und GEORG ANKERHOLD — Hochschule Koblenz, RheinAhrCampus, Joseph-Rovan-Allee 2, 53424 Remagen

Unter der laserinduzierten Plasmaspektroskopie (LIBS) versteht man ein schnelles, berührungsfreies und minimal zerstörendes Verfahren der optischen Elementanalyse, welches die charakteristischen Emissionsspektren einer lasergenerierten Plasmaquelle auswertet.

Es wird über ein selbstentwickeltes, sehr kompaktes und vollständig lichtleitfasergeführtes LIBS-System mit geringer Pulsenergie bis zu 2mJ und hoher Repetitionsrate bis zu 80Hz berichtet, das es erlaubt, Oberflächen abzurastern und dabei gleichzeitig eine flächige Elementanalyse in Form eines "Element Mapping" durchzuführen. Um dabei nicht nur auf ebene Flächen beschränkt zu sein, wurden anhand der auftretenden LIBS-Signale verschiedene automatisierte Methoden zur optimalen Probenpositionierung in der Fokusebene der Sendeoptik entwickelt und verglichen. Die diskutierten Verfahren ermöglichen eine zuverlässige topographische Elementanalyse unebener Probenoberflächen. Die Auswertung und Elementzuordnung erfolgt durch Kombination einer Hauptkomponentenanalyse mit einem neuronalen Netzwerk.

Gefördert durch die Stiftung Rheinland-Pfalz für Innovation.

K 7.4 Do 12:15 HS 4

**Detektion von Metallen im Spurenbereich in Flüssigkeiten mittels laserinduzierter Plasmaspektroskopie** — •DANIELA NETZ, CASSIAN GOTTLIEB, PETER KOHNS und GEORG ANKERHOLD — Hochschule Koblenz, RheinAhrCampus, Joseph-Rovan-Allee 2, 53424 Remagen

Unter der laserinduzierten Plasmaspektroskopie (LIBS) versteht man ein schnelles, berührungsfreies und minimal zerstörendes Verfahren der optischen Materialanalyse, das das charakteristische spektrale Leuchten einer lasergenerierten Mikro-Plasmaquelle auswertet.

Das Messverfahren eignet sich auch für die hochempfindliche Elementanalyse von Flüssigkeiten und stellt damit eine interessante und vielversprechende Möglichkeit dar, ohne eine besondere Probenvorbereitung Verunreinigungen in wässrigen Lösungen beispielsweise durch gelöste Metallsalze von Kupfer, Chrom, Blei oder Aluminium schnell, differenziert und quantitativ zu detektieren. Für den Nachweis bis in den unteren ppm-Bereich verwendeten wir einen konventionellen LIBS-Aufbau mit Laserpulsenergien von einigen 10 mJ. Die Auswertung der charakteristischen Emissionsspektren erfolgte mit einer Hauptkomponentenanalyse in Kombination mit einem neuronalen Netz.

Gefördert durch die Stiftung Rheinland-Pfalz für Innovation.

## K 8: Laseranwendungen und Lasermaterialbearbeitung II

Zeit: Donnerstag 14:00–16:00

Raum: HS 4

K 8.1 Do 14:00 HS 4

**Laser induced periodic surface structures in thin metal foils** — •HAMZA MESSAOUDI, SUSANTA KUMAR DAS, ALEXANDER ANDREEV, MATTHIAS SCHNUEERER, and RUEDIGER GRUNWALD — Max Born Institute for Nonlinear Optics and Short-Pulse Spectroscopy, Max-Born-Str 2a, D-12489 Berlin, Germany

Femtosecond-laser induced periodic nanostructures were generated at the surface of extremely thin metal foils with the moving substrate method [1] in air. 5 micron thick Cu and Ti specimen were translated through a linear or point-like focus of a linearly polarized and frequency-converted femtosecond laser (pulse duration 120 fs, center wavelength 400 nm). It was found that two different types of ripple structures with high and low spatial frequencies corresponding to periods in the range of 70 nm and 300 nm, respectively, can be formed. The ripple type can be adjusted by confining the number and energy of the pulses and the scanning velocity. Between the distinct parameter

fields of stable formation, a transition range with partially changing ripple size and orientation appears. The nanostructured foils are of interest for laser ion acceleration in transmission mode [2]. Because of enabling an easy conversion to metal oxides and favoring material-saving approaches, these structured foils are also promising candidates for flexible solar cells and innovative approaches of photocatalysts.

References:

1. S. K. Das, et al., Nanotechnology 21, 155302 (2010).
2. A. Andreev, et al., Physics of Plasmas 18, 103103 (2011).

K 8.2 Do 14:15 HS 4

**Application of fs-laser Generated Nanogratings for Arbitrary Polarization Control** — •CHRISTIAN VETTER, SÖREN RICHTER, FELIX ZIMMERMANN, MATTHIAS HEINRICH, FELIX DREISOW, and STEFAN NOLTE — Institute of Applied Physics, Friedrich-Schiller-Universität Jena



We report on the generation of fs-laser induced nanogratings in fused silica and their intrinsic form-birefringent behavior. Based on that birefringence, it is shown, that nanogratings allow for the fabrication of intricately shaped and locally varying wave plates. More sophisticated structures may be used for optical mode conversion and other promising applications.

Nanogratings are permanent refractive index modifications based on emerging sub-wavelength cavities inside the bulk material. The grating period scales with the employed laser wavelength and number of applied pulses. Moreover, the orientation of the grating planes is perpendicular to the electric field direction. Since the typical grating period is smaller than the wavelengths of the visible spectral range, nanogratings act as an effective medium with anisotropic optical properties. That allows the fabrication of three-dimensional birefringent components with locally varying optical properties. The resulting spatially variable states of polarization are of great practical importance for optical mode conversion, beam shaping, improved material processing and other fields of application.

K 8.3 Do 14:30 HS 4

**Formation of femtosecond laser-induced nanogratings** — ●FELIX ZIMMERMANN<sup>1</sup>, SÖREN RICHTER<sup>1</sup>, CHRISTIAN VETTER<sup>1</sup>, ANDREAS TÜNNERMANN<sup>1,2</sup>, and STEFAN NOLTE<sup>1,2</sup> — <sup>1</sup>Institute of Applied Physics, Abbe Center of Photonics, Friedrich-Schiller-Universität Jena, Max-Wien-Platz 1, 07743 Jena, Germany — <sup>2</sup>Fraunhofer Institute for Applied Optics and Precision Engineering, Albert-Einstein-Straße 7, 07745 Jena, Germany

We investigated the formation of femtosecond pulse-induced subwavelength structures, also known as nanogratings, in the volume of transparent materials. These self-organized patterns appear after several ultrashort laser pulses undergoing three evolutionary stages from randomly distributed nanopores to a homogeneous formed grating. We analyzed the scaling behavior as well as structural properties of the nanogratings by varying typical laser pulse parameters. In order to use the inherent form-birefringence of nanogratings for optical devices, we measured the retardance as well as the polarization contrast intensity after several annealing steps. We found outstanding temperature resistibility against temperatures up to 850° C, allowing the application in even harsh conditions. Moreover, the feedback process providing the cumulative action of subsequent laser pulses can be attributed to dangling bond type defects.

K 8.4 Do 14:45 HS 4

**Inscription of tailored fiber Bragg gratings with a deformed wave-front** — ●CHRISTIAN VOIGTLÄNDER<sup>1</sup>, RIA KRÄMER<sup>1</sup>, JENS THOMAS<sup>1</sup>, DANIEL RICHTER<sup>1</sup>, and STEFAN NOLTE<sup>1,2</sup> — <sup>1</sup>Institute of Applied Physics, Abbe Center of Photonics, Friedrich-Schiller-Universität Jena, Max-Wien-Platz 1, 07743 Jena, Germany — <sup>2</sup>Fraunhofer Institute for Applied Optics and Precision Engineering, Albert-Einstein-Straße 7, 07745 Jena, Germany

Within the last years the interest in fiber Bragg gratings (FBGs) has ceaselessly grown, as they are excellent components for all-integrated fiber lasers. The fabrication with ultrashort laser pulses makes possible to directly induce them in active doped fibers. Thus, splicing within the laser cavity is not necessary anymore.

A common inscription technique for FBGs is the phase mask method, where an interference pattern is generated by overlapping the first diffraction orders behind the mask. This pattern is focused by a cylindrical lens into the core of the fiber. However, the grating period is predetermined by the phase mask, and another period usually requires another phase mask.

This drawback can be overcome by deforming the wave-front of the inscription beam before the phase mask. The aberrations lead to a tuned period of the interference pattern. A defocused beam can shift the period, while a coma induces a chirp of the grating period. Thus, the phase mask technique becomes more flexible.

K 8.5 Do 15:00 HS 4

**Characteristics of femtosecond laser pulse written Volume-Bragg-Gratings** — ●DANIEL RICHTER<sup>1</sup>, CHRISTIAN VOIGTLÄNDER<sup>1</sup>, RIA G. KRÄMER<sup>1</sup>, JENS U. THOMAS<sup>1</sup>, ANDREAS TÜNNERMANN<sup>1,2</sup>, and STEFAN NOLTE<sup>1,2</sup> — <sup>1</sup>Institut für Angewandte Physik, Abbe Center of Photonics, Friedrich-Schiller-Universität Jena, Max-Wien-Platz 1, 07743 Jena, Germany — <sup>2</sup>Fraunhofer Institut für Applied Optics and Precision Engineering, Albert-Einstein-Str. 7, 07745 Jena, Germany

Applying ultrashort laser pulses for the inscription of Volume-Bragg-Gratings (VBGs) opens a large door into the field of integrated and

monolithic solutions for light control. One significant advantage compared to other techniques is that a wide variety of transparent materials - which are most likely non-photosensitive - can be modified and enable therefore the possibility for monolithic solutions. We will show the basic characteristics of the written gratings like grating structure, reflection bandwidth or (tunable) diffraction efficiency. Additionally we will use a VBG to measure the Gouy shift like it is predicted in Gaussian optics and we will show a first realization of a multiwavelength beam combiner with a single element.

K 8.6 Do 15:15 HS 4

**Strukturierung von Volumenbeugungsgittern in transparenten Dielektrika mittels Interferenz von Femtosekunden-Laserstrahlung** — ●SEBASTIAN NIPPGEN<sup>1</sup> und DAGMAR SCHAEFER<sup>1,2</sup> — <sup>1</sup>Lehrstuhl für Lasertechnik LLT, RWTH Aachen University, Steinbachstraße 15, 52074 Aachen, Deutschland — <sup>2</sup>Fraunhofer-Institut für Lasertechnik ILT, Steinbachstraße 15, 52074 Aachen, Deutschland

Volumenbeugungsgitter (VBG) können vielseitig als spektral- oder winkelselektive Filter eingesetzt werden. Viele Anwendungen erfordern zeitlich und thermisch stabile Gitter oder eine Integration der VBG in bereits bestehende Optiken. Bei der konventionellen Herstellung von VBG werden Teilstrahlen von UV-Laserstrahlquellen in photosensitiven Dielektrika überlagert. Mittels Vor- oder Nachbehandlung wird das Abbild des Interferenzmusters als Brechungsindexmodulation mit einer maximalen Amplitude der Größenordnung  $\Delta n \approx 10^{-4}$  in das Dielektrika übertragen. Durch Zweistrahlinterferenz von Femtosekunden-Laserstrahlung können VBG hingegen in einem Prozessschritt in das Volumen von transparenten Dielektrika wie z.B. Quarzglas geschrieben werden. Die dabei erreichten Brechungsindexmodifikationen haben eine Größenordnung von  $\Delta n \approx 10^{-3}$ . Im Vortrag wird neben der Funktionsweise der VBG eine Gegenüberstellung der konventionellen Herstellung mit der Herstellung mittels Femtosekunden-Laserstrahlung vorgestellt sowie erste Ergebnisse der Gitterstrukturierung in Quarzglas präsentiert.

K 8.7 Do 15:30 HS 4

**3D-Mikrostrukturierung von Quarzglas mittels Femtosekundenlaserstrahlung unterschiedlicher Wellenlängen** — ANDY ENGEL, ●MANUEL PFEIFFER und STEFFEN WEISSMANTEL — Hochschule Mittweida, University of Applied Sciences, Technikumplatz 17, 09648 Mittweida, Germany

Es werden Ergebnisse der Untersuchungen zur Mikrostrukturierung von hochreinem Quarzglas durch Bestrahlung mittels Ultrakurzpuls-Laserstrahlung unterschiedlicher Wellenlängen präsentiert. Für die Untersuchungen wurde eine Femtosekundenlaseranlage mit einem integrierten Clark-MXR CPA 2010 (Lasersystem: Wellenlänge 775 nm, 387 nm bzw. 258 nm, Repetitionsrate 1 kHz, Pulsdauer < 200 fs) genutzt. Ziel der durchgeführten Untersuchungen war die Bestimmung der erzielbaren Qualität (z.B. Oberflächenrauheit) der eingebrachten Mikrostrukturen in Abhängigkeit von den applizierten Laserstrahl- und Prozessparametern (Wellenlänge, Fluenz, Pulsüberlappungsgrad usw.). Auf Grundlage der durchgeführten Abtragsuntersuchungen erfolgten die Optimierung der Strukturierungsparameter und die Erstellung von 3D-Demonstratorstrukturen zur Verdeutlichung der erzielbaren Qualität der Mikrostrukturen. Als Demonstratorstrukturen wurden Pyramiden, Halbkugeln, Kegel und Zylindergeometrien ausgewählt. Die Entfernung des, prozessbedingt auf der Materialoberfläche verbleibenden, Debris erfolgte durch eine nasschemische Nachbehandlung der laserstrukturierten Proben.

K 8.8 Do 15:45 HS 4

**Ultrashort high repetition rate exposure of dielectric materials: laser bonding of glasses** — ●SÖREN RICHTER<sup>1</sup>, SVEN DÖRING<sup>1</sup>, FELIX ZIMMERMANN<sup>1</sup>, ANDREAS TÜNNERMANN<sup>1,2</sup>, and STEFAN NOLTE<sup>1,2</sup> — <sup>1</sup>Institute of Applied Physics, Abbe Center of Photonics, Friedrich-Schiller-Universität Jena, Max-Wien-Platz 1, 07743 Jena, Germany — <sup>2</sup>Fraunhofer Institute of Applied Optics and Precision Engineering, Albert-Einstein-Straße 7, 07745 Jena, Germany

The realization of stable bonds between different glasses has attracted a lot interest in recent years. However, conventional bonding techniques are often problematic due to required thermal annealing steps which may lead to induced stress, whereas glue and other adhesives tend to degrade over time. These problems can be overcome by using ultrashort laser pulses. When focussed at the interface, the laser energy is deposited locally in the focal volume due to nonlinear absorption processes. While even single pulses can lead to the formation of bonds

between transparent glass substrates, the application of high repetition rates offers an additional degree of freedom. If the time between two pulses is shorter than the time required for heat diffusion out of the focal volume, heat accumulation of successive pulses leads to localized melting at the interface. The subsequent resolidification finally yields

strong and robust bonds. Using optimized processing parameters, we achieved a breaking strength up 95% of the pristine bulk material. In this presentation, we will detail the experimental background and the influence of the laser parameters on the achievable breaking strength.

## K 9: Laseranwendungen und Lasermaterialbearbeitung III

Zeit: Donnerstag 16:30–17:15

Raum: HS 4

K 9.1 Do 16:30 HS 4

**a laser-driven nanosecond proton source for radiobiological studies** — ●JIANHUI BIN<sup>1,2</sup>, KLAUS ALLINGER<sup>1,2</sup>, WALTER ASSMANN<sup>1</sup>, GUIDO A. DREXLER<sup>3</sup>, ANNA A. FRIEDL<sup>3</sup>, DIETER HABS<sup>1</sup>, PETER HILZ<sup>1</sup>, NICOLE HUMBLE<sup>4</sup>, DANIEL KIEFER<sup>2</sup>, WENJUN MA<sup>1</sup>, DOERTE MICHALSKAI<sup>4</sup>, MICHAEL MOLLS<sup>4</sup>, SABINE REINHARDT<sup>1</sup>, THOMAS E. SCHMID<sup>4</sup>, OLGA ZLOBINSKAYA<sup>4</sup>, JOERG SCHREIBER<sup>1,2</sup>, and JAN J WILKENS<sup>4</sup> — <sup>1</sup>Faculty of Physics, Ludwig-Maximilians-Universitaet Muenchen, Am Coulombwall 1, 85748 Garching, Germany — <sup>2</sup>Max Planck Institute of Quantum Optics, Hans-Kopfermann-Str. 1, 85748 Garching, Germany — <sup>3</sup>Department of Radiation Oncology, Ludwig-Maximilians-Universitaet Muenchen, Schillerstr. 42, 80336 Muenchen, Germany — <sup>4</sup>Department of Radiation Oncology, Technische Universitaet Muenchen, Klinikum rechts der Isar, Ismaninger Str. 22, 81675 Muenchen, Germany

Ion beams are relevant for radiobiological studies and for tumor therapy. In contrast to conventional accelerators, laser-driven ion acceleration offers a potentially more compact and cost-effective means of delivering ions for radiotherapy. Here we show that by combining advanced acceleration using nanometer thin targets and beam transport, truly nanosecond quasi-monoenergetic proton bunches can be generated with a table-top laser system, delivering single shot doses up to 7 Gray to living cells. Although in their infancy, laser-ion accelerators allow studying fast radiobiological processes as demonstrated here by measurements of the relative biological effectiveness of nanosecond proton bunches in human tumor cells.

K 9.2 Do 16:45 HS 4

**Analysis of the hole formation in ultrashort pulse laser deep drilling** — ●SVEN DÖRING<sup>1</sup>, TOBIAS ULLSPERGER<sup>1</sup>, SÖREN RICHTER<sup>1</sup>, ANDREAS TÜNNERMANN<sup>1,2</sup>, and STEFAN NOLTE<sup>1,2</sup> — <sup>1</sup>Institute of Applied Physics, Abbe Center of Photonics, Friedrich-Schiller-Universität Jena, Germany — <sup>2</sup>Fraunhofer Institute for Applied Optics and Precision Engineering, Jena, Germany

We present a detailed experimental study of the hole formation process during ultrashort pulse laser deep drilling in silicon by in-situ imaging. This technology allows to directly follow the evolution of the hole

shape inside a material which is opaque for the drilling radiation. Our observations show three characteristic phases of the drilling process for all parameters. At first, the hole capillary is excavated with high reproducibility. In a second phase, the drilling rate undergoes statistical variations which involve the formation of imperfections like bulges and multiple hole ends. Finally, forward drilling stops and only the diameter of the hole can increase further. Our investigation of the influence of process parameters like pulse energy and focus position on this behavior revealed an increase of the achievable hole depth up to a factor of 2 by optimizing the focus position, while minimizing the statistical variations.

K 9.3 Do 17:00 HS 4

**Molecular Dynamics Modeling of Short Laser Pulse Nanostructuring of Metals on the Experimental Scale** — ●DMITRY IVANOV<sup>1,2</sup>, VLADIMIR LIPP<sup>1,2</sup>, BAERBEL RETHFELD<sup>1</sup>, and MARTIN GARCIA<sup>2</sup> — <sup>1</sup>Technische Universitaet Kaiserslautern, Erwin-Schrödinger-Straße 46, 67663 Kaiserslautern — <sup>2</sup>University Kassel, Heinr.-Plett-Straße 40, 34132 Kassel

Short laser pulse surface nanoprocessing involves a number of concurrent fundamental physical processes. Due to different time and spatial scales of their activation it makes them difficult to study within the frames of a single computational approach and in the experimental analysis as well [1]. A transient character of the nonequilibrium states of matter induced with a short laser pulse hampers the applicability of continuum models, but classical Molecular Dynamics simulations are usually limited in the system sizes. In this work the MD-based model implemented in parallel algorithm and utilized in a coupling with a continuum description of the photo-excited free carrier's dynamics is extended to the scale directly accessible in the experiment [2]. The experimental data are then for the first time directly compared with the model predictions. The mechanisms responsible for the short laser pulse surface nanostructuring of metals are considered in the complex dynamics of competing processes simultaneously involved into the process. The modeling revealed a very good agreement with the experiment and predicted a new phenomenon potentially affecting the optical properties of material. [1] A.I. Kuznetsov et. al., Appl Phys. A 94, 221 (2009). [2] D.S. Ivanov et. al., Appl. Phys. A. 92, 791 (2008).