

JAHRESBERICHT
ANNUAL REPORT
2014



COVER *Messung eines Spiegelmoduls mit zwei Freiformspiegeln und Referenzstrukturen durch ein Computer Generiertes Hologramm. | Metrology of a mirror module having two freeform surfaces and reference structures with a Computer Generated Hologram.*

**JAHRESBERICHT
ANNUAL REPORT
2014**

VORWORT

PREFACE

Das Jahr 2014 war ein besonderes Jahr für die Photonik. Ihre Rolle als globale Schlüsseltechnologie und Treiber gesellschaftlichen Wandels wurde in diesem Jahr durch gleich zwei Nobelpreise für die Photonik gewürdigt. Akasaki, Amano und Nakamura erhielten den Nobelpreis für Physik für die Entwicklung der blauen LED und der damit verbundenen Revolution in der Beleuchtungstechnik in Bezug auf Effizienz und Designflexibilität. Betzig, Hell und Moerner wurden für ihre Arbeiten zur superaflösenden Mikroskopie mit dem Nobelpreis für Chemie gewürdigt. Ihr Arbeiten umgehen elegant das Abbe'sche Auflösungslimit und erlauben den Blick in die lebende Zelle mit nie dagewesener Präzision.

In diesem Zusammenhang bin ich besonders erfreut, einige der hervorragenden Beiträge, welche die Experten des Fraunhofer Instituts für Angewandte Optik und Feinmechanik IOF zur Erforschung des Lichts und seiner Anwendungen leisten konnten, hier vorstellen zu können. Mit Kreativität und großem Geschick haben sie im vergangenen Jahr die Bedeutung des Instituts als global sichtbares, exzellentes Innovationszentrum für Optik und Photonik nochmals eindrucksvoll unterstrichen. Als Institutsleiter bin ich stolz auf das Privileg, Tag für Tag mit den hervorragenden Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern des Instituts zusammenarbeiten zu dürfen und möchte die Gelegenheit nutzen, um allen meinen Dank für Ihren Anteil am Erfolg des Instituts im vergangenen Jahr auszusprechen.

Eine kurze, aber unvollständige Auswahl der herausragenden Erfolge des vergangenen Jahres muss selbstverständlich mit der Verleihung des »Deutschen Zukunftspreises« beginnen, der bereits im November 2013 an eine Gruppe um Stefan Nolte verliehen wurde. Die Jury würdigte insbesondere seinen Beitrag bei der Überführung von Grundlagenergebnissen zu ultraschnellen Laserprozessen in der Materialbearbeitung in erfolgreiche Anwendungen, z.B. bei der Herstellung effizienterer Motoren und besserer Stents für die Gefäßchirurgie.

2014 was an extraordinary year for photonics. Its role as a key enabling technology, driving social change on a global scale, was underlined by two Nobel Prizes for topics related to photonics. The Nobel Prize in Physics was awarded to Akasaki, Amano and Nakamura for the development of the blue LED and its fundamental role in the revolution of lighting in the context of massively increased efficiency and improved design flexibility. Betzig, Hell and Moerner were awarded for their work on superresolving microscopy with the Nobel Prize in Chemistry. They pioneered methods which elegantly circumvent Abbe's resolution limit and provide insight into the dynamics of living cells with unprecedented precision.

In this context, I am particularly proud to present some of the research breakthroughs and highlights that the experts at the Institute of Applied Optics and Precision Engineering have achieved in the course of the last year. With their creativity and skills, they highlighted once again the institute's role as the key innovation facility of the globally acknowledged photonics center that is Jena. As head of the institute, I am extraordinarily grateful to have the privilege to work with these outstanding people on a daily basis and would like to take the opportunity to thank each and every member of the institute for his or her contribution to its success.

Among the particularly outstanding achievements of 2014, I would like to mention the "Deutscher Zukunftspreis", which was already awarded to a team around Stefan Nolte in November 2013 for his contribution in transferring fundamental research in ultrafast laser-material interaction into an industrial manufacturing tool, which is used, for example, to fabricate more efficient combustion engines and more precise surgical stents. October 2014 saw the opening of a hands-on exhibit on the topic in the "Deutsches Museum" in Munich and was a just cause to celebrate the occasion.



Seit Oktober 2014 beschäftigt sich ein Exponat im Deutschen Museum in München mit der Thematik. Seine Einweihung wurde ausgelassen und – der Örtlichkeit angemessen – zünftig gefeiert.

Als Abschluss eines hochgradig kompetitiven Verfahrens wurde Jens Limpert im vergangenen Jahr ein besonders prestigeträchtiger »ERC consolidator grant« der Europäischen Union für seine exzellenten Beiträge zur Entwicklung von leistungsstarken Ultrakurzpulsfasern zugesprochen. Als Kooperationsentwicklung mit dem Fraunhofer IOF ist diese Klasse von Lasern in beinahe allen denkbaren Parametern früheren Designs deutlich überlegen. Sie sind besonders wirtschaftlich einzusetzen, von kleiner Bauform und so robust, dass sie auch in extremen Umgebungen, wie im Weltraum, zuverlässig arbeiten. Dementsprechend benutzte die ESA im letzten Jahr erstmals ein am Fraunhofer IOF entwickeltes Faserlasermodul, um ihren ATV-5 Transporter sicher durch die unendlichen Weiten des Weltraums zu einem millimetergenauen Rendezvous mit der internationalen Raumstation ISS zu führen.

Im letzten Jahr nahm auch die Forschungsallianz 3Dsensation unter Führung des Fraunhofer IOF ihre Arbeit auf. In dieser Allianz ergründet ein starkes, interdisziplinäres Netzwerk aus derzeit schon über 70 Partnern aus Forschung und Industrie den Beitrag von 3D-Technologien und Mensch-Maschine-Schnittstellen zur Lösung bedeutsamer Gesellschaftsprobleme des 21. Jahrhunderts. Zu diesen gehören die Transformation der Industriegesellschaft im Angesicht von Digitalisierung und alternder Gesellschaft, die Automatisierung des Individualverkehrs, die Verbesserung der Gesundheitsversorgung sowie die Stärkung der Sicherheit im öffentlichen Raum. Der interdisziplinäre Ansatz der Forschungsallianz fokussiert dabei auf den Menschen und die Frage, wie 3D-Technologien seine Lebensqualität steigern können. Die Technologieführerschaft des Fraunhofer IOF in Bezug auf 3D-Messtechnik und innovative Projektionskonzepte wird durch eine Reihe von in 2014

Jens Limpert was awarded the extremely prestigious and highly competitive ERC consolidator grant of the European Union in January 2014 for his ongoing work and ground-breaking achievements in the development of high power ultrashort pulse fiber lasers. These lasers have been co-developed by the Fraunhofer IOF, and surpass prior designs in every imaginable aspect. At the same time, they are extremely economical, have a small ecological footprint and are rugged enough for extreme environments so they can be used, among others, in space applications. The ESA consequently used a laser module developed by the Fraunhofer IOF to safely guide their ATV-5 transporter through the vast distances of space to a millimeter-perfect rendezvous with the international space station ISS.

Last year also marked the kick-off of the interdisciplinary 3Dsensation research alliance under the lead of the Fraunhofer IOF. The alliance is formed by a large network of currently more than 70 partners from science and industry, who fathom the contribution of 3D technology-driven man-machine-interfaces to the solution of major societal challenges in the 21st century. These include the transformation of industry in the face of the ever-accelerating digitalization and the aging society, the transition to assisted and autonomous cars, the improvement of medical care and the increase of public security. Its efforts are backed up by a set of projects that bolster the role of the Fraunhofer IOF as a technological leader in optical 3D sensors and advanced projection technologies, such as the MIDAQ and PRIAMOS projects which started in 2014.

I am particularly proud of the fact that the institute's excellence is not limited to research. Its ongoing dedication to the education of young scientists has not only created a generation of capable young researchers and technicians, but was also honoured by the Society of Vacuum Coaters who awarded their Mentor Award to the institute's co-director Norbert Kaiser, and by the Technical

LÖSUNGEN MIT LICHT SOLUTIONS WITH LIGHT

begonnenen Projekten, von denen MIDAQ und PRIAMOS stellvertretend genannt seien, unterstrichen und in Zukunft weiter ausgebaut.

Es ist mir eine besondere Freude zu sehen, dass sich die Expertise des Instituts nicht auf exzellente Forschung beschränkt. Die beständigen Anstrengungen der Mitarbeiter für eine nachhaltige Lehre und Ausbildung hat dazu beigetragen, eine Generation kompetenter Nachwuchsforscher und Techniker zu formen. Als besondere Wertschätzung dieser Anstrengungen wurde Norbert Kaiser von der Gesellschaft für Vakuumbeschichtung mit dem Mentor-Award für exzellente und fortdauernde Anstrengungen in der Lehre ausgezeichnet, und Gunther Notni auf eine Professur für Qualitätssicherung und industrielle Bildverarbeitung an der Technischen Universität Ilmenau berufen.

Zum zweihundertsten Male jährte sich im vergangenen Jahr die Entdeckung der Fraunhofer'schen Linien durch den Namenspatron unserer Forschungsgesellschaft. Die Fraunhofer-Gesellschaft wählte das Fraunhofer IOF als zentralen Veranstaltungsort für dieses denkwürdige Ereignis aus, welches durch die Einweihung des im neuen Glanz erstrahlenden Meridianinstruments aus der Hand Joseph von Fraunhofers im Foyer des Fraunhofer IOF den entsprechend feierlichen Rahmen erhielt. Die Installation zeigt, dass schon im 19. Jahrhundert nur die Kombination von Feinmechanik und angewandter Optik exzellente Forschung ermöglichte. Der mikrooptische Sternprojektor im Hintergrund schlägt den Bogen zu Optik und Feinmechanik der Gegenwart und macht deutlich, wie weit sich die Optik in den letzten 200 Jahren entwickelt hat, ohne ihre Wurzeln verleugnen zu können oder zu wollen.

Die Bedeutung der Photonik in der Lösung wichtiger Probleme der Menschheit wird indes sogar von den Vereinten Nationen anerkannt, die 2015 zum internationalen Jahr des Lichts ausgerufen haben. Laut UNESCO wird es »das Bewusstsein

University of Ilmenau who summoned Gunther Notni to take up a professorship for quality control and industrial image processing systems.

In late 2014, we celebrated the bicentennial anniversary of the discovery of the Fraunhofer lines with the ceremonial display of Joseph Fraunhofer's personal historical meridian device in the Fraunhofer IOF's entrance hall. The device is contrasted by a microoptical star-projector, which helps to give an understanding of its functionality. These twin exhibits are both examples of how a combination of precision engineering with applied optics is able to build excellent devices, suitable for outstanding science. Their connection is a testimony to the two hundred years of evolution in optics and to the common origins and methods of scientific achievements.

2015 has even more reason for celebration. The significance of photonics and its potential to address some of the most pressing challenges humanity faces in the 21st century is appreciated even by the United Nations who have declared 2015 the "International Year of Light". It will "raise awareness of how optical technologies promote sustainable development and provide solutions to worldwide challenges in energy, education, agriculture, communications and health". I am very excited to announce a vivid and rich set of events that will be hosted in Jena for the occasion. The official opening took place in January 2015 with the phenomenally successful "LichtPhänomene" live show, together with almost 3000 children and adults who enjoyed a set of exciting on-stage experiments and illuminating acts. Altogether, the International Year of light will bolster the existing outreach efforts and strengthen awareness and enthusiasm for optics as a whole.

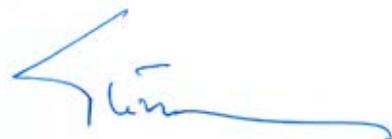
Let me also take the opportunity to express my gratitude for the ongoing and wholehearted support that we experience from the vast network that the institute is

dafür, wie optische Technologien nachhaltige Entwicklungen vorantreiben und Lösungen für globale Herausforderungen in Bezug auf Energie, Bildung, Landwirtschaft, Kommunikation und Gesundheit liefern, schärfen.« Ich freue mich ganz besonders, Ihnen ein reichhaltiges Programm versprechen zu können, mit dem die Lichtstadt Jena mit dem Fraunhofer IOF ihren Beitrag zur Verwirklichung der Ziele der Vereinten Nationen leisten wird. Zur Eröffnung des Lichtjahres entzündeten das Fraunhofer IOF, das Leibniz-Institut für Photonische Technologien und die Stadt Jena mit vielen freiwilligen Helfern ein wahres Feuerwerk an einleuchtenden Experimenten und erleuchtenden Aufführungen vor fast 3000 Kindern und Junggebliebenen und setzten damit einen Standard für die weiteren Ereignisse zum Jahr des Lichts, welches die Wahrnehmung des Fraunhofer IOF und die Begeisterung für die Photonik in der Bevölkerung stark verbessern wird.

Lassen sie mich auch die Gelegenheit ergreifen, meinen Dank allen Partnerinstituten, Forschungsförderern, Stiftungen, Konzernen und Firmen, die auch im letzten Jahr auf die Innovationsfähigkeit des Fraunhofer IOF gesetzt haben, auszusprechen. Ohne Ihr langfristiges Engagement wäre Optikforschung auf Weltniveau, wie sie in Jena betrieben wird, kaum denkbar.

Ich wünsche allen Lesern ein erfolgreiches Jahr 2015.

Prof. Dr. Andreas Tünnermann



Direktor des Fraunhofer IOF | Director of the Fraunhofer IOF

embedded in, including countless partner institutions, research agencies, public foundations and industrial partners.

INHALT

Das Institut im Profil	6
Ausgewählte Ergebnisse 2014	32
Optische Komponenten und Systeme	34
High Dynamic Grayscale Lithography with Fast Imaging Violet-LED Exposure	36
Mikro-Optik Back-End Prozess durch UV-Replikation auf CMOS-Wafer	38
Mehrkanaliges Near-to-eye Display mit Lichtleiter	40
Arrayprojektor zur Abbildung auf Freiformflächen	42
Freiformteleskop mit Korrekturspiegel	44
Neuartige Beschreibungen optischer Freiformflächen	46
Glas-Glas-Direktbonden	48
Verstärkung optischer Effekte durch plasmonische Nanoringe	50
Feinmechanische Komponenten und Systeme	52
Positionierung optischer Elemente für das Euclid-Instrument	54
Montagegerechte Fertigungstechnologie für gefasste Optik	56
Filterarrays für Raumfahrtinstrumente zur Erdbeobachtung	58
Funktionale Oberflächen und Schichten	60
Lasergenerierte Antireflexstrukturen für Terahertz-Optiken	62
Analyse geringster Verluste von optischen Schichten	64
Abriebstabile optische Oberflächen mit einstellbarer Benetzung	66
EPOS – Nanostrukturierung von Polycarbonat für Automobilanwendungen	68
UV-verstärkte Silberschichten mit exzellenter Umweltbeständigkeit	70
Hochreflektierende Beschichtungen für die nächste Generation der Lithographie	72
Durch Black Silicon verbesserte Ge-on-Si-Photodioden	74
Photonische Sensoren und Messsysteme	76
Spektrale und winkelaufgelöste Streulichtanalyse	78
Flachbauendes Array-Mikroskop mit hohem Auflösungsvermögen	80
Handscanner für die 3D-Oberflächenerfassung unter Wasser	82
Navigationsbasierte Automatische Multi-View-3D-Messung	84
Zweispitzen-Nahfeldmikroskopie an nanooptischen Bauelementen	86
Lasertechnik	88
Faserlaser für Rendezvous und Docking	90
Leistungsdynamisch durchstimmbarer Laser für LIDAR Prüfstand	92
Kohärente Addition ultrakurzer Pulse	94
Profilloptimierung laseraktiver Preformen und Fasern	96
Verbesserte Materialbearbeitung mit raum-zeitlich geformten ultrakurzen Laserpulsen	98
Modelle zur Laser-Strukturierung von Dünnschicht-Solarzellen	100
Fraunhofer-Verbund Light & Surfaces und Fraunhofer-Gesellschaft	102
Namen, Daten, Ereignisse	108

CONTENT

Profile of the institute	6
Selected results 2014	32
Optical components and systems	34
High Dynamic Grayscale Lithography with Fast Imaging Violet-LED Exposure	36
Micro-optic back-end process using UV replication on CMOS substrates	38
Multi-aperture near-to-eye display with lightguide	40
Array projector for projection on arbitrary curved screens	42
Freeform telescope with corrector mirror	44
New descriptions of freeform optical surfaces	46
Glass-glass direct bonding	48
Enhancement of optical effects with plasmonic nanorings	50
Precision engineering components and systems	52
Positioning of optical elements for the EUCLID instrument	54
Advanced manufacturing technology for optics assembly	56
Filter arrays for space instruments for earth observation	58
Functional surfaces and layers	60
Laser-generated antireflection structures for Terahertz optics	62
Analysis of low losses in optical coatings	64
Mechanically stable optical surfaces with adjustable wetting properties	66
EPOS – nanostructuring of polycarbonate for automotive applications	68
UV-enhanced Ag coatings with excellent environmental stability	70
High-reflective coatings for next-generation lithography	72
Black Silicon enhanced Ge-on-Si photodiodes	74
Photonic sensors and measuring systems	76
Spectral and angle resolved light scattering analysis	78
Thin array microscope with high optical resolution	80
Handheld underwater 3D scanner	82
Navigation-based automatic multi-view 3D measurement	84
Dual-SNOM characterization of nano-optical devices	86
Laser technology	88
Fiber laser for rendezvous and docking	90
Highly dynamic (>100 dB) continuous power-tunable fiber laser	92
Coherent addition of ultrashort pulses	94
Profile optimization of laser-active preforms and fibers	96
Enhanced material processing using spatiotemporal pulse shaping	98
Models for laser structuring of thin-film solar cells	100
Fraunhofer Group Light & Surfaces and Fraunhofer-Gesellschaft	102
Names, dates, activities	108



DAS INSTITUT IM PROFIL

PROFILE OF THE INSTITUTE

Das Fraunhofer IOF entwickelt innovative Lösungen mit Licht für die Zukunftsfelder Energie & Umwelt, Information & Kommunikation, Gesundheit, Produktion sowie Sicherheit & Mobilität. Dazu verknüpft es angewandte Forschung und Entwicklung mit exzellenter Grundlagenforschung zur Kontrolle von Licht – von der Erzeugung und Manipulation bis hin zur Anwendung. Dabei wird die gesamte photonische Prozesskette abgebildet, vom Systemdesign bis zur Fertigung von Prototypen. Herausragende Ergebnisse der Grundlagenforschung sowie strategische Kooperationen mit Partnern aus der Industrie belegen die Forschungsstärke des Fraunhofer IOF. Die Arbeiten erfolgen sowohl im Rahmen öffentlich finanzierter Vorlaufforschung als auch im direkten Auftrag der Wirtschaft.

Das Fraunhofer IOF steht in der Tradition der Jenaer Optikpioniere Carl Zeiss, Ernst Abbe und Otto Schott. Es ist regional verankert, pflegt vielfältige Kooperationen mit Unternehmen sowie Forschungs- und Bildungseinrichtungen am Standort und trägt als wissenschaftliches Zentrum der Optikregion Jena durch Innovationen, Personal- und Wissenstransfer sowie Ausgründungen zur regionalen Entwicklung bei. Gleichzeitig ist das Fraunhofer IOF national und international ausgerichtet und pflegt ein Netzwerk mit Partnern aus Europa, Nordamerika und Asien. Das Fraunhofer IOF misst sich an internationalen Standards, daher sind vertrauensvolle Zusammenarbeit und ein internationaler Austausch in Forschung und Entwicklung unabdinglich.

Das Institut ist in den fünf Geschäftsfeldern Optische Komponenten und Systeme, Feinmechanische Komponenten und Systeme, Funktionale Oberflächen und Schichten, Photonische Sensoren und Messsysteme sowie Lasertechnik tätig. Die enge Verzahnung der Geschäftsfelder erlaubt die Erarbeitung von Systemlösungen für unsere Kunden. Im Abschnitt der wissenschaftlichen Beiträge werden ausgewählte Forschungsinhalte der einzelnen Geschäftsfelder vorgestellt.

The Fraunhofer IOF develops innovative solutions with light for the future of energy & environment, information & communication, healthcare, production, and safety & mobility. It combines applied research and development with high quality fundamental research to control light – from its generation and manipulation to its actual use – covering the entire process chain from system design to the manufacture of prototypes. Outstanding basic research findings and strategic cooperation arrangements with various partners in industry demonstrate the research strengths of the Fraunhofer IOF. Its work is carried out as part of publicly-funded initial research initiatives as well as on the direct commission of industry.

The Fraunhofer IOF follows the tradition of the Jena-based optics pioneers Carl Zeiss, Ernst Abbe and Otto Schott. It has a regional focus, maintains diverse cooperation arrangements with both businesses as well as research and educational institutions at its location. As a scientific center of the Jena optics region it contributes to regional development with innovation, staff and knowledge transfer and spin-off ventures. At the same time, the Fraunhofer IOF is both national and international in its orientation and maintains a network of partners in Europe, North America and Asia. The Fraunhofer IOF adheres to international standards; close cooperation and international knowledge transfer in research and development are indispensable elements of this.

The institute works in the five business fields of Optical Components and Systems, Precision Engineering Components and Systems, Functional Surfaces and Layers, Photonic Sensors and Measuring Systems and Laser Technology. The close links between the business fields makes it possible to develop system solutions for customers. The business fields at the Fraunhofer IOF are separately presented and described in the section of scientific articles.

KOMPETENZEN COMPETENCES

Design und Simulation

Zentrale Kompetenz und Basis aller Entwicklungen am Fraunhofer IOF sind Optik- und Mechanikdesign sowie die Simulation und Analyse optischer und opto-mechanischer Systeme, einschließlich thermischer und thermo-optischer Effekte. Für die Bearbeitung der vielfältigen Anforderungen stehen umfangreiche Design- und Modellierungswerkzeuge zur Verfügung. Aufgabenspezifische Add-ons erlauben die Simulation und Optimierung von komplexen Systemen.

Mikro- und Nanostrukturierung

Die Erzeugung und Replikation optischer Mikro- und Nanostrukturen ist Grundlage für moderne komplexe optische Systeme. Die am Institut vorhandene technologische Basis erlaubt die Fertigung und Charakterisierung von High-End mikro- und nanooptischen Elementen höchster Auflösung auf bis zu 12"-Substraten.

Materialien der Optik und Photonik

Die Nanostrukturtechnik ermöglicht die Entwicklung von Materialien mit neuartigen optischen Eigenschaften, wie beispielsweise photonische Kristalle und Metamaterialien. Die Erforschung dieser Materialien erfolgt unter anderem im Zentrum für Innovationskompetenz »ultra optics®«.

Beschichtung und Oberflächenfunktionalisierung

Funktionale Beschichtungen und Oberflächen sind wesentliche Bestandteile optischer Systeme. Umfangreiche Kompetenzen bestehen im Design optischer Schichtsysteme, in der Entwicklung von Beschichtungs- und Strukturierungsverfahren für unterschiedliche Anwendungen und in der Charakterisierung von Oberflächen und Schichten.

Ultrapräzisionsbearbeitung

Das Fraunhofer IOF stellt mittels Ultrapräzisionsbearbeitung Metallspiegel, Gitter und kunststoffbasierte Linsen und Linsenarrays her. Eingesetzt werden Diamantwerkzeuge zur Bear-

Design and simulation

The core area of expertise and the basis of all development at Fraunhofer IOF is optical and mechanical design and the simulation and analysis of optical and optomechanical systems, including thermal and thermo-optical effects. Wide-ranging design and modelling tools, together with task-specific add-ons, enable the simulation and optimization of systems.

Micro- and nanostructuring

The generation and replication of optical micro- and nanostructures are basis for modern and complex optical systems. The technological equipment available at the institute enables the production and characterization of high-end micro- and nanooptical elements of highest resolution on substrates up to 12".

Optics and photonics materials

Nanostructure technology enables the development of new materials for optics and photonics, such as photonic crystals and metamaterials. The investigation of these materials is carried out at the Center for Innovation Competence "ultra optics®".

Coating and surface functionalization

Functional coatings and surfaces are essential elements of optical systems. We offer extensive expertise in the design of optical layer systems, in the development of coating and structuring processes for diverse applications and in the characterization of surfaces and layers.

Diamond-based ultra-precision processing

The Fraunhofer IOF manufactures metal mirrors, gratings and plastic-based lenses and lens arrays using ultra-precision processing. For this purpose diamond tools are used to process metal, crystal and plastic optics for application in the wavelength range from 14 µm to 13.5 nm.

beitung von Metall-, Kristall- und Kunststoffoptiken für die Anwendung im Wellenlängenbereich von 14 µm bis 13,5 nm.

Ultrakurzpuls-Laserbearbeitung

Ultrakurzpuls Laser mit Pulsdauern von wenigen Pikosekunden oder Femtosekunden besitzen hohes Einsatzpotenzial zur hochpräzisen Strukturierung verschiedener Materialien. Aufgrund der kurzen Energiedeposition, in einem Zeitbereich der unterhalb der thermischen Relaxationszeit liegt, lässt sich ein Abtrag praktisch ohne mechanische oder thermische Schädigung des Werkstücks erzielen.

Mikromontage und Systemintegration

Das Fraunhofer IOF besitzt umfangreiches Know-how in der Entwicklung von Technologien zur hybriden Integration unterschiedlicher Komponenten für den hochpräzisen Aufbau komplexer opto-mechanischer und opto-elektronischer Mikro- und Makrosysteme. Dies umfasst Montagetechnologien (Positionieren, Justieren), Füge-technologien (Kleben, Laserlöten, Plasmabonden, Laserspleißen, Justierdrehen) und Integration.

Laserentwicklung und nichtlineare Optik

Für die Entwicklung von Hochleistungs-Faserlasern mit beugungsbegrenzter Strahlqualität bestehen am Fraunhofer IOF Kompetenzen in Faserdesign, Optikdesign und Thermo-optik, in der Aufbau- und Verbindungstechnik für Faserlaser und in der Entwicklung effizienter Fasereinkoppler und Strahlführungssysteme.

Messverfahren und Charakterisierung

Das Fraunhofer IOF entwickelt optische Messverfahren und -systeme nach kundenspezifischen Anforderungen. Schwerpunkte sind die Charakterisierung optischer und nichtoptischer Oberflächen, Schichten, Komponenten und Systeme im Mikro- und Subnanometerbereich sowie die 3D-Formfassung.

Materials processing using ultrashort laser pulses

Ultrashort pulse lasers with pulse durations of a few picoseconds or femtoseconds show great potential for highly-precise structuring of a wide range of materials. Due to the short energy deposition in the time range below the thermal relaxation time, a material removal can be achieved with practically no mechanical or thermal damage.

Micro-assembly and system integration

The Fraunhofer IOF possesses extensive expertise in the development of technologies for the hybrid integration of diverse components with high precision for the setup of complex opto-mechanical and opto-electronic micro- and macrosystems. This encompasses assembly technologies (positioning, aligning), joining technologies (bonding, laser soldering, plasma bonding, laser splicing, alignment turning) and integration.

Laser development and non-linear optics

For the development of high-power fiber lasers with diffraction-limited beam quality, Fraunhofer IOF possesses expertise in fiber design, optics design and thermo-optics, in assembly and packaging technology for fiber lasers and in the development of efficient fiber couplers and beam guidance systems.

Measurement methods and characterization

The Fraunhofer IOF develops optical measurement methods and systems to customer requirements. Key areas include the characterization of optical and non-optical surfaces, layers, components and systems in the micrometer and subnanometer range and in 3D shape acquisition.

ORGANISATION ORGANIZATION



HEAD OF INSTITUTE



Director
Prof. Dr. Andreas
Tünnermann



Deputy director
Prof. Dr. Norbert
Kaiser



Consultant
Prof. Dr.
Wolfgang Karthe

ADMINISTRATION



Administration
Elke Heuer



**Strategy, marketing,
coordination**
Dr. Kevin Füchsel

COMPETENCES



**Design and
simulation**
Prof. Dr. Herbert
Gross



**Micro and nano-
structuring**
Dr. Ernst-Bernhard
Kley



**Coating and surface
functionalization**
Prof. Dr. Norbert
Kaiser



**Micro-assembly and
system integration**
Dr. Erik
Beckert



**Diamond-based
ultra-precision
processing**
Dr. Stefan
Risse



**Laser development
and non-linear
optics**
Prof. Dr. Jens
Limpert



**Materials processing
using ultrashort laser
pulses**
Prof. Dr. Stefan
Nolte



**Measurement
methods and
characterization**
Prof. Dr. Gunther
Notni

BUSINESS FIELDS



**Optical components
and systems**
Dr. Andreas
Bräuer



**Precision engineering
components and
systems**
Dr. Ramona
Eberhardt



**Functional optical
surfaces and layers**
Prof. Dr. Norbert
Kaiser



**Photonic sensors and
measuring systems**
Prof. Dr. Gunther
Notni

STRATEGIC PROJECTS

ultra optics®
Center of innovation
competence

Prof. Dr. Andreas Tünnermann



3Dsensation
Innovation alliance

Prof. Dr. Andreas
Tünnermann



3Dsensation

Holistic concept and
simulation of modern
optical systems

Prof. Dr. Herbert Gross

KoSimO

KURATORIUM ADVISORY COMMITTEE



Technical services
Wieland Stöckl



Optics and photonics
materials
Prof. Dr. Thomas
Pertsch



Laser technology
Prof. Dr. Stefan
Nolte

fo+
Freeform Optics Plus

Dr. Ramona
Eberhardt



VORSITZENDER | CHAIR

- Dr. Michael Mertin | JENOPTIK AG, Jena

MITGLIEDER | MEMBERS

- Christian Amann | BMW Group, München
- Dr. Klaus Bartholmé | Friedrich-Schiller-Universität Jena, Jena
- Petra Bogdanski | Mahr GmbH, Jena
- Dr. Hans Eggers | Bundesministerium für Bildung und Forschung, Bonn
- Robert Fetter | Thüringer Ministerium für Bildung, Wissenschaft und Kultur, Erfurt
- Dr. Roland Langfeld | Schott AG, Mainz
- Manfred Lieke | Astrium GmbH Satellites, Friedrichshafen
- Prof. Dr. Roland Sauerbrey | Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf, Dresden
- Dr. Wolfgang Rupp | Carl Zeiss SMT GmbH, Oberkochen
- Dr. Christian Schmitz | TRUMPF GmbH + Co. KG, Ditzingen
- Prof. Dr. Christian Spielmann | Friedrich-Schiller-Universität Jena, Institut für Optik und Quantenelektronik, Jena
- Dr. Berit Wessler | OSRAM GmbH, München
- Dr. Werner Wilke | VDI/VDE Innovation + Technik GmbH, Berlin

EHRENMITGLIEDER | HONORARY MEMBERS

- Dr. Franz-Ferdinand von Falkenhausen
- Prof. Dr. Wolfgang Karthe

DAS INSTITUT IN ZAHLEN

THE INSTITUTE IN FIGURES

Betriebshaushalt

Der Betriebshaushalt 2014 ist gegenüber dem Vorjahr um 4,2% gewachsen, wobei die Aufwendungen für Personal stärker (8,6%) anstiegen als die Sachausgaben (0,5%). Basis der erfolgreichen Entwicklung ist der hohe Ertragsanteil aus der Auftragsforschung. Der Industrieertrag erreichte abermals über 11 Millionen Euro. Die eingeworbenen öffentlichen Mittel erreichten ebenfalls über 11 Millionen Euro.

Investitionen

Die kontinuierliche Investition in Infrastruktur ist notwendige Grundlage für die erfolgreiche Entwicklung innovativer Lösungen für unsere Auftraggeber. 2014 wurden insgesamt 4,3 Millionen Euro in die Erweiterung der technologischen Infrastruktur des Instituts investiert.

Personal

Mit dem Anwachsen des Betriebshaushaltes konnten auch 2014 neue Arbeitsplätze geschaffen werden. Die Zahl der Mitarbeiter erhöhte sich gegenüber 2013 um 6,5%, wobei die Zahl der wissenschaftlichen Mitarbeiter und Doktoranden leicht zurück ging, die Zahl der technischen Mitarbeiter

Operating budget

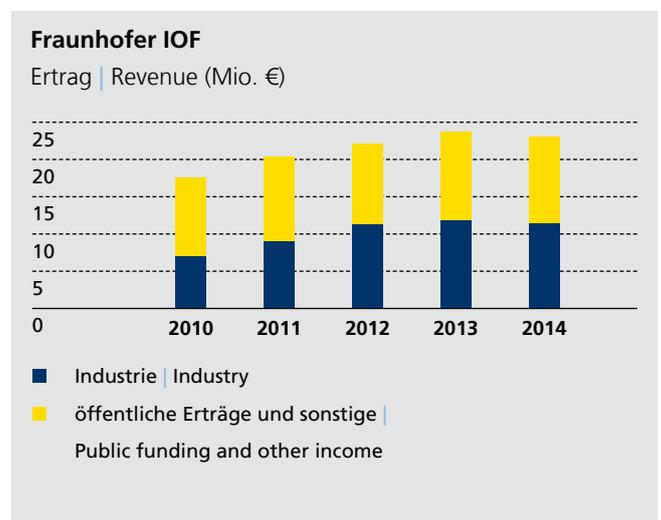
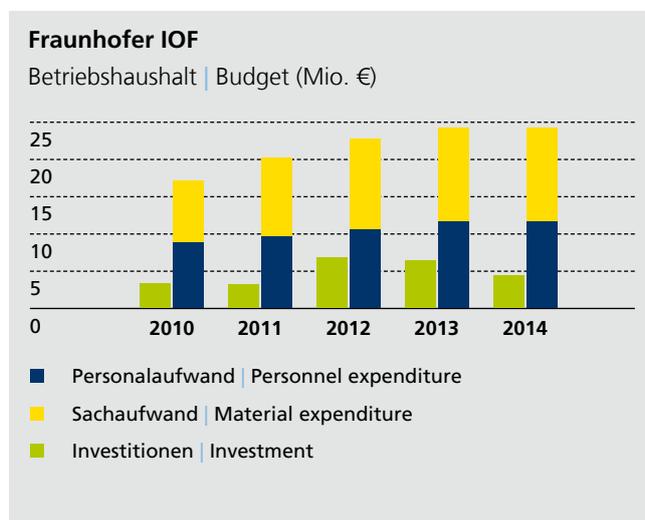
Compared with the previous year the operating budget increased in 2014 by 4.2%, with expenditure for staff rising more (8.6%) than material costs (0.5%). The basis of this successful development is the high share of revenue from contract research. The industry revenue reached again more than 11 million euros. The received public funding reached also more than 11 million euros.

Investments

The continuous investment in infrastructure is the necessary basis for the successful development of innovative solutions for our customers. A total of 4.3 million euros was invested in expanding the technological infrastructure of the institute in 2014.

Staff

The increase in operating budget enabled the creation of further new jobs in 2014. The total number of employees has risen by 6.5% compared to 2013, whereat the number of research assistants and doctoral candidates decreased little, but the number of technical assistants has grown by



gegenüber 2013 hingegen deutlich um 10,5% stieg. Die Ausbildung des wissenschaftlichen Nachwuchses erfolgt in enger Zusammenarbeit mit Hochschuleinrichtungen, insbesondere der Friedrich-Schiller-Universität Jena und der Ernst-Abbe Hochschule Jena

Das FSU-IAP 2014 in Zahlen

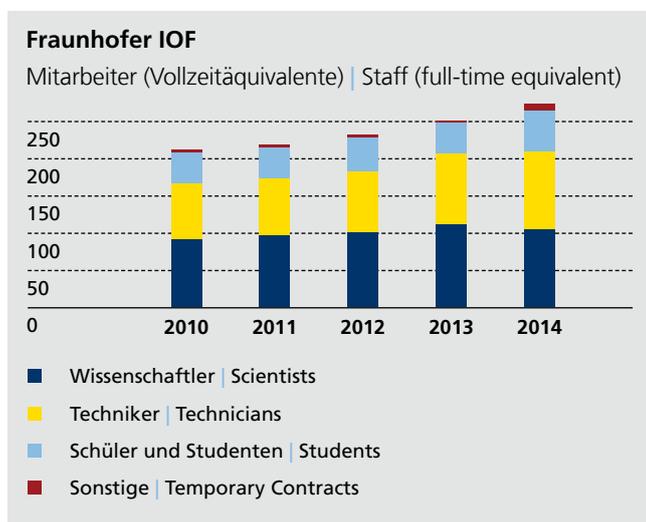
Die Mitarbeiter des Instituts für Angewandte Physik der Friedrich-Schiller-Universität Jena (IAP) konnten für 2014 Drittmittel in Höhe von 8,9 Millionen Euro einwerben (siehe Tabelle).

Zum IAP gehörten 2014 7 Professoren, 50 wissenschaftliche und 19 technische Mitarbeiter sowie 101 Doktoranden und 81 Studenten. Die große Zahl der abgeschlossenen Qualifizierungsarbeiten ist im Anhang aufgelistet.

10.5%. The training of young researchers is coordinated closely with institutions of higher education, in particular the Friedrich Schiller University Jena and the University of Applied Sciences Jena.

The FSU-IAP in figures 2014

Employees at the Institute of Applied Physics, Friedrich-Schiller University (IAP) acquired external funds worth 8.9 million euros in 2014 (see table). A total staff of 7 professors, 50 research assistants, 19 technical assistants, 101 doctoral candidates and 81 students were working at IAP in 2014. The majority of completed theses are listed in the attachment.



FSU-IAP
Drittmittelleinnahmen IAP 2014 |
Contract research revenue IAP 2014

Fördergeber Contracts with	Zuwendung Funds T€
BMBF	4.698
DFG	582
EU	528
Thüringen Thuringia	156
Stiftungen Foundations	516
Industrie Industry	2.463



3Dsensation

Mensch · Maschine · Umwelt · ZUKUNFT



INNOVATIONSALLIANZ 3Dsensation

3Dsensation INNOVATION ALLIANCE

Die Forschungsallianz 3Dsensation entwickelt Durchbruchinnovationen in den 3D-Technologien und verleiht Maschinen kognitive Fähigkeiten. Sie schafft die Grundlagen für eine sichere und effiziente Interaktion von Mensch, Maschine und Umwelt in wesentlichen Lebens- und Arbeitsbereichen. Maschinen werden zu Partnern und Assistenten des Menschen. Die Mitglieder der Allianz adressieren mit ihren Lösungen Kernbranchen der deutschen Volkswirtschaft, die durch eine mittelständische Unternehmensstruktur in der Wertschöpfungskette geprägt sind: Produktion, Gesundheit, Mobilität und Sicherheit. Zum Erreichen dieser Zielstellungen verbindet die Allianz Partner aus der gesamten Bundesrepublik, nutzt die Stärken innovativer regionaler Cluster und schafft Synergieeffekte durch die Einbindung unterschiedlicher Branchen und Bedarfsebenen. Die umfassende Integration wettbewerbsfähiger Unternehmen garantiert einen hohen Eigenanteil und investiert die eingesetzten Forschungsgelder damit sehr effizient.

Im Jahr 2014 befand sich die Allianz 3Dsensation in der Strategiephase des Förderprogramms »Zwanzig20 - Partnerschaft für Innovation« des Bundesministeriums für Bildung und Forschung. Hier wurde insbesondere eine nachhaltige Organisationsstruktur und eine wissenschaftlich-technische Roadmap bis zum Jahr 2020 entwickelt. Darüber hinaus konnten erste Basisvorhaben gestartet werden, welche beispielhaft in den Themengebieten der branchenübergreifenden Anwendbarkeit von 3D-Sensorprinzipien und der nutzerzentrierten Entwicklung von 3D-Technologien forschen.

Der Öffentlichkeit präsentierte sich die Allianz 3Dsensation auf der Hannover Messe 2014. Als Highlight besuchte Bildungsministerin Johanna Wanka den Messestand und begeisterte sich für die ultraschnelle 3D-Vermessung ihrer Hände. Durch eine in Millisekunden getaktete Musterprojektion und stereobasierte Bildaufnahme erschien das 3D-Abbild ihrer Hand in Echtzeit auf einem Bildschirm.

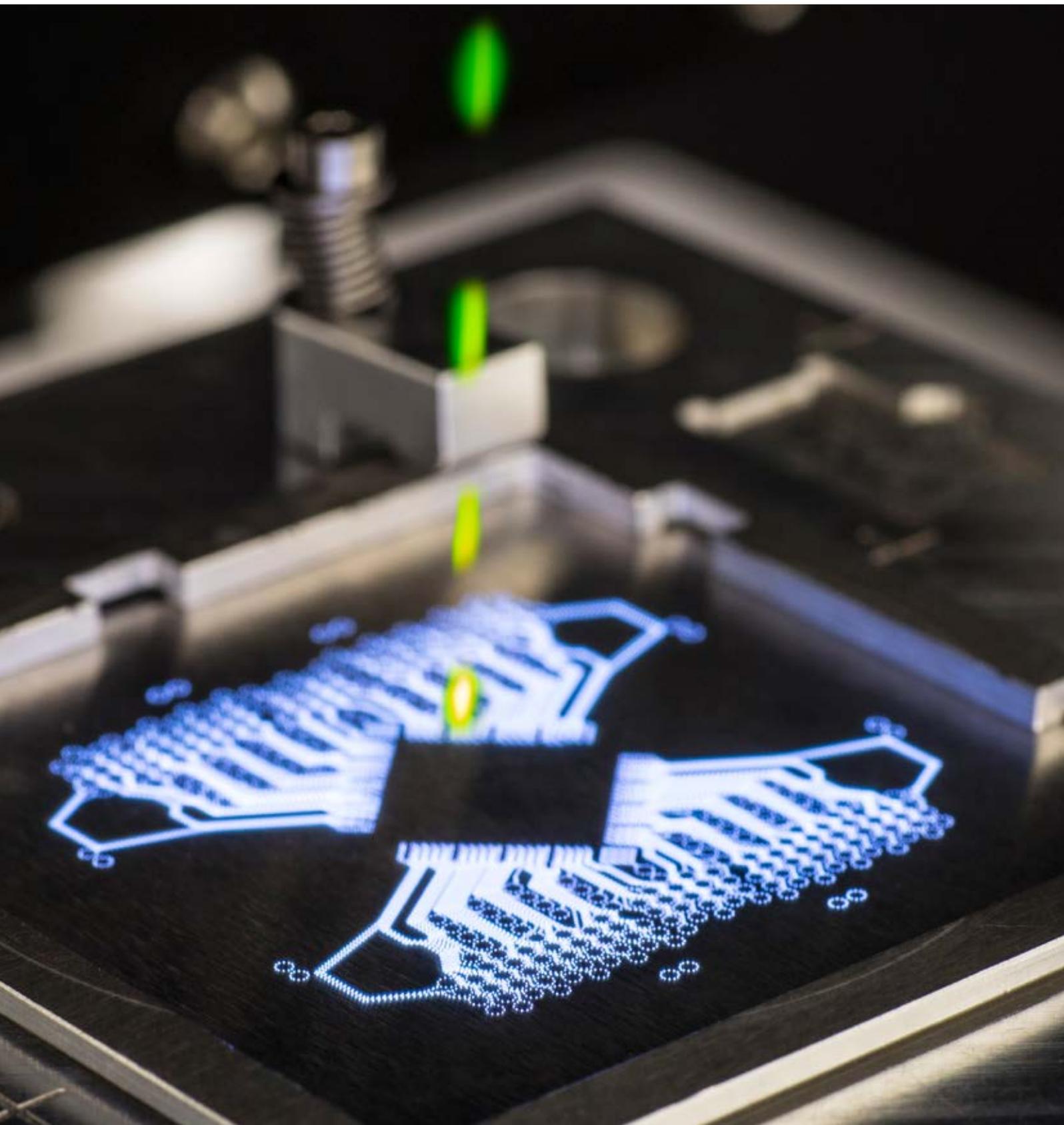
The 3Dsensation research alliance develops groundbreaking innovations in 3D technology and equips machines with cognitive abilities. The alliance creates a basis for the secure and efficient interaction of man, machine and environment in essential areas of life and work. Machines are becoming partners and assistants to man. The members of the alliance address core sectors of the German economy, which is characterized by small and medium-sized enterprises: production, health-care, mobility and security. To meet its objectives, the alliance brings together partners from the entire country, utilizes the strengths of innovative regional clusters and exploits synergy effects by integrating diverse industries and demand areas. The comprehensive integration of competitive enterprises guarantees a high equity ratio, enabling efficient investment of research funds.

In 2014, the 3Dsensation alliance took part in the strategic phase of the Federal Ministry of Education and Research's "Twenty20 – Partnership for Innovation" funding program. This phase saw the development of a sustainable organizational structure and a scientific and technical roadmap for the years through 2020. The first projects were launched, including research in the areas of the intersectoral applicability of 3D sensor principles and the user-oriented development of 3D technologies.

The 3Dsensation alliance presented itself to the public at the Hannover Messe 2014. One highlight was the visit of the Federal Minister for Education and Research, Professor Wanka, to the booth. She was extremely impressed by the high-speed real-time 3D measurement of her hands, created on a monitor by means of a pattern projection updated in intervals of milliseconds and stereo-based image recording.

LEFT 3Dsensation – Robotergestützte Gesundheitsassistenz. |
3Dsensation – Health assistance by robots.

GREEN 
PHOTONICS
FRAUNHOFER-INNOVATIONSClUSTER



INNOVATIONSCLUSTER GREEN PHOTONICS

INNOVATION CLUSTER GREEN PHOTONICS

Die Forschungsthemen des Fraunhofer-Innovationsclusters »Green Photonics« widmen sich dem effizienten und schonenden Umgang mit Energie und Ressourcen durch die nachhaltige Nutzung von Licht. Eine große Anzahl regionaler und überregionaler Forschungseinrichtungen und Unternehmen beteiligen sich neben dem Fraunhofer IOF an dem Cluster, um die Anwendung von Licht für die Bereiche CO₂-neutrale Energiewandlung, Schutz der Umwelt sowie energie- und ressourceneffiziente Produktion voranzutreiben.

Beispiele für die in diesen Themenfeldern innerhalb des Innovationsclusters bearbeiteten Forschungsfeldern sind Hochleistungsfaserlaser für die energieeffiziente Produktion, neuartige energieeffiziente Solarzellen, hochpräzise optische Mess- und Analyseverfahren für die Qualitätssicherung oder die effiziente und hochgenaue Fertigung von optischen Komponenten, z. B. für Hochleistungsobjektive.

»Nachwuchspreis Green Photonics«

Bereits zum dritten Mal hat die Fraunhofer-Gesellschaft im Jahr 2014 im Rahmen des Innovationsclusters »Green Photonics« den »Nachwuchspreis Green Photonics« vergeben. Der Preis ging an junge Forscherinnen und Forscher der Ingenieur-, Natur- oder Wirtschaftswissenschaften, die sich in ihren Abschlussarbeiten mit der nachhaltigen Nutzung von Licht befasst haben. Ausschlaggebend für eine Prämierung war neben der wissenschaftlichen Qualität auch die Anwendungsrelevanz der Arbeiten.

Jeweils den ersten Preis erhielten Frau Lucia Lorenz für ihre Masterarbeit mit dem Thema »Optische Abstands- und Schichtdickenmessung entlang einer Linie« und Herr Dr. Christian Marx für seine Dissertation mit dem Thema »Untersuchungen zum Einsatz von Lasertechnologie in der Pflanzenproduktion«. Die Ausschreibung und Vergabe der Preise erfolgte mit Unterstützung der Robert Bosch GmbH, des Vereins Deutscher Ingenieure und der Stiftung für Technologie, Innovation und Forschung Thüringen (STIFT).

The research themes of the Fraunhofer "Green Photonics" innovation cluster are dedicated to the efficient and sustainable use of energy and resources through the sustainable usage of light. Besides the Fraunhofer IOF, the cluster is made up of further regional and national research institutes and companies. The participating organizations develop applications in the areas of carbon-neutral energy conversion, protection of the environment and resource-efficient production.

Examples of the cluster's work on these topics are high-power fiber lasers for energy efficient production, novel energy efficient solar cells, high-precision optical methods for measurement and analysis for quality assurance or the efficient and high-precision production of optical components, for example high-performance lenses.

"Young talent award Green Photonics"

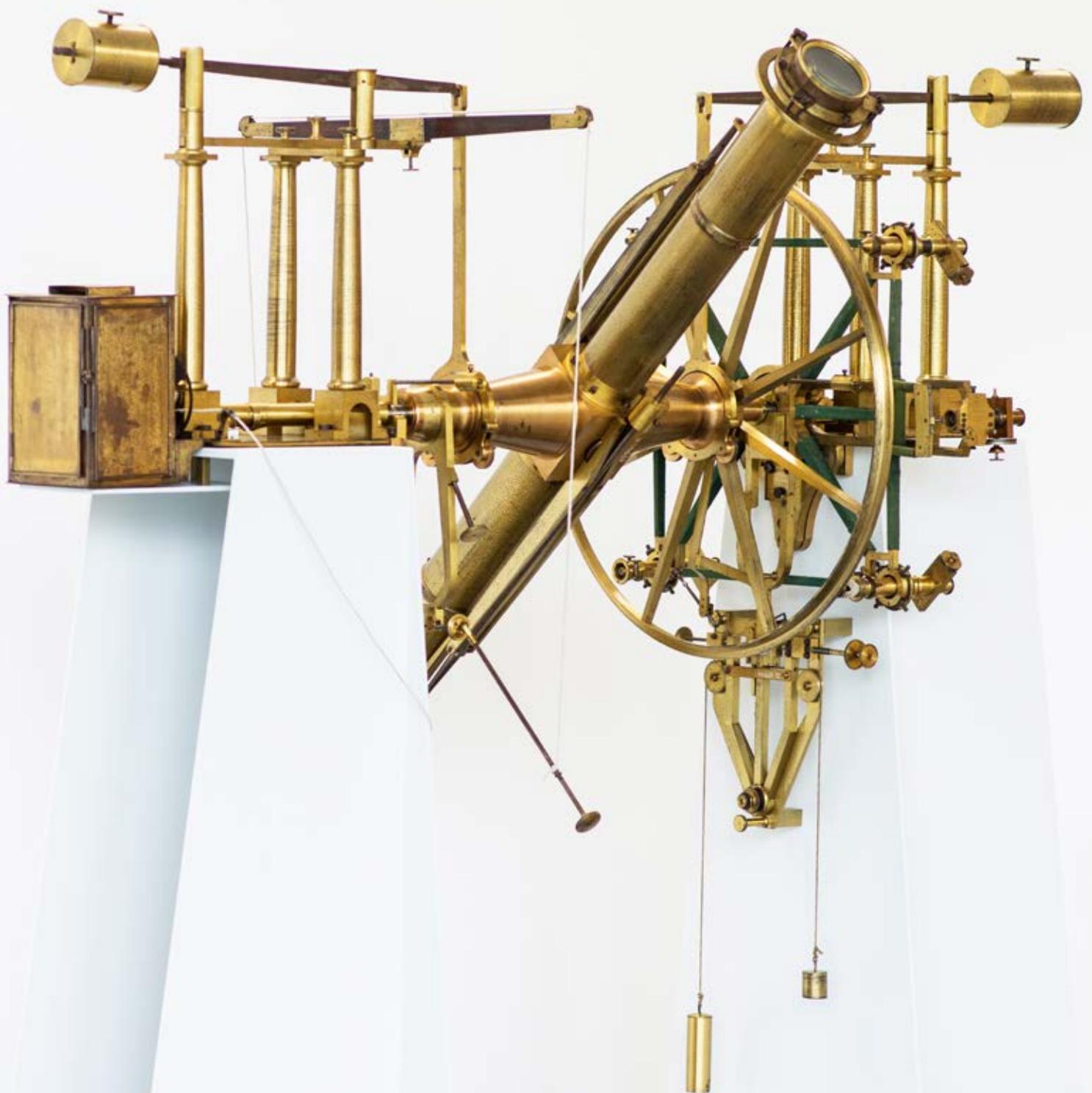
2014 was the third time that the Fraunhofer society awarded the "Young Talent Award Green Photonics" in the context of the "Green Photonics" innovation cluster. The prize was awarded to young researchers in engineering, natural sciences and economics who dedicated their theses to the sustainable usage of light. Alongside scientific quality, a key factor for winning an award was the application relevance of the work.

There were two first prize winners: Ms. Lucia Lorenz for her master's thesis on "optical distance and thickness measurements along a line" and Dr. Christian Marx for his dissertation on "investigations into the use of laser technology in plant production". The announcement and presentation of the award was supported by Robert Bosch GmbH, the Association of German Engineers and the Foundation for Technology, Innovation and Research Thuringia (STIFT).

LEFT *Ultrakurzpulslaser für die energie- und ressourcenschonende Materialbearbeitung. | Ultrashort pulse laser for energy- and resource-saving material processing.*

200 JAHRE FRAUNHOFER'SCHE LINIEN

200 YEARS OF FRAUNHOFER LINES





Im Jahre 1814 berichtete Joseph von Fraunhofer erstmals im Detail über die Beobachtung von dunklen Linien im Sonnenspektrum – die »Fraunhofer'schen Linien«. Seine Entdeckung jährt sich dieses Jahr zum 200. Mal. Dieses Jubiläum hat die Fraunhofer-Gesellschaft am Fraunhofer-Institut für Angewandte Optik und Feinmechanik IOF in Jena mit einem Festakt gefeiert. Als Höhepunkt wurde ein restauriertes Meridian-Instrument mit Optiken aus der Fraunhofer Werkstatt erstmals seit 100 Jahren wieder der Öffentlichkeit zugänglich gemacht. Im Fraunhofer IOF freut man sich sehr über das Meridian-Instrument, ist es doch ein schönes Symbol der immer noch am Institut andauernden Beschäftigung mit den Themen Weltraum und Astronomie.

In ihren Grußworten betonten der Thüringer Minister für Bildung, Wissenschaft und Kultur Christoph Matschie und der Präsident der Friedrich-Schiller-Universität Jena Prof. Dr. Walter Rosenthal die wissenschaftliche und wirtschaftliche Wichtigkeit der Optik und Photonik für die Region Jena und ganz Thüringen.

In seiner Festrede zum Forscher und Unternehmer Joseph von Fraunhofer hob der Präsident der Fraunhofer-Gesellschaft Prof. Dr. Reimund Neugebauer die Bedeutung Fraunhofers als Namensgeber der Fraunhofer-Gesellschaft hervor. Er macht deutlich, dass damals wie heute der Name für »die Verbindung von Exzellenz und Originalität zum Nutzen der Wirtschaft« steht. In den sich anschließenden Festreden des Wissenschaftsautors Dr. Josef M. Gaßner, des Geschäftsführers der Jena-Optronik GmbH Herr Dietmar Ratzsch sowie von Prof. Dr. Jürgen Teichmann vom Deutschen Museum wurden anschaulich die Beobachtungen von Joseph von Fraunhofer erklärt und deren Bedeutung für aktuelle Forschungsgebiete erläutert.

Abschließend stellte Prof. Dr. Andreas Tünnermann, Institutsleiter des Fraunhofer IOF fest, dass »die Optikregion Jena zu den international leistungsfähigsten Zentren der Optik zählt, ganz in der Tradition der Optikpioniere Zeiss, Abbe und Schott«. Er betont dabei »die enge Partnerschaft von Wissenschaft und Wirtschaft, ganz nach dem Vorbild Fraunhofers, der Forschung, Erfinder- und Unternehmertum verband«.

In 1814, Joseph von Fraunhofer provided the first detailed description of his observation of dark features in the optical spectrum of the sun – the Fraunhofer lines. This year, for the 200th anniversary of his discovery, the Fraunhofer Society hosted a ceremonial act at the Fraunhofer Institute for Applied Optics and Precision Engineering IOF in Jena. The highlight was a restored meridian instrument with optics from the Fraunhofer workshop that was made available to the public for the first time in 100 years. The Fraunhofer IOF is very happy about this instrument that symbolizes space and astronomy, one of the institute's ongoing areas of research.

In their welcoming speeches, the Thuringian Minister of Education, Science and Culture Christoph Matschie and the president of the Friedrich-Schiller University Jena Prof. Dr. Walter Rosenthal underlined the scientific and economic importance of optics and photonics for the Jena region and Thuringia as a whole. In his speech about the researcher and entrepreneur Joseph von Fraunhofer, the president of the Fraunhofer Society Prof. Dr. Reimund Neugebauer emphasized the importance of the visionary after whom the Fraunhofer Society was named. In the following speeches by the scientific author Dr. Josef M. Gaßner, the director of Jena-Optronik GmbH Dietmar Ratzsch and Prof. Dr. Jürgen Teichmann of the Deutsches Museum, the observations of Joseph von Fraunhofer and their relevance for current research areas were explained.

Finally, Prof. Dr. Andreas Tünnermann, director of the Fraunhofer IOF, concluded that "the optics region Jena is among the internationally leading center of optics, entirely in the spirit of the optics pioneers Zeiss, Abbe und Schott". He further emphasized "the close cooperation between science and industry, following the example of Fraunhofer who combined research, inventiveness and entrepreneurship".

LEFT *Historisches Meridianinstrument am Fraunhofer IOF | Historical meridian circle instrument at Fraunhofer IOF.*

TOP *Prof. Dr. Andreas Tünnermann, Prof. Dr. Walter Rosenthal, Christoph Matschie & Prof. Dr. Reimund Neugebauer.*

FORSCHUNG TRIFFT PASSION
RESEARCH MEETS PASSION





Zwei junge Wissenschaftler des Fraunhofer IOF konnten beim Ideenwettbewerb des Fraunhofer Symposiums »Netzwerk« 2013, bei dem Forscher der Fraunhofer-Gesellschaft aufgerufen waren, originelle Ideen zu präsentieren, mit ihrem innovativen Ansätzen überzeugen. Franz Beier und Peter Lutzke wurden ausgezeichnet und erhielten für die Weiterentwicklung ihrer Projekte jeweils ein Preisgeld von 25.000 €.

Was gibt es Besseres, als Arbeit und Hobby kombinieren zu können? Franz Beier gelingt dies mit seiner Idee zum »Biomonitoring durch Glasfasersensorik in Völkern der westlichen Honigbiene«. Er will sein berufliches Wissen zu Glasfasersensorik und sein Wissen als Hobbyimker nutzen, um damit einen komplexen und quasi lebenden Sensor zu entwickeln. Denn Honigbienen zeigen komplexe Reaktionen auf Veränderungen von Umgebungseinflüssen, welche sich durch den Einsatz von Glasfasern und Laserlicht im Bienenstock erfassen lassen.

Bei der zweiten ausgezeichneten Idee widmet sich Peter Lutzke dem Thema »Scannen statt Knipsen - 3D-Datengewinnung für Jedermann«. Die Nutzung von 3D-Daten durch den Endanwender erlebt einen erheblichen Aufschwung. Um 3D Datenerfassung für jedermann zu ermöglichen, möchte er bereits vorhandene Hardware (das Smartphone) verwenden um mit möglichst wenigen Zusatzkomponenten ein vollständiges 3D-Messsystem zu generieren. Hierzu werden für das notwendige Stereo-Kamera-System zwei Spiegel, sowie für die Projektion ein kleiner LED basierter Projektor auf das Smartphone aufgesetzt. Ein erster Prototyp konnte bereits aufgebaut werden. Zukünftig würde mit einem solchen System auch dem Hobbyanwender ein 3D-Scanner zur Verfügung stehen.

The innovative approaches adopted by Franz Beier and Peter Lutzke of the IOF won over the jury of the ideas competition at the Fraunhofer "Netzwerk" symposium in 2013, giving them prize money of €25,000 each for the further development of their idea.

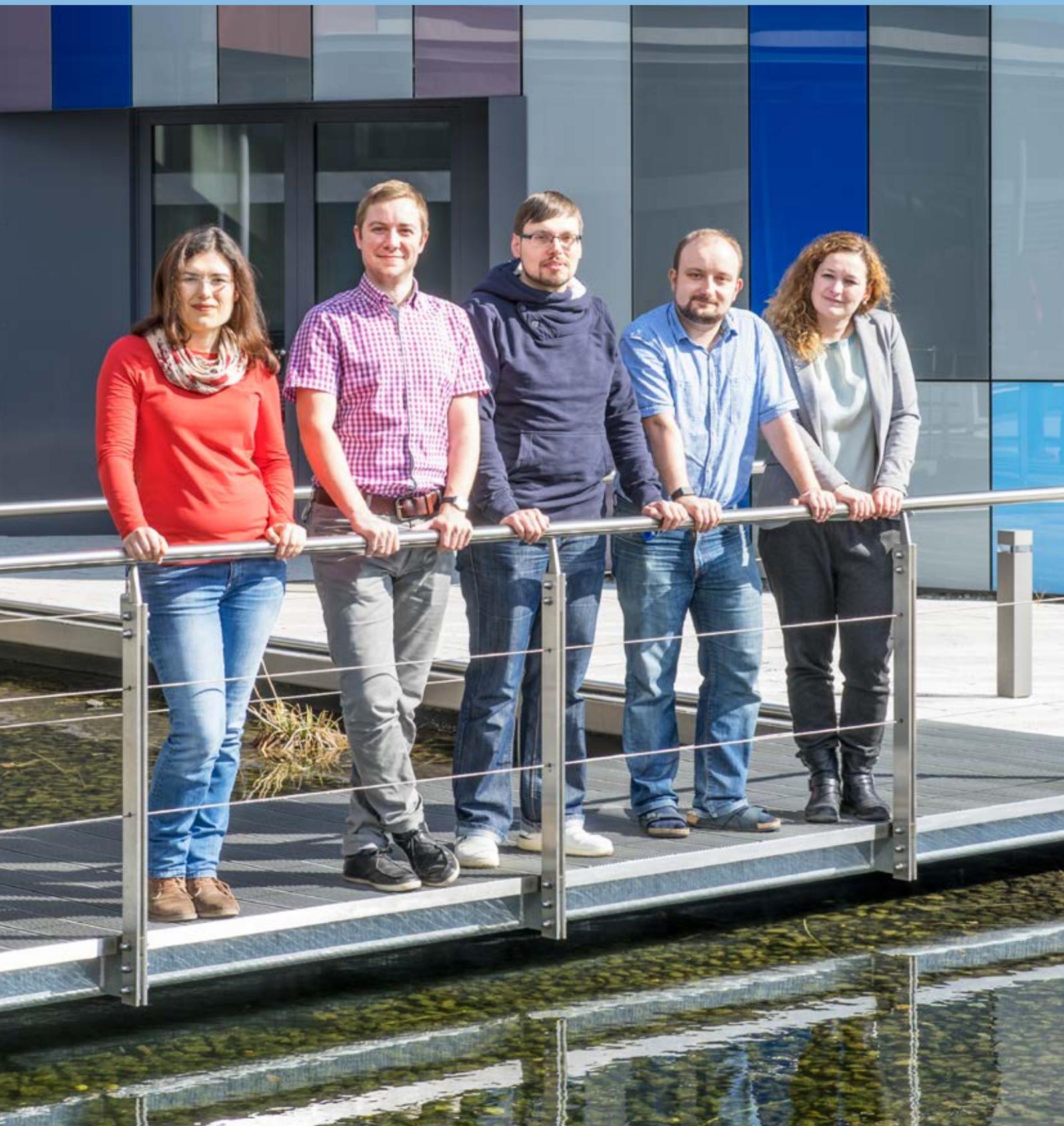
What could be better than combining your work and your hobby? Franz Beier does so successfully with his idea of "biomonitoring via fiber optic sensor systems in western honey bee colonies". He wants to use his professional knowledge of fiber optic sensor systems and his skills as a hobby beekeeper to develop a complex and practically "living" sensor.

The second winning idea was Peter Lutzke's "scanning instead of snapping – 3D data acquisition for everybody". He wants to use existing hardware (the smartphone) to generate a complete 3D measuring system with as few extra components as possible.

LEFT Franz Beier bei einer Messung an seinem Versuchsbienenstock auf dem Dach des Fraunhofer IOF. | Franz Beier collects data from his trial beehive on the roof of Fraunhofer IOF.

TOP Peter Lutzke bei der Kalibrierung seines mobilen 3D-Scanners. | Peter Lutzke while calibrating his mobile 3D scanner.

NACHWUCHSGRUPPE AKTIVE OPTIKEN RESEARCH GROUP ACTIVE OPTICS



Die Wissenschaftlerin Dr. Claudia Reinlein leitet seit 2014 die Arbeitsgruppe »Aktive Optiken« am Fraunhofer IOF. Nach ihrem Studium promovierte sie an der TU Ilmenau und erhielt im Jahr 2013 den STIFT Sonderpreis für Abschlussarbeiten des Green Photonics-Nachwuchswettbewerbs. Ihre Arbeit und persönliche Entwicklung wird aktuell im Rahmen des TALENTA-Programms der Fraunhofer-Gesellschaft gefördert.

Wie bist Du zu diesem Beruf gekommen?

Nach der Schule wollte ich gerne verstehen, wie Maschinen funktionieren. Deshalb habe ich Maschinenbau mit der Spezialisierung Feinwerktechnik und Optik studiert. Nach meiner Diplomarbeit am Institut für Angewandte Physik der FSU Jena im Bereich Kurzpulslaser bin ich dann ans Fraunhofer IOF gewechselt, weil ich näher an der Anwendung sein wollte.

Du leitest am Fraunhofer IOF eine Arbeitsgruppe zum Thema »Aktive Optiken«. Was bedeutet das genau?

Aktive Optik ist letztlich die aktive Beeinflussung optischer Parameter, wie z.B. von Wellenfronten, durch dirigierbare Elemente, in Form von aktiven Spiegeln oder Linsen. In meinem Team entwickeln wir deformierbare Spiegel für verschiedene Applikationen, z.B. für Laser mit hoher Leistung oder zur Kompensation von atmosphärischer Turbulenz mit vielen Stullelementen. Wir arbeiten außerdem an Technologien und Lösungen für ein integrativ-optisches System.

Was ist das Faszinierende am Thema Aktive Optiken?

Dass es so komplex ist, dass so viele Sachen mit hineinspielen. Es ist eine Forschungsrichtung, die es schon ziemlich lange gibt, aber sie hat sich bisher nicht umsetzen lassen. Durch den technologischen Fortschritt in der Sensortechnik,

The scientist Dr. Claudia Reinlein has been leading the active optics team at Fraunhofer IOF since 2014. After her studies at the Friedrich Schiller University Jena, she earned a doctorate at Fraunhofer IOF and was awarded the STIFT special award for theses and dissertations promoting the sustainable use of light. At the moment, her work and her personal development are being supported by the Fraunhofer TALENTA program.

Why did you choose this profession?

After school, I wanted to understand how machines work. That is why I studied mechanical engineering, specializing in precision engineering and optics. After my thesis on short pulse lasers at the FSU Jena, I came to the Fraunhofer IOF because I wanted to work with a more practical orientation.

You are leading a team working on active optics at Fraunhofer IOF. What does that mean exactly?

In the end, with active optics, we actively influence optical parameters like the wavelength with/by elements that can be conducted, for example an active mirror or a lens that can be moved. In my team, we develop deformable mirrors for a range of applications, for instance high-power lasers or for the compensation of atmospheric turbulence. We are also working on the technology and the solution for an integrated optical system.

What is so fascinating about active optics?

It is fascinating that it is so complex, that so many things play a role. It is a research discipline that has been around

LEFT *Nachwuchsgruppe Aktive Optiken (von links nach rechts): | Research Group Active optics (from left to right): Nina Leonhard, Matthias Goy, Nicolas Lange, Michael Appelfelder, Dr. Claudia Reinlein.*

GESPRÄCH MIT DR. CLAUDIA REINLEIN

INTERVIEW WITH DR. CLAUDIA REINLEIN

der Elektronik und bei den Materialien kann man diese Konzepte jetzt immer besser einsetzen, Aufwand und Kosten werden in den nächsten Jahren wettbewerbstauglich sein.

Wo liegen im Moment Deine Forschungsschwerpunkte?

Seit Januar ist unser Schwerpunkt das StarTiger-Projekt der ESA. Das ist ein Projekt mit einer extrem kurzen Laufzeit von nur acht Monaten. Wir werden in diesem untersuchen, inwieweit und wie die Laser-Kommunikation zwischen der Erde und einem geostationären Satelliten über adaptive Optik verbessert werden kann. Dazu bauen wir unter anderem einen Rapid Control Prototype auf. In diesem bringen wir verschiedene Aberration bzw. Turbulenzen der Atmosphäre ein und kompensieren diese. Am Ende soll ein adaptiv-optisches System stehen, welches wir an ein großes Teleskop schnallen können.

Das Schöne an dem Projekt ist, dass insgesamt sieben Personen aus unterschiedlichen Fachrichtungen zusammenarbeiten. Neben unseren Experten im Bereich mechanischer Integration und Systemauslegung forschen wir mit Kollegen aus dem Optikdesign der Universität Jena sowie Regelungstechnikern von der TU Ilmenau.

Welche Ziele verfolgst Du in Deiner Gruppe?

Wir glauben, dass uns der technologische Fortschritt nun erlaubt aktive Optiken unabhängig vom Aufbau einzusetzen und damit die Effizienz und Performance von optischen Systemen deutlich zu verbessern. Wir arbeiten daran die Integration so weit zu vereinfachen, dass man schnell die gewünschten oder notwendigen Verbesserungen von Systemen erreicht.

Du wirst im Rahmen des TALENTA-Programms der Fraunhofer-Gesellschaft gefördert. Was sind die

for quite some time, but the application was not possible until now. Due to the technological progress in sensor technology, electronics and the materials, these concepts can now be applied much easier. In the coming years, the effort and costs will be competitive.

What is the current focus of your research?

Since January, we have been focusing on the ESA StarTiger Project. It is a very short-term project running for only eight months. In this project, we analyze if and how the laser communication between the earth and a geostationary satellite can be improved by using adaptive optics. For this, we are, among others, building a rapid control prototype. We insert different aberrations or atmospheric turbulences and compensate them. In the end, we would like to have an adaptive optical system that we can strap on a big telescope.

The great thing is: we are 7 people from different areas working together. Besides our experts in the fields of mechanical integration and system design, we are working with colleagues from the University of Jena doing optical design as well as control engineers from the TU Ilmenau.

What goals do you have with your group?

We believe that the technological process now allows us to use active optics, regardless of the set-up, enabling us to significantly improve the efficiency and performance of optical systems. We are working to improve the integration to make it easier to achieve the desired or necessary improvements of the systems.

You are being supported by the TALENTA program of the Fraunhofer society. Could you explain the program? What kind of chances does it offer you?



wesentlichen Elemente des Programms und welche Chance bietet dieses?

Das TALENTA-Programm ermöglicht mir eine individuelle, persönliche Entwicklung, in Form von Weiterbildungen und zusätzlichen Qualifizierungsbausteinen. Ich glaube, dass die Chancen des Programms vor allem in der Vernetzung mit anderen Menschen liegen, vor allem mit anderen Frauen in einer ähnlichen Position. Wenn es Schwierigkeiten gibt, ist es einfach schön, wenn man sich mit Gleichgesinnten austauschen kann.

Glaubst Du, dass Programme wie TALENTA wichtig sind, um Wissenschaftlerinnen zu unterstützen?

Ich halte Initiativen wie das TALENTA-Programm oder auch Kampagnen wie »Mehr Frauen in die MINT-Fächer« für extrem wichtig. Mehr Zeit und finanzielle Anreize sind natürlich schön, aber noch wichtiger ist die Vernetzung – dass man andere Frauen kennen lernt und sieht, wie Karrierewege sein können und was dies persönlich für einen heißt. Egal ob Mann oder Frau, irgendwann muss man sich entscheiden was Priorität hat und welchen Weg man einschlägt, d.h. Wissenschaft oder Wirtschaft. Die Fraunhofer-Gesellschaft bietet hier eine Brücke. Ich denke, es gibt kaum einen Job, in dem man so viel Freiheit hat, Sachen auszuprobieren, unorthodoxe Lösungswege zu gehen und sich auch selbst zu verwirklichen.

The TALENTA program offers me a personal, individual development in the form of further trainings and additional qualification modules. But I believe that the most important advantage is the opportunity to connect with other people, especially with women in a similar position. If difficulties arise at work, it is just nice to exchange thoughts with like-minded people.

Do you believe that programs like TALENTA are an important way of supporting female scientists?

Yes, I think initiatives like the TALENTA program or programs motivating women to pursue STEM degrees are extremely important. Of course it is nice to have more time and money, but the networking is a lot more important – that you meet other women and see what career paths are possible and what that means for you personally. No matter if man or woman, at some point you have to set priorities in your family and decide what path you choose: science or industry. The Fraunhofer Society gives me the possibility to combine both. I believe there is hardly any other job that gives you this much freedom to experiment, to try unorthodox approaches and to realize self-fulfillment.

TOP Am Fraunhofer IOF entwickeltes aktives optisches Bauelement: Thermisch-piezoelektrisch deformierbarer Spiegel für den Einsatz in Hochleistungslasersystemen. | Thermal-piezo-electric unimorph deformable mirror to compensate for wavefront aberrations.

SPIN-OFF optiX fab

Im Jahre 2013 gründete Dr. Torsten Feigl das Spin-Off Unternehmen optiX fab GmbH aus dem Fraunhofer IOF aus. Seitdem arbeitet er gemeinsam mit drei ehemaligen Kollegen an kundenspezifischen optischen Komponenten für den extrem ultra-violetten (EUV) Spektralbereich, hauptsächlich für die EUV-Lithographie bei einer Wellenlänge von 13,5 nm.

Du hast dich zusammen mit deinem damaligen Fraunhofer-Team ausgegründet. An welchem Punkt wusstet ihr: Wir müssen jetzt raus?

Wir sind in den letzten Jahren am Fraunhofer IOF als Arbeitsgruppe immer industrienaher geworden. Mitte der 90er Jahre haben wir mit ersten Forschungsprojekten für die EUV-Lithographie bei 13,5 nm begonnen, sind dann über Prototypenbeschichtungen für 13,5 nm gegangen und haben schlussendlich in den letzten Jahren dem Markt immer mehr Produkte angeboten, sodass sich die Frage einer Kommerzialisierung ganz natürlich stellte. Es lag einfach nahe, zu sagen: Wir wagen jetzt den Schritt in die Selbstständigkeit und gründen ein Fraunhofer Spin-off.

Was waren Deine persönlichen Beweggründe, das Spin-off zu gründen?

In der Tat ist es mir nicht leichtgefallen, das Fraunhofer IOF nach 20 extrem interessanten und erfolgreichen Jahren zu verlassen. Trotzdem wollten wir diesen Schritt wagen und beginnen Produkte für einen Markt mit sehr großem Wachstumspotenzial herzustellen. Die langjährige Erfahrung am Fraunhofer IOF hat gezeigt, dass unsere EUV-Spiegel und Beschichtungen international konkurrenzfähig sind. Das gesamte Team empfand die Gründung, die neuen persönlichen Gestaltungsmöglichkeiten sowie die Marktplatzierung eines High-Tech-Unternehmens als spannende Herausforderung. Die bisherige Entwicklung gibt uns Recht,

In 2013, Dr. Torsten Feigl founded the Fraunhofer IOF spin-off optiX fab GmbH. Since then, he has been working on products and solutions for next generation lithography with three former colleagues.

You realized the spin-off with your former Fraunhofer team. At which point did you know: We have to go now?

That is a very good question. Over the last years at Fraunhofer IOF, our group became more and more industry-oriented. In the mid-nineties, we started the first research projects for EUV lithography at 13,5 nm, then moved to prototype coatings at 13,5 nm. In the end, we offered the market more and more products so that the question of commercialization arose quite naturally. It just stood to reason to say: We dare to take the step toward self-employment and found a Fraunhofer spin-off.

What were your personal motives to found the spin-off instead of licensing?

The personal motives are difficult to summarize. In fact, it was not easy to leave the Fraunhofer Institute after 15 years. That was one of my biggest personal obstacles. However, we wanted to take the step to start manufacturing products for a market that we thought could be growing more and more. The years of experience at Fraunhofer IOF showed us that our EUV mirrors and coatings were internationally competitive. The whole team considered the foundation, the new personal opportunities and the market placement of a high-tech company an exciting challenge. The development so far shows that we made the right decision in founding optiX fab.

RIGHT *optiX fab GmbH Gründer Torsten Feigl | optiX fab GmbH founder Torsten Feigl.*



GESPRÄCH MIT DR. TORSTEN FEIGL

INTERVIEW WITH DR. TORSTEN FEIGL

mit der Gründung von optiX fab die richtige Entscheidung getroffen zu haben.

Was bietet optiX fab heute an?

Die Produkte von optiX fab sind sehr vielfältig und wir sind heute, zwei Jahre nach der Ausgründung, weit breiter aufgestellt als die ursprüngliche Idee: kundenspezifische Optiken für 13,5 nm herzustellen. Unsere derzeitige Strategie sieht vor, Nischenmärkte jenseits der 13,5 nm zu finden, für die wir mit unserem Beschichtungs-Know-how Produkte für spezielle Anbieter liefern können. Unser Hauptprodukt sind nach wie vor Optiken für 13,5 nm, aber auch Röntgenoptiken für den harten und weichen Röntgenbereich, Synchrotronoptiken, FEL-Optiken, bis hin zu speziellen Beschichtungen für den sichtbaren bis infraroten Spektralbereich.

Was ist das Besondere an optiX fab?

Das Alleinstellungsmerkmal ist in meinen Augen eine ziemlich einzigartige Mischung aus fantastisch ausgebildeten Mitarbeitern und ganz hervorragender Anlagentechnik. Wir haben jetzt erst festgestellt, dass unsere Anlagentechnik in der Lage ist, nicht nur Optiken für 13,5 nm herzustellen, sondern eben auch Röntgenoptiken oder Synchrotronoptiken mit einer extrem hohen Qualität. Das ist eine große Chance für optiX fab. Wir nutzen unser Basis-Know-how um jetzt auch in anderen Bereichen tätig zu werden.

Im Februar war die letzte SPIE Advanced Lithography Konferenz in Kalifornien. Gab es dort Neuigkeiten von optiX fab?

Ja, zum ersten Mal hat optiX fab vor einem internationalen Fachpublikum ein eigenes Paper mit Arbeitsgruppen des Fraunhofer ISO Jena und der Physikalisch-Technischen

What is optiX fab offering today?

Today, we offer a wide range of products. We are a lot more diversified than originally intended. We planned to produce customized optics at 13,5 nm, but now, our strategy envisages to find niche markets beyond 13,5 nm on which we can offer products for specific suppliers with our know-how in coating. Our main products are still optics at 13,5 nm, but also X-ray optics for the hard and soft X-ray range, synchrotron optics, FEL optics, to the point of specific coatings for the visible and IR range.

What is so special about optiX fab?

In my opinion, the unique selling point is the one-of-a-kind combination fantastically trained employees and excellent equipment. We have just found out that our systems are not only able to produce optics at 13,5 nm, but also X-ray optics or synchrotron optics at an extremely high quality better than that of the currently established suppliers. That is a huge possibility for optiX fab. We started with the most difficult thing and now use this know-how to work in other fields.

In February, the last SPIE Advanced Lithography took place in California. Did optiX fab present any new activities?

Yes, for the first time, optiX fab presented a paper with groups from the Fraunhofer Institute and the Physikalisch-Technische Bundesanstalt in Berlin. We held a presentation on EUV collector optics with a specific IR suppression, a new product idea. This year, the atmosphere at the conference was very positive because TSMC announced very promising results. The company is currently able to expose 1022 EUV wafers within 24 hours. That is a whole new dimension that has been reached with the manufacturing method of EUV lithography tools. This leads us to believe that in three to



Bundesanstalt Berlin vorgestellt. Wir haben einen Vortrag zum Thema EUV-Kollektoroptyken mit einer speziellen IR-Unterdrückung gehalten, also eine neue Produktidee. In diesem Jahr war die Stimmung auf der Konferenz sehr positiv, da TSMC (Taiwan Semiconductor Manufacturing Company) aussichtsreiche Ergebnisse veröffentlichte. Aktuell ist die Firma in der Lage, innerhalb von 24 Stunden 1022 EUV-Wafer zu belichten. Das ist eine neue Dimension, die derzeit mit der Herstellung der EUV Lithographie-Tools erreicht wurde. Wir glauben, dass in drei bis fünf Jahren wirklich im großen Maßstab der Weg in die Fab stattfindet. Die Halbleiterindustrie wird also in sehr naher Zukunft Chips mit 13,5 nm herstellen. Wir hoffen dann natürlich, dass optiX fab mit seinem Produkt-Portfolio auch hier Nischenmärkte abdecken kann.

Würdest du den Schritt in die Selbstständigkeit heute wieder wagen?

Auf jeden Fall, das war ein richtiger Schritt zum richtigen Zeitpunkt. Die Tätigkeit jetzt als Geschäftsführer macht mir sehr viel Spaß und war aus jetziger Sicht die logische Folge nach der Gruppenleitung am Fraunhofer-Institut. Das Verhältnis zum Fraunhofer IOF ist weiterhin hervorragend, nicht nur im Bereich der Beschichtungsaktivitäten. Ich glaube, dass es auch in Zukunft eine sehr enge Verzahnung zwischen optiX fab und Fraunhofer IOF geben wird.

five years, it will find its way into the fab, meaning that the semiconductor industry uses optics at 13,5 nm to expose chips. Of course we hope that optiX fab can cover niche markets with its product portfolio in this field.

Would you take the step again today?

Definitely, it was the right step at the right time. I enjoy the job as director a lot, and it was just a logical consequence after being group leader at the Fraunhofer Institute. The relationship with the Fraunhofer IOF is still fantastic, not only in the area of coating activities. I think that optiX fab and the Fraunhofer IOF will still collaborate very closely in the future.

AUSGEWÄHLTE ERGEBNISSE 2014

SELECTED RESULTS 2014



Das Fraunhofer IOF entwickelt innovative Lösungen mit Licht für die Zukunftsfelder Energie, Umwelt, Information, Kommunikation, Gesundheit, Produktion, Sicherheit und Mobilität. Dazu verknüpft es angewandte Forschung und Entwicklung mit exzellenter Grundlagenwissenschaft. In enger Zusammenarbeit mit dem Institut für Angewandte Physik der Friedrich-Schiller-Universität Jena (IAP) entwickelt es herausragende Lösungen zur Kontrolle von Licht – von der Erzeugung und Manipulation bis hin zur Anwendung.

Das Fraunhofer IOF ist eine weltweit führende Forschungseinrichtung für Photonik und optische Systemtechnik mit globaler Strahlkraft. Seine Stellung stützt sich sowohl auf herausragende, öffentlich finanzierte Vorlaufforschung als auch auf direkte Auftragsforschung in Kollaboration mit strategischen Partnern aus Forschung und Industrie. Auf der Grundlage wissenschaftlicher und technologischer Exzellenz gestaltet es die zukünftigen Entwicklungen in Optik und Feinwerktechnik auf globaler Skala maßgeblich mit.

Einige herausragende Forschungsergebnisse des Jahres 2014, sowohl aus internen Projekten, als auch aus Forschungsaufträgen, sind auf den folgenden Seiten dargestellt. Die dargestellten Ergebnisse beziehen sich direkt auf die Geschäftsfelder:

- Optische Komponenten und Systeme
- Feinmechanische Komponenten und Systeme
- Funktionale Oberflächen und Schichten
- Photonische Sensoren und Messsysteme
- Lasertechnik.

The Fraunhofer IOF develops innovative solutions with light for the cutting-edge fields of energy, environment, information, communication, health, production, security, and mobility. In close cooperation with the Institute of Applied Physics at the Friedrich Schiller University Jena, it combines applied research and development with scientifically excellent basic research ranging from the creation and manipulation of light to its application.

The Fraunhofer IOF is a worldwide leading and pioneering research institute for photonics and optical system engineering. On the basis of scientifically excellent activity in its core areas of expertise, it plays a leading role in future developments in optics and precision engineering. Outstanding results of basic research and strategic collaborations with industry partners demonstrate the research strength of the Fraunhofer IOF. Its work is performed both in the context of publicly funded initial research projects as well as directly on behalf of the industry.

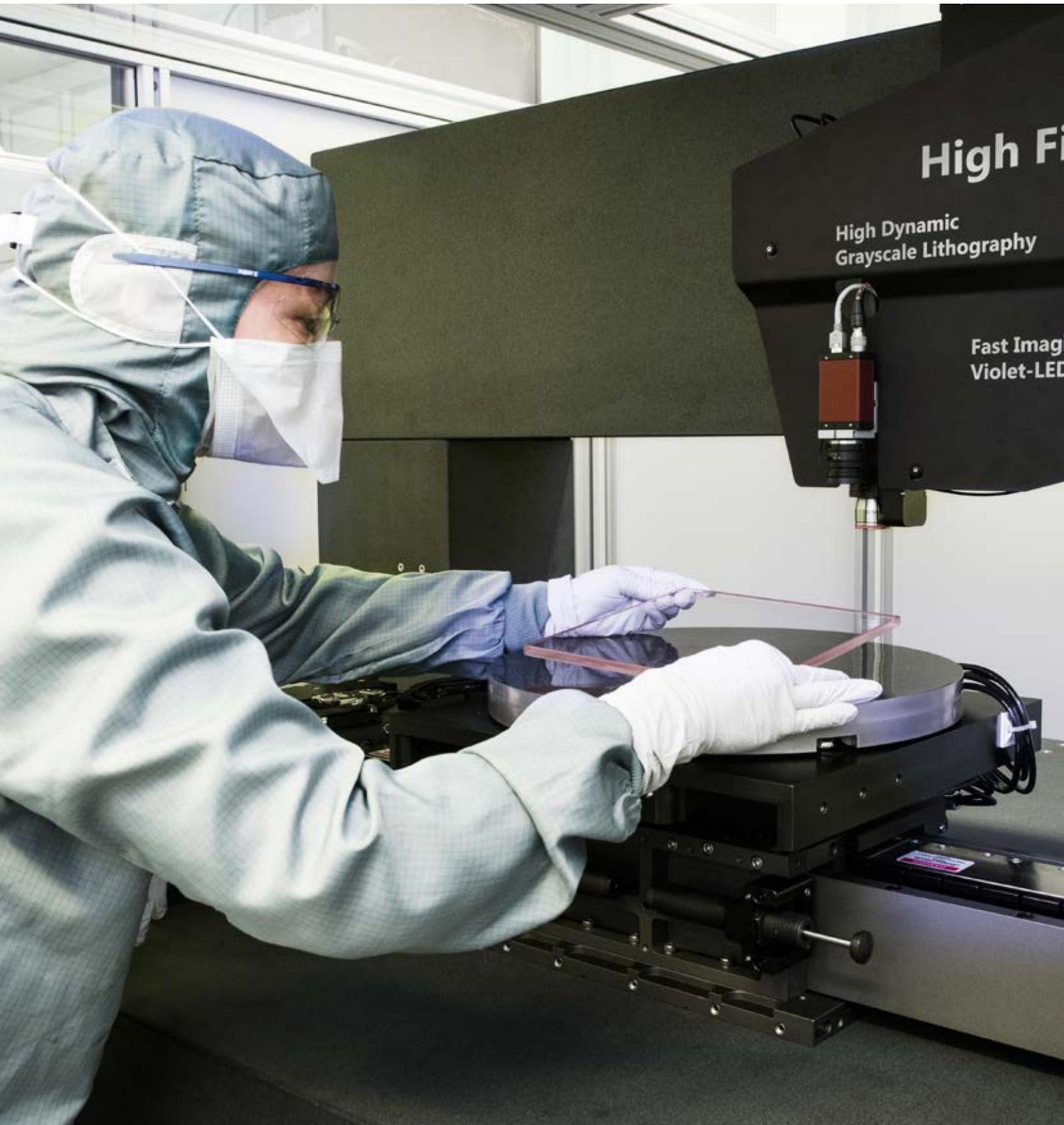
The following pages present selected research results which were obtained last year in internal projects or jointly with partners and clients. The examples show solutions for the following business areas:

- Optical components and systems
- Precision engineering components and systems
- Functional surfaces and layers
- Photonic sensors and measuring systems
- Laser technology.

LEFT *Herstellung von Preformen für aktive Laserfasern auf der MCVD-Anlage. |*

Production of preforms for active laser fiber on the MCVD system.

GESCHÄFTSFELD
BUSINESS FIELD



OPTISCHE KOMPONENTEN UND SYSTEME

OPTICAL COMPONENTS AND SYSTEMS

Das Fraunhofer IOF entwickelt kundenspezifische optische und mikrooptische Komponenten, Subsysteme und Systeme für eine Vielzahl unterschiedlicher Anwendungsbereiche. Alleinstellungsmerkmal ist dabei die Beherrschung der kompletten Prozesskette – vom Design über die Fertigung bis hin zur Charakterisierung – sowie die Bereitstellung von sowohl klassischen Bearbeitungsverfahren als auch von Laser-, Photo- und Elektronenstrahlolithographie. So werden unter anderem metalloptische Komponenten und Systeme für Objektive, Teleskope und Spektrometer entwickelt. Zu deren Herstellung werden unterschiedliche Varianten der Ultrapräzisionsbearbeitung eingesetzt, um sphärische, asphärische und freiform-optische Komponenten und Subsysteme herzustellen. Ein weiterer Schwerpunkt ist die Entwicklung und Herstellung von ein- und doppelseitigen refraktiven Mikrolinsenarrays sowie von diffraktiven, mikrooptischen Bauelementen.

Berechnungsalgorithmen für optische Freiformen, Freiformteleskope, mehrkanalige mikrooptische Systeme für Near-to-Eye oder Projektionsanwendungen, ein neues LED basiertes System für die Grautonlithographie, neue Abformtechniken für Mikrooptiken auf optoelektronische Wafer, sowie direktes Glas-Glas Bonden zeigen die Bandbreite der Projekte die 2014 in diesem Geschäftsfeld abgeschlossen werden konnten.

The Fraunhofer IOF develops customized optical and micro-optical components, subsystems, and systems for a variety of application areas. A unique feature is its control of the entire process chain – from design and manufacturing to characterization – and the provision of traditional processing methods as well as laser-, photo- and electron-beam-lithography. We develop e.g. metal optical components and systems for objectives, telescopes, and spectrometers. Different variants of ultra-precision manufacturing technologies are used to produce spherical, aspherical, and freeform optical components and subsystems. A further focus is the development and manufacture of single and double-sided refractive microlens arrays and diffractive micro-optical components using lithographic technologies.

Design tools for optical free-form elements, freeform telescopes, multi-channel micro-optical systems for near-to-eye or projection applications, a new LED based system for gray-scale lithography, new replication techniques for micro-optics on optoelectronic wafer, as well as direct glass-glass bonding show the range of projects that were completed in this business field in 2014.

LEFT *Prozessierung großflächiger Substrate in der LED-Lithographieanlage. | Processing of large-scale substrates in the LED based microlithography tool.*



HIGH DYNAMIC GRAYSCALE LITHOGRAPHY WITH FAST IMAGING VIOLET-LED EXPOSURE

Der Einsatz moderner mikrooptischer Elemente hat in den vergangenen Jahren zu einer signifikanten Steigerung der Funktionalität optischer Systeme geführt. Für die Realisierung solcher Elemente werden Herstellungsmethoden benötigt, mit denen sich effizient Mikrostrukturen beliebiger Geometrie und einer Präzision im Nanometermaßstab erzeugen lassen. Hierfür haben sich lithographische Verfahren als eine der flexibelsten und genauesten Möglichkeiten etabliert. Besonders die direkt schreibende Grauton-Lithographie bietet die Möglichkeit mikrooptische Strukturen in Größenskalen und Genauigkeiten bis in den Submikrometerbereich herzustellen. Kommerziell verfügbare Anlagen und Geräte basieren auf direktschreibender Laserlithographie. Diese scheitern häufig an der präzisen Strukturierung von Fotoresistschichten von mehr als 20 μm Dicke, was die maximale Pfeilhöhe der erzielbaren Strukturen limitiert. Weitere systembedingte Nachteile sind Schreibspuren und Oberflächenrauheit, die durch das Laseruschen hervorgerufen werden.

Aus diesem Grund wurde am Fraunhofer IOF ein neuartiges Verfahren der Grauton-Lithographie entwickelt, bei dem Hochleistungs-Leuchtdioden im ultravioletten Spektralbereich als Lichtquelle zum Einsatz kommen. Die Belichtungsdosis kann bei diesem Verfahren mit einer Ortsauflösung von wenigen 100 nm mit theoretisch unbegrenzter Dynamik und höchster Genauigkeit kontrolliert werden. Schreibspuren und Belichtungsartefakte werden durch eine spezielle Belichtungsdatenerstellung vermieden, bei der die Belichtungsdosis mit mehr als 100 Megapixeln pro Sekunde in Echtzeit berechnet wird. Ein wesentlicher Vorteil des Verfahrens ist

In the last two decades, the use of micro-optical elements has led to significant advancements in the functionality of optical systems. Realizing such elements demands fabrication methods which allow for the efficient manufacturing of micro-structures of arbitrary geometry and with precision in the nanometer range. Lithographic techniques have proven to be most flexible and accurate with respect to these demands. In particular, direct writing grayscale lithography offers the possibility to generate such structures down to a sub-micron scale in size and accuracy. Commercially available systems are based on direct writing laser lithography. Limits of this technology are frequently the maximum thickness of the resist layer at around 20 μm and writing artifacts due to stitching and laser noise.

Consequently, a novel approach for grayscale lithography based on high-power ultraviolet LED illumination was developed at the Fraunhofer IOF. The exposure dose can be controlled with a spatial resolution of only a few hundred nanometers with a theoretically infinite dynamic range and accuracy in the sub-percentage range. This is achieved by accurate control of the exposure time, as well as the intensity distribution on the substrate which is generated by a tailored optical system and illumination. Artifacts and traces of the exposure regime are compensated by highly developed online data preparation which generates more than 100 million pixels per second in real-time. Another major advantage of this new concept is the substantial reduction of the maximum intensity during exposure compared to laser lithography, by approximately 5 orders of magnitude. This enables high

1 *Belichtung dicker Lackschichten in der LED-Lithographieanlage. | Exposure of thick photoresist in the LED based microlithography tool.*

eine Reduktion der Spitzenintensität bei der Belichtung um ca. fünf Größenordnungen gegenüber der Laserlithographie, wodurch unerwünschte thermische und chemische Reaktionen des Photoresists vermieden werden. Unter anderem lassen sich dadurch auch Resistschichten von über 100 µm Dicke strukturieren.

Unter Verwendung dieser neu entwickelten Technologie wurde am Fraunhofer IOF in weniger als einem Jahr eine produktions-taugliche Anlage aufgebaut, die bereits erfolgreich zur Herstellung von sphärischen, asphärischen und irregulären Mikrolinsenarrays, von Gitterstrukturen auf ebenen und gekrümmten Oberflächen sowie diffraktiven und refraktiven Strahlformern eingesetzt wurde. Es können mikrostrukturierte Oberflächen mit einer Geschwindigkeit von ca. 100 cm²/h hergestellt werden. Die minimal erreichbare Strukturgröße liegt derzeit bei ca. 400 nm. Die maximale Abmessung der zu strukturierenden Oberfläche beträgt derzeit ca. 300 cm. Weiterhin ist die Strukturierung von gekrümmten Oberflächen mit Abweichungen von <10° von der Ebene möglich.

reproducibility of the process by avoiding unwanted thermal and chemical reactions of the photoresist. It is also possible to process resist layers with a thickness beyond 100 µm.

Using this new concept, a lithography system was built up in less than a year and ready for production in mid-2014. This system has now been successfully used to fabricate spherical, aspherical and irregular micro-lens arrays, grating structures on plane and curved substrates and diffractive and refractive beam shapers. The system can fabricate micro-structured surfaces with a structuring speed of more than 100 cm²/h. The minimum achievable structure size is approximately 400 nm. The maximum extension of the structured substrate is currently approximately 300 cm. Moreover, the structuring of curved surfaces with an angular deviation of up to 10° from the plane is possible.

AUTHORS

Hans-Christoph Eckstein

Marko Stumpf

Philipp Schleicher

Ralf Rosenberger

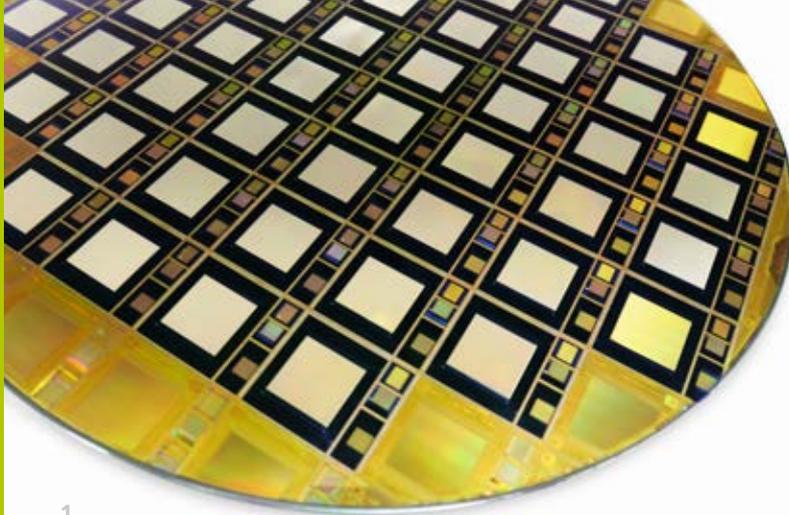
Uwe D. Zeitner

CONTACT

Dr. Hans-Christoph Eckstein

Phone +49 3641 807-439

christoph.eckstein@iof.fraunhofer.de



MIKRO-OPTIK BACK-END PROZESS DURCH UV-REPLIKATION AUF CMOS-WAFER

MICRO-OPTIC BACK-END PROCESS USING UV REPLICATION ON CMOS SUBSTRATES

Für Mikrolinsenarrays auf CMOS Imagern gibt es weit entwickelte Standard-Technologien, die jedoch aufgrund der Prozessierbarkeit und Stabilität des als Linsenmaterial verwendeten deep-UV Fotoresists auf kleine Lenslets und geringe Schichtdicken (wenige μm) begrenzt sind. Somit sind sie nicht geeignet für große Empfängerpixel oder Sensorik-Anwendungen, bei denen eine Mikrolinse über mehreren Pixeln angeordnet ist. Dasselbe gilt für Kollimationslinsen oder Strahlformungselemente auf vertikal emittierenden Lasern (VCSEL) oder generell für abbildende Mikro-Optik auf Optoelektronik-Wafern. Eine am Fraunhofer IOF entwickelte UV Replikationstechnologie ^{1/} wurde nun erfolgreich für ebensolche Anwendungen direkt auf CMOS und GaAs Halbleiterwafern qualifiziert.

UV Replikation ist ein Gießverfahren, welches problemlos auf strukturierte Oberflächen übertragen werden kann. UV-härtende Polymere als optische Materialien sind thermisch und chemisch stabil mit einstellbaren Haftungseigenschaften und lassen sich durch eine strukturierte UV-Belichtung selektiv aushärten. Die notwendige Präzision wird durch die Konstruktion des verwendeten Mask-Aligners und Toolings, u.a. interferometerüberwachte und piezosteuerte Dickeneinstellung erreicht. Geeignete Polymerdicken liegen zwischen 20 und 300 μm .

In-line microlens fabrication techniques on CMOS imagers are highly developed but limited to small lenslets and polymer thicknesses in the range of a few microns. This is due to the processability and stability of deep UV photoresists which are used as the lens material. Thus, these techniques are not suitable for large-area pixels or sensor applications where a single lenslet covers several pixels. This is valid for collimation and beam forming elements for vertical cavity surface emitting lasers (VCSELs) and imaging micro optics on opto-electronic wafers in general.

An UV replication technology ^{1/} as developed by Fraunhofer IOF Jena has now been successfully qualified for those processes directly on CMOS and GaAs wafers. UV replication as a casting process can be easily adapted to patterned surfaces. UV curing polymers as optical materials are thermally and chemically stable, can be patterned by selective photopolymerisation and enable optimized adhesion to various materials. The specified precision is realized by the construction of the mask aligner and toolings used in the process, i.e. interferometric and piezo-actuated thickness control. A practical polymer thickness ranges from 20 μm to about 300 μm .

The micro-optical structure is defined by the surface of the replication tool; as a result, other lithography-based

¹ *Silizium CMOS Wafer mit integrierten lichtsammelnden Linsenarrays. | Silicon CMOS wafer with integrated lens arrays for fill factor improvement.*

Die optische Struktur wird durch die Form der Werkzeugoberfläche vorgegeben; somit können neben dem Standardverfahren Fotolithographie und Reflow beliebige lithographiebasierte Mastering Technologien eingesetzt werden, z.B. für Linsenarrays mit 100% Füllfaktor oder für Strahlableiter bzw. diffraktive Strahlformungselemente.

Abb. 1 zeigt einen 200 mm CMOS Wafer (300 µm Dicke) mit integrierten Mikrolinsen aus hochbrechendem UV-Polymer. Säge- und Kontaktflächen sind aufgrund der Maskierung im Werkzeug (siehe dazu auch Abb.2) nicht polymerbeschichtet. Es konnte gezeigt werden, dass die Technologie kompatibel zu weiteren Prozessschritten wie Sägen, Löten bei 260°C, Bonden oder Abdünnen ist.

processes can be utilized in addition to standard lithography and reflow mastering, i.e. to realize 100% fill factor, or deflecting or diffractive beam forming elements for VCSELs. Fig. 1 shows a 200 mm CMOS wafer (300 µm thickness) with integrated micro lenses made with high index UV-curing polymer. Dicing lanes and contact areas are free from polymer due to the corresponding mask in the replication tool (see also fig. 2). The technology is compatible with further process steps such as dicing, soldering at 260°C, bonding, and thinning.

References / Literatur

/1/ P. Dannberg et al.; Micromachines (2014) 5, 325-340.



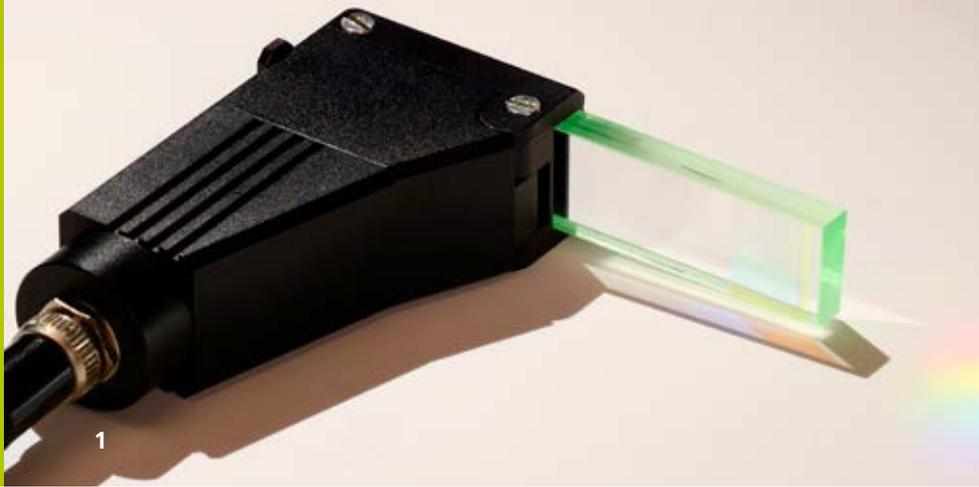
2 Abformwerkzeug für VCSEL Kollimationslinsen (mit integrierten Blendenstrukturen). | Replication tool (with integrated apertures) for VCSEL collimation lenses.

AUTHORS

Robert Leitel
Peter Dannberg
Antje Oelschläger
Sylke Kleinle
Lorenz Stürzebecher
Peter Schreiber

CONTACT

Dr. Robert Leitel
Phone +49 3641 807-375
robert.leitel@iof.fraunhofer.de



MEHRKANALIGES NEAR-TO-EYE DISPLAY MIT LICHTLEITER MULTI-APERTURE NEAR-TO-EYE DISPLAY WITH LIGHTGUIDE

Tragbare Computer- und Kommunikationshardware, wie Smartphones oder -watches, leiden unter Platzmangel zur Informationsdarstellung. Near-to-eye Displays ermöglichen eine mit Büromonitoren vergleichbare Visualisierung zusammen mit einem sehr geringen Platzbedarf und einer optionalen Durchsichtfunktionalität. Die Realisierung als unauffällige Datensichtbrille erfordert die durchgängige Miniaturisierung der Grundbestandteile Mikroimager mit Ansteuerung sowie Okularoptik und Lichtleiter, der zur Verschiebung des Bilds in die Eye-motion Box dient und die Durchsichtfunktionalität ermöglicht.

Der einfachste Fall ist ein planparalleler Lichtleiter mit Ein- und Auskoppellementen, die die Projektion der Okularoptik in den Lichtleiter ein- und an dessen Ausgang in die Eye-motion Box auskoppeln und die Durchsichtfunktionalität realisieren. Verglichen mit anderen Koppellementen, wie Prismen oder vergrabenen reflektiven Strahlteilern, ermöglicht der Gitterkoppler eine besonders starke Miniaturisierung, wird aber durch die Winkeldispersion beeinträchtigt. Nutzt man identische Gitter für Ein- und Auskopplung, heben sich zwar Dispersion für Einfallswinkel auf, die Dispersion der Bildverschiebung bleibt aber unbeeinflusst. Nutzt man die besonderen Eigenschaften von Multiaperturoptiken durch die Verwendung eines Arrayprojektionssystems für die Okularoptik /1/, kann man die Abhängigkeit der Bildverschiebung von Wellenlänge und Einfallswinkel vorkompensieren und ein extrem flachbauendes System erzielen.

Wearable computer and communication devices such as smartphones or smart watches suffer from their limited space to visualize information. Near-to-eye displays offer information content comparable with common desktop monitors together with small form-factor and optional see-through functionality. Realization as unobtrusive dataglasses requires consistent miniaturization of the usual system building blocks: micro-imager with driving electronics, eye-piece optics and a lightguide which shifts the projected image to the eye-motion box and permits a see-through option.

The simplest case is a plano-parallel lightguide with incoupling features to launch the image into the lightguide, and outcoupling features on its other end which direct the image to the user's eye and enable see-through. Compared to a number of different optical approaches for incoupling and outcoupling such as prisms and slanted mirrors, the grating coupler enables thorough miniaturization together with zero-order see-through – but suffers from angular dispersion. Using identical gratings for incoupling and outcoupling, dispersion is canceled out for incident and exiting ray-angles, but a remarkable wavelength dependency of the image shift remains. Utilizing the unique properties of multi-aperture optics, an array projection eye-piece /1/ with appropriately arranged channels offers pre-correction of the image shift's dependence on wavelength and incidence angle and results in an extremely slim overall optical system layout (fig 2.).

1 *Near-to-eye Display Demonstrator.* | *Near-to-eye display demonstrator.*

Das aufgebaute Demonstratorsystem (Abb. 1) nutzt ein LED-beleuchtetes Mikrodiarray als Mikroimager. Ein als Polymer-auf-Glas repliziertes Reflowlinsenarray zusammen mit einer Makrolinse bildet das Multiapertur-Okular. Das mit 10° Gesichtsfeldwinkel projizierte Bild wird durch ein in Polymer abgeformtes binäres Gitter mit 455 nm Periode in einen 3.8 mm dicken Wellenleiter eingekoppelt. Nach einer Propagation von 40 mm durch den Lichtleiter wird durch ein identisches Gitter in die Eye-motion Box ausgekoppelt und die Durchsichtfunktionalität durch die 0. Ordnung realisiert (Abb. 2).

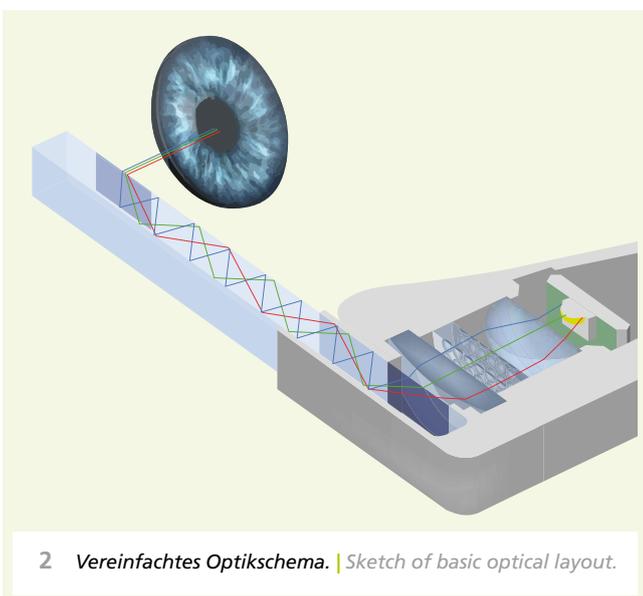
Verglichen mit herkömmlichen Einzelapertursystemen ermöglicht die Kombination einer Mehrkanalokularoptik mit einem Lichtleiter eine sehr platzsparende und unauffällige Realisierung von Datenbrillen mit Durchsichtfunktionalität.

Literatur / References

/1/ Peter Schreiber, Marcel Sieler, Matthias Kraus, "Projection display and method for projecting an overall image"
WO 2013/144311A1.

The realized demonstrator system (fig. 1) uses an LED-illuminated micro-slide array as a micro-imager model. A reflow lens array replicated as a polymer-on-glass element together with a bulk lens forms the multi-aperture eye-piece optics. The achieved 10° field of view image is launched into a 3.8 mm thick glass lightguide by a 455 nm period binary grating, which is replicated into a thin polymer layer on top of the lightguide. After 40 mm image shift through the lightguide, an identical outcoupling grating directs the image to the observer's eye and realizes the see-through functionality by its zeroth order (fig. 2).

Compared to single-aperture systems, the combination of multi-aperture eye-piece optics and a lightguide enables an extremely slim and unobtrusive system layout of see-through dataglasses.



AUTHORS

Peter Schreiber
Matthias Lorenz
Frank Fuchs

CONTACT

Dr. Peter Schreiber
Phone +49 3641 807-430
peter.schreiber@iof.fraunhofer.de



ARRAYPROJEKTOR ZUR ABBILDUNG AUF FREIFORMFLÄCHEN ARRAY PROJECTOR FOR PROJECTION ON ARBITRARY CURVED SCREENS

Die Projektion lichtstarker Bilder auf beliebig geformte Oberflächen stellt schon immer hohe Anforderungen an den Designer des optischen Systems. Die Hauptaufgabe besteht darin einen Kompromiss zwischen der hohen Schärfentiefe (kleine Apertur) und dem benötigten Flux (große Apertur) zu finden. Aus diesem Grund wird oftmals ein komplexer, scannender Laserprojektor verwendet.

Ein weiterer Ansatz zur Erfüllung dieser Anforderungen ist der Arrayprojektor. Dieser besteht aus einem monolithischen Array von mindestens 250 kleinen Projektoren, die jeweils aus einer Beleuchtungslinse, einem Dia und einer Abbildungslinse aufgebaut sind. Die Beleuchtung mit ebenfalls arrayförmig angeordneten LED Lichtquellen ermöglicht eine lichtstarke Abbildung. Ein einzelner Projektionskanal hat eine sehr hohe Schärfentiefe. Die Unabhängigkeit des optischen Systems von der Geometrie der Bildebene in diesem Bereich ist eine der wichtigsten Eigenschaften für die Projektion auf Freiformflächen.

Die Fertigung des Arrayprojektors erfolgt vollständig am Fraunhofer IOF. Die unterschiedlichen Projektionsabstände werden durch eine Vorverzerrung der Diastrukturen realisiert /1/. Um eine pixelgenaue Überlagerung auf der Bildebene erreichen zu können, wurden Algorithmen zur entsprechenden Vorverarbeitung der Dias entwickelt und

Projecting high-intensity images onto free form screens poses great challenges for the design of an optical system. The main objective is to find a compromise between the depth of field (small aperture) and the required flux (large aperture). A complex and expensive laser scanning projector is therefore often used.

Another approach to meet these requirements is the array projector, which consists of a monolithic array of at least 250 microprojectors, each comprising an illumination lens, a slide and an imaging lens. The lighting with arrayed LED light sources enables a high-intensity image. A single projection channel has a very high depth of field. The most important property is the independence of the optical system from the geometry of the image plane.

The array projector is produced entirely at the Fraunhofer IOF. The various projection distances are realized by a corresponding predistortion of the slide structures /1/. In order to achieve a pixel-accurate overlay on the image plane, algorithms for preprocessing the slides were developed and implemented. A master of the created object mask is produced with the help of a laser writer. This structure is copied onto a glass wafer and the lenses are molded with the established micro-optical technology at the IOF /2/. The array projectors are then separated and cleaned. Once the circuit boards with the LEDs,

1 **Abbildung eines Blumenstraußes auf einen Freiformschirm mittels des Arrayprojektors. |**

Projection of a bouquet of flowers on an arbitrary curved screen using the array projector.

implementiert. Von der erstellten Diamaske wird mit Hilfe eines Laserschreibers ein Master erzeugt. Mit diesem kann die Struktur auf den Wafer kopiert und die Linsen können mit der etablierten Mikrooptiktechnologie im Fraunhofer IOF abgeformt werden /2/. Im Anschluss werden die Projektoren vereinzelt und gereinigt. Sind die Platinen mit den LEDs, die Kollimatoren und die mechanischen Bauteile gefertigt, erfolgt die Montage (Abb. 1).

Der Arrayprojektor zeichnet sich durch seinen einfachen optischen Aufbau, die geringe Bautiefe und die lichtstarke Projektion aus. Dieser ist folglich ebenfalls für Projektionen auf Freiformflächen geeignet, für welche die Komplexität des optischen Systems bisher zu groß war. Anwendungsfelder für den Arrayprojektor findet man sowohl in der Mess- und Sicherheitstechnik, als auch bei der Effektbeleuchtung für Werbezwecke.

the collimators and the mechanical components have been manufactured, the parts are mounted (fig. 1).

The array projector for free form screens is distinguished by its simple optical setup, low thickness and high brightness. In conclusion, it can be noted that the comparatively simple design opens up new possibilities for applications. In comparison with laser scanning projectors, the array projector requires a less complex optical system. Application fields for the array projector can be found in metrology and safety engineering, as well as in the decorative lighting sector for advertising purposes.

References / Literatur

/1/ M. Sieler, S. Fischer, P. Schreiber, P. Dannberg and A. Bräuer, "Microoptical array projectors for free-form screen applications," Opt. Express 21, 28702-28709 (2013).

/2/ P. Dannberg, F. Wippermann, A. Brückner, A. Matthes, P. Schreiber and A. Bräuer, "Wafer-Level Hybrid Integration of Complex Micro-Optical Modules," Micromachines 2014, 5, 325-340

AUTHORS

Stephanie Fischer

Peter Schreiber

Marcel Sieler¹

Andreas Mann

¹ BMW Group

CONTACT

Dr. Peter Schreiber

Phone +49 3641 807-430

peter.schreiber@iof.fraunhofer.de



FREIFORMTELESKOP MIT KORREKTURSPIEGEL FREEFORM TELESCOPE WITH CORRECTOR MIRROR

Die Abbildungsqualität hochpräziser Spiegelteleskope wird unter Anwendungsbedingungen durch fertigungs-, montage- oder umweltbedingte Faktoren beeinflusst. Abweichungen der Einzelkomponenten beeinträchtigen die Wellenfront und führen zu Abbildungsfehlern des Gesamtsystems. Anspruchsvolle optische Systeme stellen daher hohe Anforderungen an Formabweichung und Positionsgenauigkeit der Einzelspiegel, sowie geringe Deformationen infolge der konkreten Montage-situation oder dem Einfluss verschiedener äußerer Lastfälle.

Die final erreichbare Qualität eines montierten Spiegelteleskops kann durch die Einführung einer speziellen Korrekturfläche signifikant verbessert werden. Dazu wird die Wellenfront des justierten Systems vermessen und die aufgenommenen Daten in ein optisches Designprogramm zur Simulation eines ausgewählten Korrekturspiegels rückgeführt. Nach Demontage vom System wird die simulierte Freiformfläche dem Korrekturspiegel durch eine lokale Formkorrektur als Oberflächendeformation aufgeprägt (Abb. 1). Ist diese »perfekt schlechte« Form hergestellt /1/, wird der Spiegel anhand ultrapräzise gefertigter Referenzflächen reproduzierbar im Teleskop montiert /2/.

Abb. 2 zeigt den Einfluss einer Korrekturfläche auf die interferometrisch gemessene Wellenfront eines afokalen Vierspiegel-Teleskops. Bei ausschließlicher Verwendung diamantbearbeiteter Spiegelflächen (Abb. 2 A) erreicht das

The imaging performance of high-quality mirror telescopes during operation is influenced by a variety of fabrication, assembly and environmental related factors. Residual deviations of single components adversely affect the wavefront of the telescope and lead to certain aberrations. Demanding optical systems therefore require mirrors with the lowest figure deviation and highest position accuracy, as well as minimum deformations due to mounting stresses or other external loads.

The achievable quality of a mounted mirror telescope can be improved significantly by introducing a specific corrector surface. The wavefront error of the adjusted system is measured over its field of view. The determined data are fed back into the optical design software to simulate a selected corrector mirror, which compensates for residual wavefront aberrations in the system. After demounting the mirror from the telescope, the simulated freeform shape is manufactured onto the mirror body using local figure correction techniques (fig. 1). Once the "perfectly bad" shape has been fabricated /1/, the mirror is remounted in the telescope in a highly reproducible way using ultra-precisely machined reference surfaces /2/.

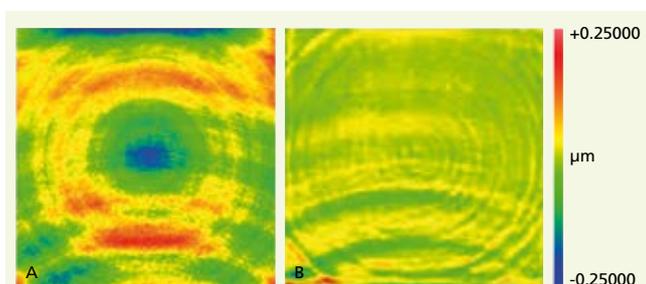
Fig. 2 shows the influence of a corrector surface on the transmitted wavefront of a four mirror afocal telescope. By using diamond machined surfaces only, the system achieves diffraction-limited performance in the infrared range with a minimum wavefront error of 70.7 nm rms (fig. 2 A) over a clear aperture

1 MRF-Formkorrektur des Primärspiegels auf einer Apertur von 116 x 116 mm² mit einem 50 mm Polierrad. | MRF figure correction of the primary mirror with a 50 mm polishing wheel over a clear aperture of 116 x 116 mm².

System eine beugungsbegrenzte Qualität für den infraroten Bereich mit einem minimalen Wellenfrontfehler von 70,7 nm rms bei einer freien Apertur von 100 x 100 mm². Limitierende Faktoren für den Einsatz bei kürzeren Wellenlängen sind insbesondere die verbleibenden Formabweichungen der axial und außeral axial bearbeiteten Einzelspiegel. Nach erfolgter Systemprüfung wurde die im Optikdesign ermittelte Korrekturfläche durch lokale MRF®-Bearbeitung auf dem Primärspiegel hergestellt. Durch den Korrekturspiegel konnte der Wellenfrontfehler auf 25,2 nm rms im zentralen Feldpunkt (Abb. 2 B) reduziert werden /3/. Dies entspricht einer Verbesserung des Strehl-Wertes von 0,5 auf 0,95 bei 632,8 nm. Das Teleskop operiert somit für den gesamten visuellen Spektralbereich beugungsbegrenzt.

Danksagung

Teile der Ergebnisse wurden vom Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) im Rahmen des Projektes VISTEL, FKZ 50EE1224 gefördert.



2 Reduzierung des Wellenfrontfehlers des Teleskops um ca. Faktor 2,5 durch Einführung eines Freiformkorrekturspiegels (Apertur 100 x 100 mm²). | Reduction of the transmitted telescope wavefront error by a factor of approximately 2.5 after installing a freeform corrector mirror (square aperture 100 x 100 mm²).

of 100 x 100 mm². Limiting factors for shorter wavelength applications particularly include the residual figure deviations of the on-axis and off-axis machined single mirrors. After testing the system, the primary mirror was locally figure-corrected with MRF® according to a previously simulated corrector shape. The corrector mirror minimizes the residual wavefront error of the system down to 25.2 nm rms (fig. 2 B) for the central field point /3/. This equates to an improvement in Strehl ratio from 0.5 to 0.95 at the testing wavelength of 632.8 nm. The manufactured metal telescope is thus considered to be diffraction-limited over the whole visible spectral range.

Acknowledgements

Parts of the presented results were funded by the German Aerospace Center (DLR) on the VISTEL project, grant number 50EE1224.

References / Literatur

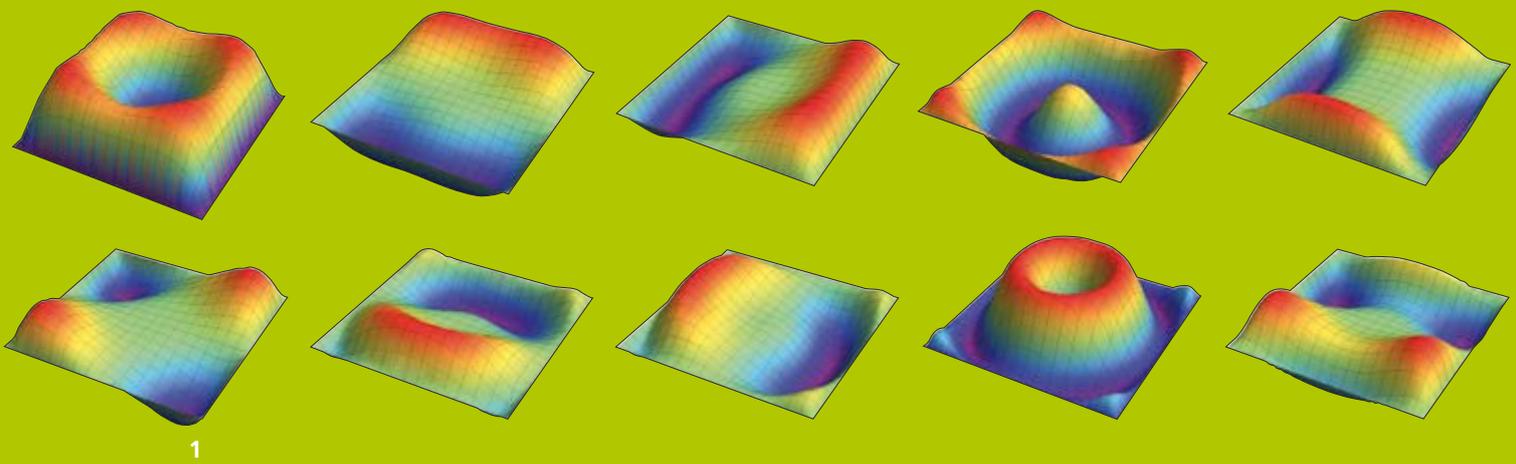
- /1/ P. Dumas, R. Hallock, A. Pisarski: Applications and benefits of "perfectly bad" optical surfaces. Proc. SPIE Vol. 7102 (2008).
- /2/ S. Scheiding, C. Damm, W. Holota, T. Peschel, A. Gebhardt, S. Risse: Ultra-precisely manufactured mirror assemblies with well-defined reference structures. Proc. SPIE Vol. 7739 (2010)
- /3/ M. Beier, S. Scheiding, A. Gebhardt, S. Risse, R. Eberhardt, A. Tünnermann: Figure correction of freeform mirrors with well-defined reference structures by MRF. Proc. of the ASPE, (2014)

AUTHORS

Matthias Beier
Wilko Fuhlrott
Andreas Gebhardt
Johannes Hartung
Stefan Risse

CONTACT

Matthias Beier
Phone +49 3641 807-326
matthias.beier@iof.fraunhofer.de



NEUARTIGE BESCHREIBUNGEN OPTISCHER FREIFORMFLÄCHEN NEW DESCRIPTIONS OF FREEFORM OPTICAL SURFACES

Traditionell sind optische Wirkflächen eben, sphärisch oder rotationssymmetrisch-asphärisch. Seit einiger Zeit werden aber auch ganz allgemeine Flächenformen untersucht, die es erlauben, die Qualität sehr kompakter symmetrie-freier Systeme zu verbessern oder besondere Funktionalitäten zu erzielen. Beliebige geformte glatte Flächen sind daher für abbildende Systeme mit hohen Anforderungen an die Qualität zunehmend von Interesse. Für die Entwicklung dieser Art von Komponenten gibt es aber noch verschiedene unzureichend gelöste Probleme. Eine Schwierigkeit besteht darin, die Fläche in vorteilhafter Weise mathematisch zu beschreiben. In CAD-Systemen und im Maschinenbau verwendet man seit langem Splines vom NURBS-Typ für entsprechende Fragestellungen. Im Bereich optischer Anwendungen bestehen aber teilweise andere Anforderungen an die Flächendarstellung, insbesondere schnelle Konvergenz und gute Qualitätsergebnisse bei der Optimierung, ein schnelles Raytracing und günstige Bedingungen für die Fertigbarkeit. Hinsichtlich dieser Kriterien sind die Erfahrungen mit Splineflächen nicht sehr vorteilhaft und es ist notwendig, alternative Beschreibungen zu entwickeln. Ein besonders günstiger Ansatz ist eine Entwicklung in einen orthogonalen Satz von Basisfunktionen, womit man die Anzahl der Freiheitsgrade in der Optimierung reduzieren kann. Durch die spezielle strahlablekende Wirkung der Flächen in der Optik ist es besonders hilfreich, eine steigungs-ortho-

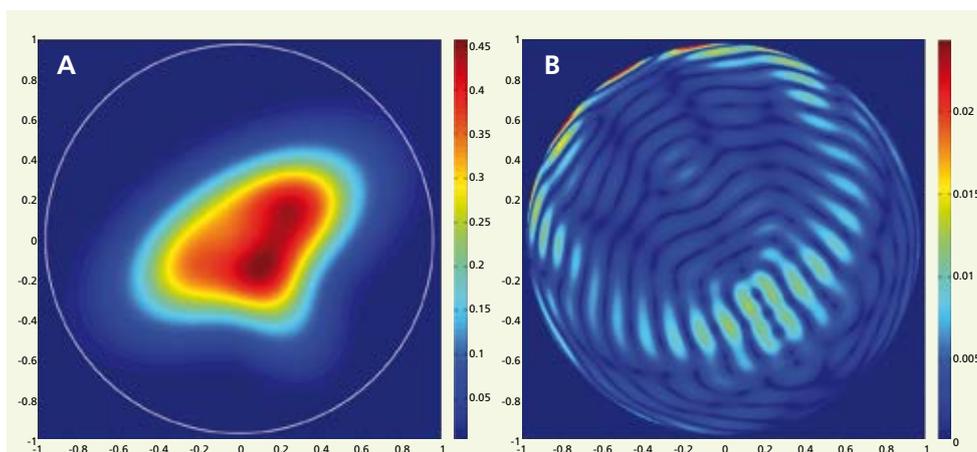
Historically, optical surfaces have been plane, spherical or rotationally symmetric/aspherical in shape. In recent years, more general freeform shapes have been investigated as a means of controlling the quality of very compact optical systems without any symmetry or to generate very special functionalities. Arbitrarily shaped smooth surfaces are of growing interest in applications with high quality imaging requirements. There are, however, many unsolved problems in the development of these components. One of the challenges involves the mathematical description of the surface. In mechanical design, freeform surfaces are typically described by splines of the NURBS type. Optical applications, in part make other demands on the representation, in particular good performance and fast convergence in optimization, fast raytracing and easy manufacturability. Splines have proven to be unsuitable for these objectives, necessitating alternative solutions. Expansions into orthogonal basis functions have some advantages. They allow a reduced number of parameters in optimization. Due to the special properties of the light deflection, it is feasible to use functional systems which are orthogonal in slope. This offers faster convergence in optimization and better final results. On the other hand, the problems of manufactured surfaces with local errors cannot typically be described well with orthogonal descriptions with global support. Several representations are

1 *Beispielformen der Basisfunktionen niedriger Ordnung für eine Freiformfläche mit rechteckiger Randform. | Low order shapes of a newly developed expansion description for freeform surfaces for rectangular boundaries.*

nale Darstellung zu wählen. Wenn man gefertigte Flächen beschreiben will ist es ferner wichtig, lokale Deformationen zu erfassen, was orthogonale Entwicklungen in der Regel nicht erlauben. Daher ist eine einzige Beschreibungsform letzten Endes nicht ausreichend für alle Wünsche, die man im Bereich der optischen Flächen hat. Abhängig von möglichen Restsymmetrien und der Randform der zu betrachtenden Fläche wurden daher verschiedene Flächendarstellungen entwickelt und getestet. Für eine objektive Bewertung dieser Alternativen und als Entscheidungshilfe wurden einige Beispiele definiert und ein Benchmark der möglichen Lösungen mit den verschiedenen Kriterien durchgeführt.

therefore necessary in practice. Depending on the remaining symmetry and the shape of the boundary, several new types of surface descriptions were developed.

For an objective assessment of the various properties, a benchmark with different options was defined and the performance of several formulations tested on the basis of different criteria.



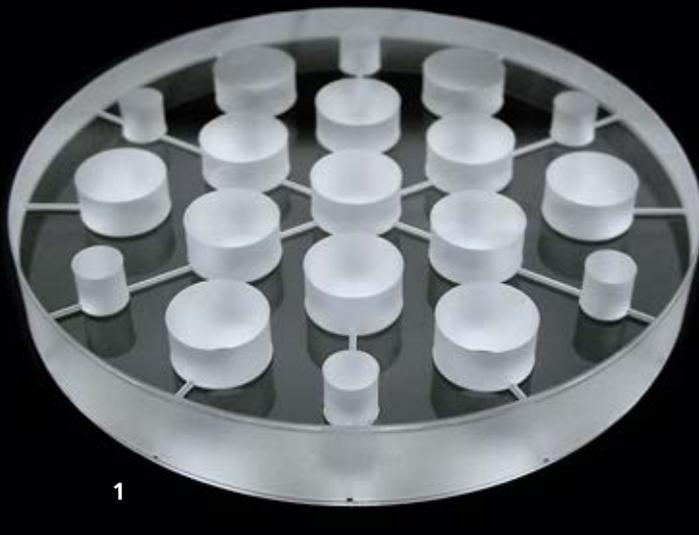
2 *Typische Ergebnisse einer Benchmark-Testrechnung. a) gegebene Form auf einer normierten Grundfläche, b) Ergebnis der Steigungsabweichung nach einer Anpassung mit 225 Zernike-Polynomen. | Typical result of a benchmark test calculation: a) given shape on a normalized quadratic area, b) result of the residual slope deviations after a fitting procedure with 225 Zernike polynomials fabricated grating wafer.*

AUTHORS

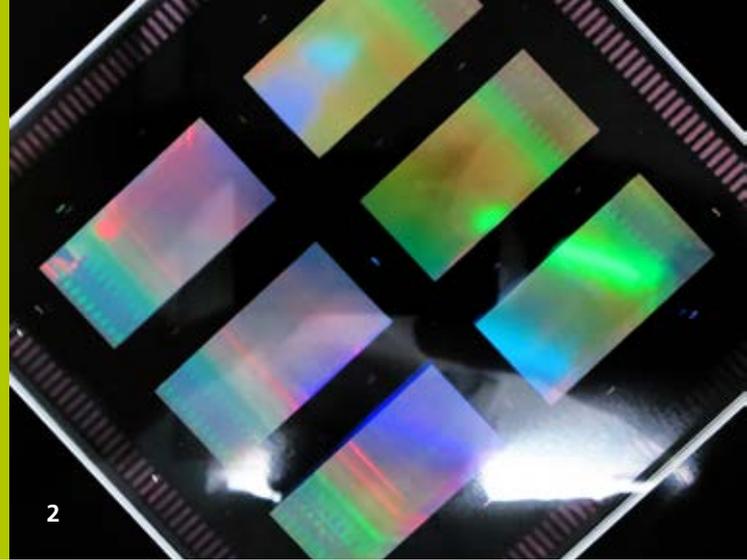
Anika Brömel
Herbert Gross
Mateusz Oleszko
Johannes Hartung
Uwe Lippmann

CONTACT

Prof. Dr. Herbert Gross
Phone +49 3641 9-47992
herbert.gross@uni-jena.de



1



2

GLAS-GLAS-DIREKTBONDEN GLASS-GLASS DIRECT BONDING

Das Verfahren des zwischenschichtfreien Glas-Glas-Direktbondens /1/ ist angelehnt an bewährte Prozesse im Bereich des Si-Si-Wafer-Bondens. Ausgewählte Gläser wie Kieselglas, ULE von Corning oder ZERODUR von Schott weisen eine geringe thermische Ausdehnung auf und ermöglichen den Aufbau thermisch stabiler opto-mechanischer Systeme für Anwendungen in der Lithographie oder im Weltraum. Aufgrund der hohen Transparenz über einen breiten Spektralbereich (UV-NIR) ist Kieselglas für die meisten photonischen Übertragungsgeräte wie Strahlteiler und Pulskompressoren geeignet. Das plasmagestützte, hydrophile direkte Bonden eröffnet zahlreiche Möglichkeiten, sowohl für konstruktive wie transmissive Anwendungen /2/.

So konnten hochsteife und leichte ULE »Sandwich«-Verbindungen mit 150 mm Durchmesser und > 20 mm Höhe bei Temperaturen um 250 °C hergestellt werden (Abb. 1). Materialangepasste kovalente Si-O-Si-Bindungen vermeiden Probleme wie Kriechen oder thermische Verformung bei Temperaturdrift, welche beim Polymer-Bonden üblich sind. Die Formstabilität der Verbindung wurde durch interferometrische Messungen bis in den Temperaturbereich von Flüssigstickstoff nachgewiesen.

Auch binär strukturierten Oberflächen –wie Pulskompressionsgitter aus Kieselglas– konnten erfolgreich gebondet werden. Sie ermöglichen es für TE-Polarisation nahezu die gesamte Intensität in eine Beugungsordnung zu transferieren

Interlayer-free glass-glass direct bonding /1/ is closely related to proven processes in Si-Si wafer bonding. The low thermal expansions of fused silica (FS), or dedicated "zero-expansion" glasses such as Corning's ULE and Schott's ZERODUR, enable the structure of thermally stable opto-mechanical compounds for use in lithography or in space. Due to its high transparency over a broad spectral range from ultraviolet to near infrared, FS is suitable for most photonic transmission devices such as beam splitters and pulse compressors. Plasma-assisted hydrophilic direct bonding opens up numerous possibilities for constructive and transmissive applications /2/.

Extremely stiff and lightweight ULE "sandwich" compounds of 150 mm diameter and > 20 mm height have been fabricated at temperatures around 250°C (fig. 1). Material-adapted covalent Si-O-Si bonds avoid problems of creep or thermal deformation upon temperature drift, as is common in polymer bonding. The form stability of the compound was verified by interferometric measurements down to liquid nitrogen temperatures.

Similarly, glass joints with binary structured surfaces – like pulse compression gratings – have been realized with FS. They enable transfer of almost the entire intensity of TE-polarized light into a single diffraction order and withstand high laser power densities without damage. To encapsulate the lithographically produced binary grating structure, a plane cover substrate was bonded at about 250°C under vacuum. A typical bond result is illustrated in fig. 2.

1 *Dünne ULE Wafer beideseitig gebondet auf ein dickes ULE-Substrat mit Bohrungen. |*

Thin ULE wafers bonded from both sides to thick ULE substrate with boreholes.

2 *Verkapselte Binär-Gitter durch Bonden zweier 6 Zoll FS-Maskensubstrate. |*

Encapsulated binary gratings by bonding two 6-inch FS mask blanks.

und überstehen hohe Laserleistungsdichten schadensfrei. Die lithographisch hergestellten binären Gitterstrukturen werden hierzu mit einem planaren Deckelsubstrat aus identischem Material im Vakuum bei Temperaturen um 250°C verbunden. Ein typisches Bond-Resultat ist in Abb. 2 dargestellt.

Gegenwärtig wird die Technologie auf das Fügen von Prismen mit binären Gittern erweitert. Neben einer hohen Bondfestigkeit muss die exakte Orientierung der Gitterlinien zum Prismenwinkel gewährleistet werden. Eine entsprechende Alignment-Vorrichtung zum Bonden großer, steifer Substrate ist in Arbeit. Die damit erzielten GRISM-Baugruppen (Abb. 3) sollen in optischen Systemen (Spektrometern) im Weltraum eingesetzt werden.

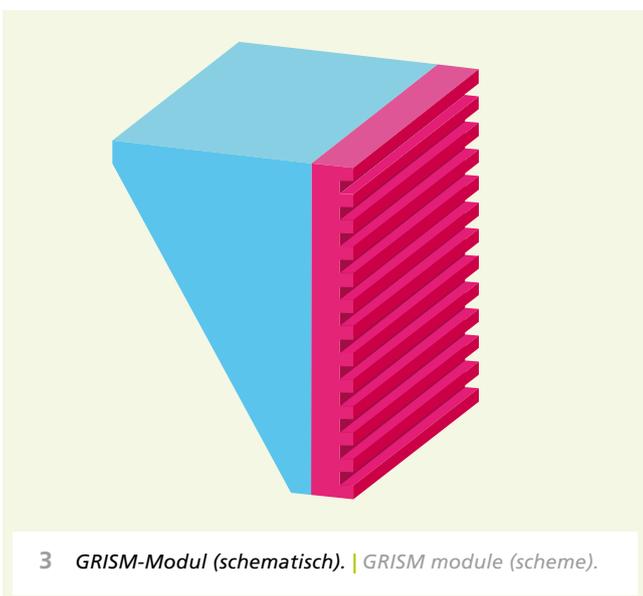
Das Anwendungspotential des Verfahrens liegt zum einen im Bereich optischer Sub-Systeme für hohe Laserleistungen (Materialbearbeitung). Zum anderen wird der Bau hochstabiler optischer Systeme ermöglicht, welche Temperaturschwankungen problemlos überstehen (Luft- und Raumfahrt) und ggf. auch autoklavierbar sind (Medizintechnik).

The technology is currently being expanded to bond prisms to gratings. In addition to high bond strength, the correct orientation of the grid lines to the prism angle must be ensured. A corresponding alignment device for bonding large, rigid substrates is under development. The resulting GRISM modules (fig. 3) will be used in optical systems (spectrometers) for space.

On the one hand, the application potential of this technology is in the field of optical sub-systems for high laser powers (material processing). On the other, highly stable optical systems which withstand temperature fluctuations easily (aerospace) or allow autoclaving if necessary (medical technology) are possible.

References / Literatur

- /1/ D. Ando, K. Oishi, T. Nakamura, S. Umeda, "Glass direct bonding technology for hermetic seal package", Proc. IEEE, ISBN 0-7803-3744-1, 186-190 (1997)
- /2/ G. Kalkowski, S. Risse, U. Zeitner, F. Fuchs, R. Eberhardt, and A. Tünnermann, "Glass-Glass Direct Bonding", ECS Transactions, 64 (5) 3-11 (2014)

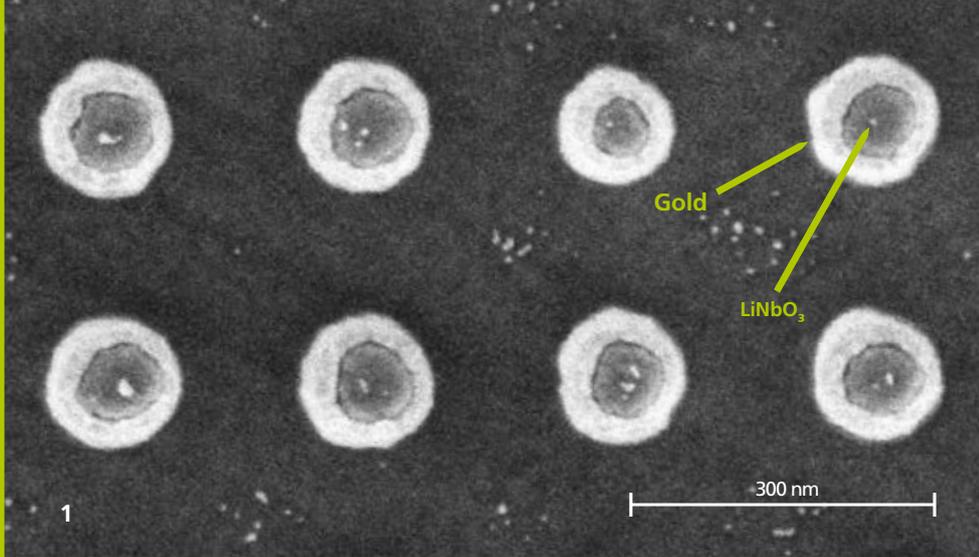


AUTHOR

Gerhard Kalkowski
Stefan Risse
Uwe Zeitner

CONTACT

Dr. Gerhard Kalkowski
Phone +49 3641 807-337
gerhard.kalkowski@iof.fraunhofer.de



VERSTÄRKUNG OPTISCHER EFFEKTE DURCH PLASMONISCHE NANORINGE ENHANCEMENT OF OPTICAL EFFECTS WITH PLASMONIC NANORINGS

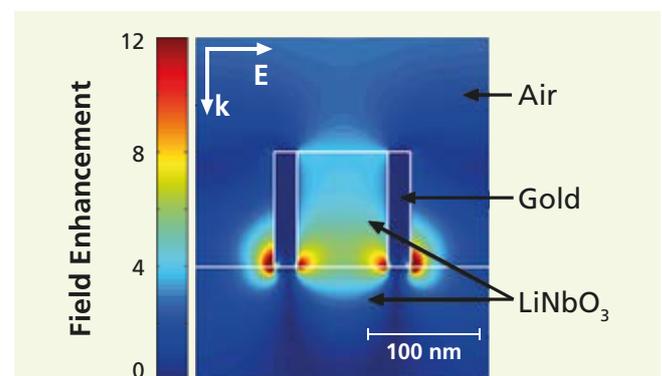
Metallische Nanoringe sind Basisstrukturen für plasmonische Nanomaterialien. Sie zeichnen sich durch eine hohe Symmetrie aus und haben mit ihren faszinierenden plasmonischen Eigenschaften zur Entwicklung vieler Anwendungen wie spektroskopischer Filter, oberflächenverstärkter Sensorik und Nanoantennen geführt. Ihr Alleinstellungsmerkmal ist eine ausgeprägte Feldüberhöhung im Kern (Abb. 2). Sofern sie mit einem polarisierbaren Medium gefüllt werden, kann dort eine Verstärkung der Licht-Materie-Wechselwirkung erzielt werden.

Diesem Ansatz folgend, erzielen wir durch Füllung mit Lithiumniobat (LN) eine signifikante Verstärkung der Erzeugung zweiter harmonischer (SHG) in sub-Wellenlängen Volumina. Der Herstellungsprozess ermöglicht eine hoch effiziente Herstellung der Nanoringe mit einem Durchsatz im Bereich von dm^2 pro Stunde. Zunächst werden durch Elektronenstrahlolithographie mittels Charakterprojektion (Abbildung einer Formstrahlblende in die Resistebene) und Ionenstrahlverstärktes Ätzen LN-Säulen strukturiert. Anschließend wird Double Patterning genutzt, um Goldnanoringe um die Säulen herum formen.

Die hergestellten Ringe mit einem Innendurchmesser von 80 nm, einem Außendurchmesser von 120 nm und einer Höhe von 100 nm sind in einem quadratischen Gitter mit einer

1 Rasterelektronenmikroskopische Aufnahme der hergestellten Goldnanoringe, gefüllt mit Lithiumniobat. | Raster-electron-micrographs of fabricated samples: gold nanorings filled with lithium niobate.

Metallic nanorings are key structures for photonic nanomaterials. Their high degree of symmetry and intriguing plasmonic properties have led to the development of many applications, such as spectroscopic filters, surface-enhanced sensors and nanoantennas. At resonance, nanorings provide the unique advantage of a pronounced plasmonic field enhancement inside their core (fig. 2) that should significantly enhance light-matter interactions if filled with a polarizable medium. We validated this concept by filling gold nanorings with lithium niobate (LN) to significantly enhance second harmonic generation (SHG) in sub-wavelength volumes.

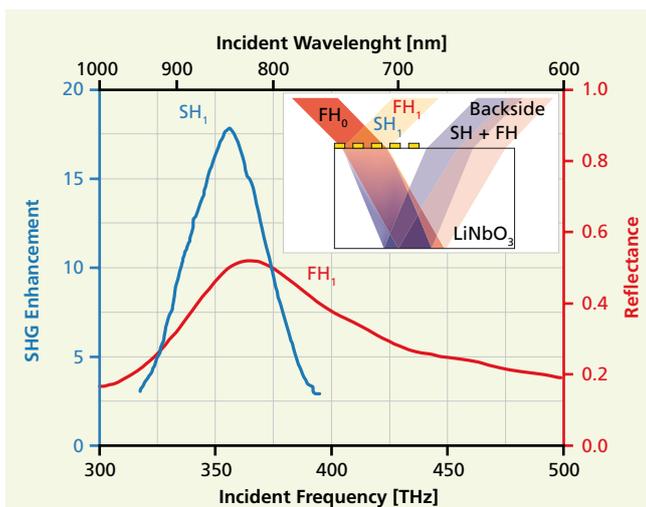


2 Normalisierte Ex-Komponente des elektrischen Feldes, bei resonanter Beleuchtung der mit Lithiumniobat gefüllten Goldnanoringe. | Normalized Ex-component of the electric field at resonant illumination of gold nanorings filled with lithium niobate.

Periode von 260 nm auf dem LN-Substrat (x-cut) angeordnet (Abb. 1). Solch kleine Strukturen ermöglichen eine Anregung im nahen Infraroten und SHG im visuellen Spektralbereich. Wie in den Simulationen vorhergesagt, wird bei Beleuchtung mit einem Einfallswinkel von 45° eine Verstärkung der SHG um den Faktor 20 (Abb. 3) erreicht. In zukünftigen Experimenten werden wir einen Faktor von 50 bis 60 bei senkrechter Inzidenz nachweisen.

The implemented fabrication process enables the efficient fabrication of the nanostructure with a throughput of dm^2 per hours. The main process steps comprise the creation of crystalline LN pillars by character projection electron beam lithography, i.e. imaging of a shaped aperture in the plane of the resist, and ion beam enhanced etching. Later, double patterning is utilized to form the gold nanorings around the LN pillars.

The fabricated nanorings with an inner diameter of 80 nm, an outer diameter of 120 nm and a height of 100 nm are arranged on a square lattice with a period of 260 nm, on top of a crystalline LN substrate (fig. 1). Such small dimensions allow the excitation of the nanostructure at NIR wavelength and second harmonic generation at visible wavelength. As predicted by simulations, we obtained an enhancement of the second harmonic signal by a factor of 20 at oblique incidence (fig. 3). In future experiments, we will achieve a factor of 50 to 60 at normal incidence.



3 Gemessene SHG-Verstärkung (SH1) and lineares Reflektionsspektrum (FH1). In der rechten Ecke ist die gewählte Messgeometrie skizziert. | Measured SHG enhancement (SH1) and linear reflection spectrum (FH1). The inset depicts the chosen measurement geometry.

AUTHORS

Dennis Lehr¹

Jörg Reinhold¹

Illia Thiele¹

Kay Dietrich¹

Christoph Menzel¹

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

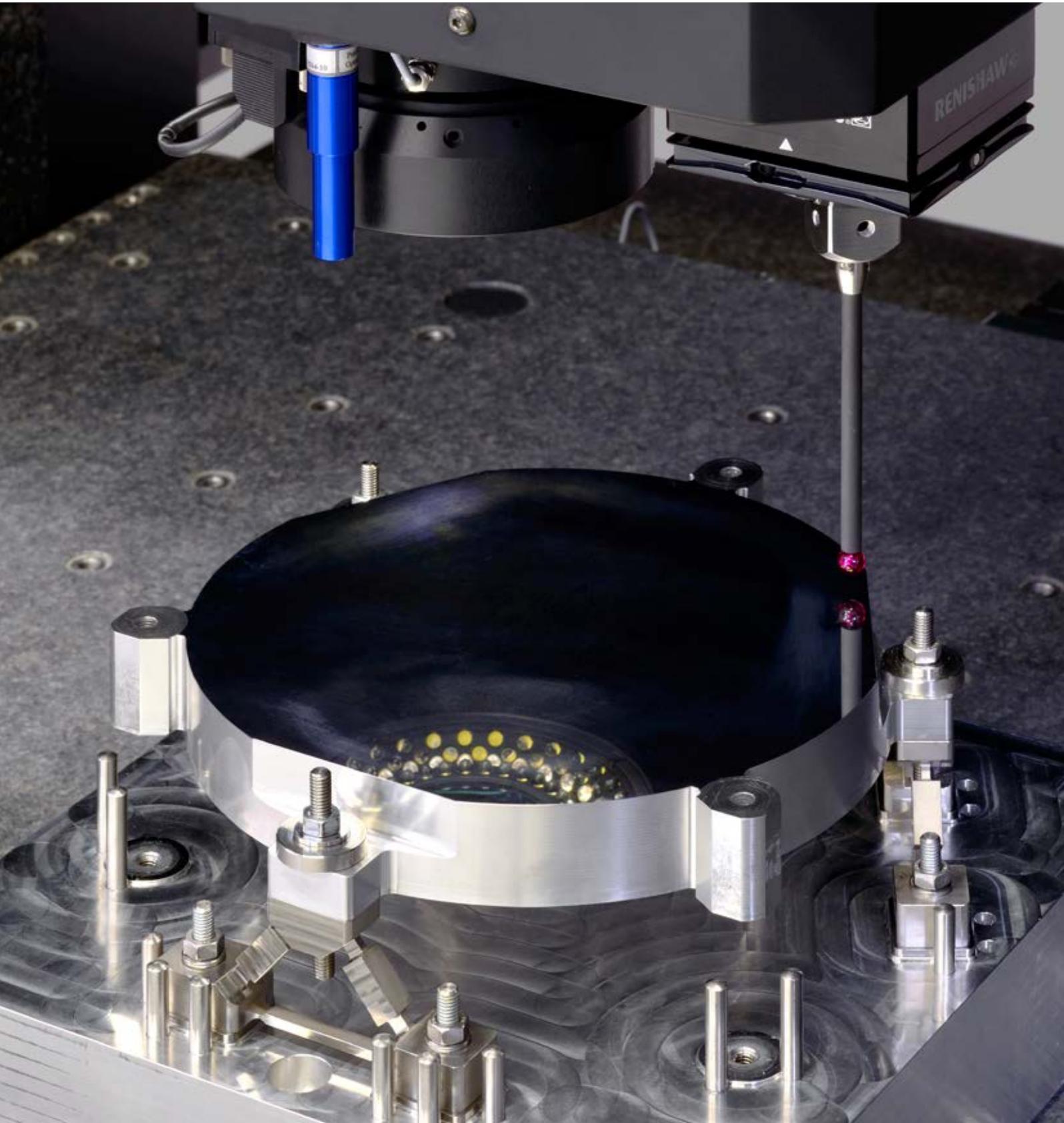
CONTACT

Dennis Lehr

Phone +49 3641 9-47838

dennis.lehr@uni-jena.de

GESCHÄFTSFELD
BUSINESS FIELD



FEINMECHANISCHE KOMPONENTEN UND SYSTEME / PRECISION ENGINEERING COMPONENTS AND SYSTEMS

Die Kombination von Feinmechanik und Optik stellt ein Alleinstellungsmerkmal des Fraunhofer IOF innerhalb der deutschen und europäischen Forschungslandschaft dar und setzt die Tradition Jenas als einem der führenden Optikstandorte fort. Die Schwerpunkte der Forschungstätigkeiten in diesem Geschäftsfeld sind die Auslegung und Herstellung von mechanischen Baugruppen für definierte Anforderungen (z.B. Vakuum, Temperatur, Spannung, Leichtbau), Technologieentwicklungen zu speziellen Komponenten bzw. Bewegungssystemen (z.B. Chucks), Verfahrensentwicklungen zur Aufbau- und Verbindungstechnik von optischen Systemen (z.B. Laserlöten, CO₂-Laserspleißen, SPDT, Drucken), der Aufbau und die Erprobung von Demonstratoren und Prototypen sowie die Entwicklung von Sondermaschinen und Vorrichtungen (z.B. Justierdrehmaschinen).

Die ultrapräzise Freiformbearbeitung von Abformwerkzeugen setzt die Kompetenzen dieses Geschäftsfeldes anhand von höchsten Anforderungen gezielt um. Ebenso werden hochpräzise metallische Freiformspiegel mittels Magnetorheological Finishing zur Formkorrektur und gleichzeitigen Glättung der Spiegeloberfläche hergestellt.

Digitale Druckverfahren zur Funktionsintegration auf polymerbasierten Chips werden genutzt, um zum Beispiel Mikropumpen für Lab-on-Chip Systeme zu realisieren.

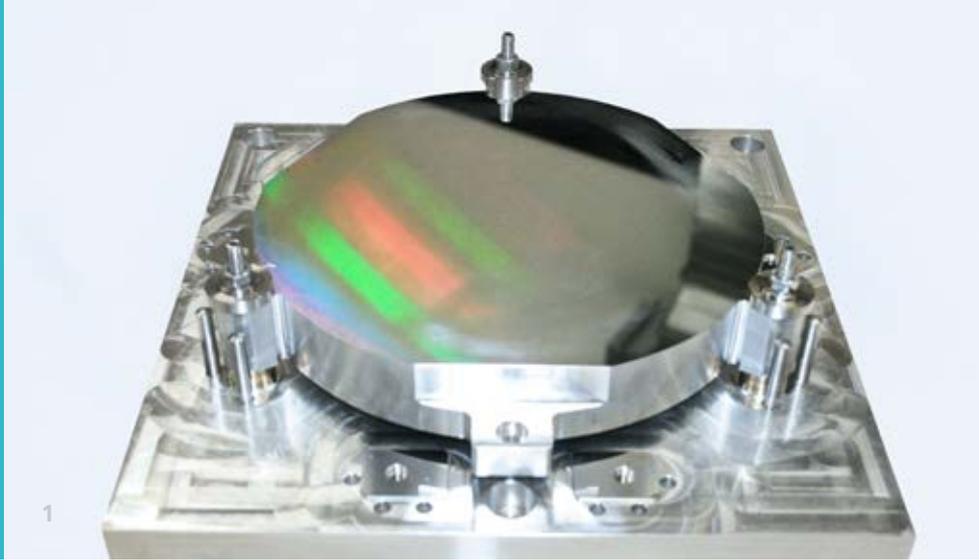
The combination of precision engineering and optics represents a unique feature of the Fraunhofer IOF in the German and European research environment and continues the tradition of Jena as a leading optical center. The focus of the research activities in this segment are the design and manufacture of mechanical assemblies for defined requirements (e.g. vacuum, temperature, voltage, lightweight construction), technology developments for specific components or motion systems (e.g. chucks), process development for the construction and connection technology of optical systems (e.g. laser soldering, CO₂ laser splicing, SPDT, printing), the construction and testing of demonstrators and prototypes, and the development of special machines and devices (e.g. adjustment milling machine).

The ultra-precision freeform machining of molding tools implements the competencies of this business segment to the highest standards.

Similarly, high-precision metallic freeform mirrors are produced with magnetorheological finishing for shape correction and simultaneous smoothing of the mirror surface.

A method for digital printing of integrated functions on polymer-based chips is used, for example, to implement micro-pumps for lab-on-chip systems.

LEFT Versuchsaufbau zum hochgenauen Ausrichten optischer Elemente. | *Experimental setup for high-precision alignment of optical elements.*



POSITIONIERUNG OPTISCHER ELEMENTE FÜR DAS EUCLID-INSTRUMENT

POSITIONING OF OPTICAL ELEMENTS FOR THE EUCLID INSTRUMENT

Euclid ist ein geplantes Weltraumteleskop der ESA zur Vermessung der großräumigen Anordnung und Verteilung der beobachtbaren Materie im Weltraum, um Erkenntnisse über die beschleunigte Expansion des Alls und die Stärke der Gravitation auf kosmologischen Skalen zu gewinnen. Dazu soll ein 1,2 m Teleskop im Lagrange punkt L2 stationiert werden ^{1/}.

Im Auftrag der OHB System AG entwickelt das Fraunhofer IOF ein Konzept zur Justage der eingesetzten Kameraoptik. Es handelt sich um ein Linsensystem, das bei kryogenen Temperaturen eingesetzt werden soll. Gleichzeitig sollen Justagetoleranzen für die einzelnen Linsen im einstelligen Mikrometerbereich eingehalten werden.

Da die Integration der Optiken unter Laborbedingungen erfolgt, müssen thermische Verschiebungen vorgehalten werden, die auf Grund der unterschiedlichen verwendeten Materialien beim Abkühlen unvermeidlich sind. Grundvoraussetzung dafür ist die genaue Kenntnis der thermischen Ausdehnung aller verwendeten Materialien. Diese wird durch entsprechende Messungen am Fraunhofer IOF sichergestellt.

Weiterhin ist eine sehr hohe Reproduzierbarkeit der Positionierung der Bauteile im Bereich weniger Mikrometer notwendig. Dazu werden unterschiedliche Konzepte zur

EUCLID is a space telescope, projected by the ESA, for measuring the large-scale spatial arrangement and distribution of observable matter in space in order to gain knowledge about the accelerated expansion of the universe and the strength of gravity on cosmological scales. In order to do this, a 1.2 m telescope is to be stationed in the Lagrange point L2 ^{1/}.

On behalf of OHB Systems AG, the IOF developed a concept for the adjustment of the camera optical system used on the project. The lens system is used at cryogenic temperatures. At the same time, adjustment tolerances for the specific lenses in the single-digit micrometer range need to be met.

Since the optics can only be integrated under lab conditions, the thermal displacement during cooling, which is inevitable due to the different materials, must be corrected according to a prediction. The precondition for such a strategy is the exact knowledge of the thermal displacement of all materials used. This is ensured by way of appropriate measurements at Fraunhofer IOF.

Furthermore, a very high reproducibility of the positioning of the components in the range of a few micrometers is necessary. To achieve this, different concepts for the adjustment of the lenses' positions are examined using the experimental set-up shown in figure 1.

¹ Versuchsaufbau zum Testen unterschiedlicher Positionierkonzepte. |

Set-up for testing different positioning concepts.

Abstimmung der Linsenpositionen mittels des in Abb. 1 gezeigten Versuchsaufbaus untersucht.

Als zu positionierendes optisches Bauelement fungiert hier ein Planspiegel. Das Gehäuse des optischen Aufbaus wird durch die Grundplatte der Versuchseinrichtung ersetzt. Der Spiegel sowie die Referenz- und Montageflächen der Grundplatte wurden aus Aluminium mittels Einkorn-Diamant-Bearbeitung gefertigt.

Die Positionierung der optischen Elemente in Richtung der optischen Achse erfolgt durch hochpräzise Abstimm Scheiben, deren Dicke mittels Einkorn-Diamant-Bearbeitung eingestellt wurde. Einflüsse von Haltekräften, Reibung und entsprechenden Drehmomenten können durch interferometrische Vermessung der Spiegelfläche bestimmt werden.

Für die Ausrichtung des Bauteils in der Ebene senkrecht zur optischen Achse wurden Referenzstrukturen an Optikkassungen bzw. Spiegel und an Gehäuse bzw. Messplattform vorgesehen. Die Position des Spiegels wird über Endmaße reproduzierbar festgelegt. Die erreichte Genauigkeit wird mit einer Drei-Koordinaten-Messmaschine überprüft.

Im Ergebnis konnten Justiergenauigkeiten von $\pm 3 \mu\text{m}$ in allen 3 Raumrichtungen erreicht werden. Gleichzeitig konnte sichergestellt werden, dass durch die benötigten Haltekräfte keine übermäßige Deformation der optischen Bauelemente erfolgt.

Literatur / References

/1/ ESA, »EUCLID_overview«, http://www.esa.int/Our_Activities/Space_Science/Euclid_overview, 2013.

A plane mirror functions as the optical component that is to be positioned. The housing of the optical setup is replaced by the baseplate of the construction. The mirror as well as the reference and mounting surfaces of the baseplate were made of aluminum using single point diamond turning.

The optical elements are positioned in the direction of the optical axis by high-precision shims whose height was determined by single point diamond turning. Influences of cohesion and friction can be identified by interferometric measuring of the reflecting surface.

Reference structures on optical mirrors and measuring platforms were designed for positioning the component perpendicular to the optical axis. The position of the mirror is controlled by inserting gauge blocks between the reference surfaces. The achieved precision is determined by means of a 3-coordinate measuring machine.

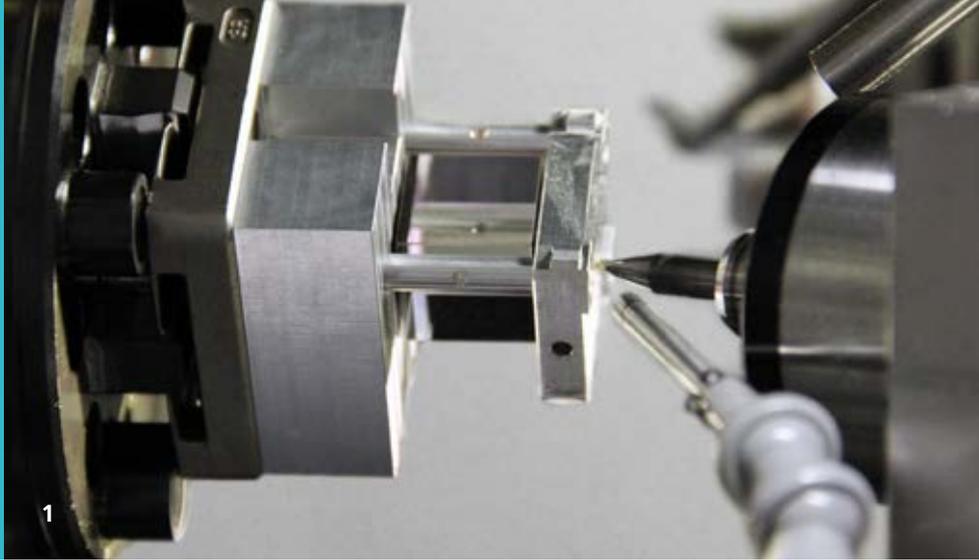
As a result, adjustment accuracies of $\pm 3 \mu\text{m}$ in all three spatial directions were achieved. At the same time, it was possible to ensure that there was no excessive deformation of the optical elements due to cohesion or friction.

AUTHORS

Thomas Peschel
Alexander Orthey
Christoph Damm
Jan Kinast

CONTACT

Dr. Thomas Peschel
Phone +49 3641 807-335
thomas.peschel@iof.fraunhofer.de



MONTAGEGERECHTE FERTIGUNGSTECHNOLOGIE FÜR GEFASSTE OPTIK

ADVANCED MANUFACTURING TECHNOLOGY FOR OPTICS ASSEMBLY

Die Wertschöpfung qualitativ hochwertiger Optiken wird durch effiziente Montagetechnologien erheblich gesteigert. Mit wachsender Komplexität des optischen Bauelements (Sphäre, Asphäre, Freiform) steigt die Anzahl der Freiheitsgrade, welche bei der Positionierung der Komponente im System oder bei deren messtechnischer Charakterisierung beachtet werden müssen. Referenzflächen, die einen hochgenauen Bezug zur optischen Wirkung des Bauelements aufweisen, sind daher entscheidend für eine effektive Systemmontage. Zahlreiche Aktivitäten zum Justierdrehen rotationssymmetrischer sphärischer und asphärischer Optiken sind Gegenstand aktueller Forschungstätigkeit /1/.

In einem Vorhaben der industriellen Gemeinschaftsforschung wurde erstmals der montagegerechte Fertigungsansatz für nichtrotationssymmetrische Optiken untersucht. Gegenstand des Projektes war die Untersuchung von Technologien zur definierten Referenzflächenbearbeitung unter Nutzung des Fertigungsverfahrens Fräsen. Das wesentliche Ergebnis ist die Entwicklung zweier grundlegender Maschinenkonzepte und der experimentelle Nachweis ihrer Leistungsfähigkeit. Das Konzept „separate Technologie“ basiert auf der Referenzflächenbearbeitung mittels ultrapräziser Maschinenteknik und einer bauteilspezifischen Messanordnungen bei reproduzierbarer Aufspannung durch ein Nullpunktspannsystem. Auf der Grundlage der ermittelten Messdaten, welche auf die optische Wirkung des Elements bezogen werden, wird eine

Efficient assembly technologies are a key factor in improving the profitability and quality of optical systems. The added value of high quality optics is crucially dependent on their system integration. Rising complexity (sphere, asphere, freeform) increases the degrees of freedom that must be considered during metrology and for the positioning of each optical element in the system. Well defined references for optics are one of the central aspects of work in the precision engineering components and systems business field. Numerous activities based on the alignment turning of spheres and aspheres are topics of research /1/. A similar approach for non-rotationally-symmetric optics was investigated on a joint project. The objective of the project was to manufacture references using milling as a manufacturing method. The main result of the project was the development of two basic machine concepts and their experimental proof of concept. The “Discrete Technology” notion separates the manufacturing of the reference elements from a component-specific metrology setup by using a datum point clamping system. Corrective machining of the reference elements is realized based on the measurement data which are strongly related to the optical function of the part. The novel approach can be used flexibly for optical elements including freeform optics. The concept was demonstrated using selected demonstrator samples. Based on ultraprecise manufactured mounting references, the reproducible assembly of a beamsplitter cube could be demonstrated with position tolerances under 2 microns and angle tolerances of below 20 arcsec.

1 Justierfräsen eines Strahlteilerwürfels mit Fassungsplattform. | Adjustment milling of a beamsplitter cube assembly.

Korrekturbearbeitung der Referenzflächen durchgeführt. Dies stellt eine prinzipiell neue Vorgehensweise dar. Der Ansatz kann universell für optische Bauelemente und insbesondere auch für Freiformen genutzt werden. Beispielsweise wurde die reproduzierbare Montage eines gefassten Strahlteilerwürfels mit Positionsabweichungen $< 2 \mu\text{m}$ für laterale Abstände bzw. $< 20 \text{ arcsec}$ für Winkelfehler anhand ultrapräzise bearbeiteter Montageflächen nachgewiesen.

Mit der Erweiterung einer in-house Justierdrehmaschine mit einem mehrachsigen CNC-Modul zur Fräsbearbeitung nicht-rotationssymmetrischer Fassungsstrukturen wurde erstmals eine Maschinenbasis zur Kombination von Justierdrehen und Justierfräsen entwickelt. Hieraus resultieren zahlreiche praxisrelevante Anwendungsmöglichkeiten wie Zylinderlinsen, Toroide, asphärische Zylinderlinsen und Asphären. Insbesondere für Zylinderlinsen wurden neuartige Messverfahren zur Bestimmung der Zentrierung der Zylinderflächen wie auch entsprechende Justieralgorithmen erarbeitet.

Danksagung: Wir danken der Forschungsvereinigung Feinmechanik, Optik und Medizintechnik e.V. (F.O.M.) und dem beteiligten Industriearbeitskreis für die Unterstützung innerhalb des AiF Programms zur Förderung der Industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF), IGF-Vorhaben 16909 BR / 1.

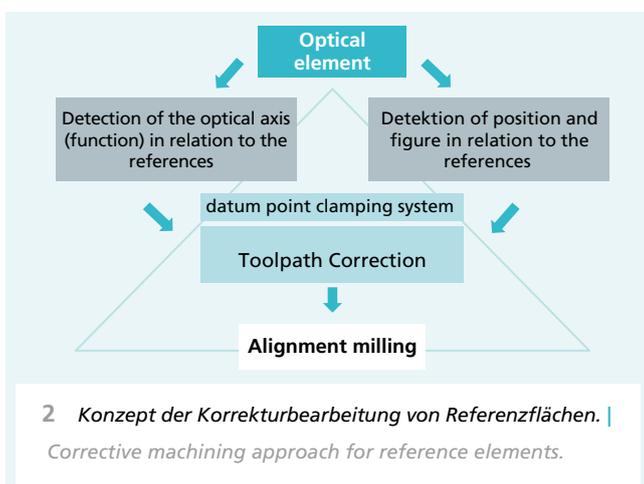
Based on a combination of an alignment turning machine with a CNC-milling module, a new machining setup to manufacture rotationally symmetric and non-rotationally-symmetric housing structures was realized. The outcome of this is a variety of relevant applications such as cylindrical lenses, toroids, aspherical cylinders and aspheres. New methods for the measurement of decentration as well as specific adjustment algorithms have been developed, particularly with regard to cylindrical lenses.

The authors would like to thank the Forschungsvereinigung Feinmechanik, Optik und Medizintechnik e.V. (F.O.M.) and the participating companies for their support on the AiF program entitled "Industrial Collective Research for SME", IGF-project 16909 BR / 1.

References / Literatur

/1/ Beier, M., et al.: Lens Centering of Aspheres for High-Quality Optics Adv. Opt. Technol. 2012; pp. 441-446

/2/ IGF-Vorhaben (16909 BR / 1) der Forschungsvereinigung Feinmechanik, Optik und Medizintechnik e.V. (F.O.M.) gefördert über die AiF im Rahmen des Programms zur Förderung der Industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages.



AUTHORS

Andreas Gebhardt
Matthias Beier
Erik Schmidt
Stefan Nolte

CONTACT

Andreas Gebhardt
Phone +49 3641 807-340
andreas.gebhardt@iof.fraunhofer.de



FILTERARRAYS FÜR RAUMFAHRT- INSTRUMENTE ZUR ERDBEOBACHTUNG FILTER ARRAYS FOR SPACE INSTRUMENTS FOR EARTH OBSERVATION

Satellitenbasierte Instrumente zur Erdbeobachtung scannen die Oberfläche unter Nutzung verschiedener Bereiche des elektromagnetischen Spektrums zur Kartierung und Erhebung geophysikalischer Veränderungen. Die Sentinel 2 Satelliten /1/ werden auf 13 spektralen Kanälen Bilder mit einer Ortsauflösung von 10, 20 und 60 Metern bei einer Detektionsbreite von 290 km vom sichtbaren (VNIR) bis zum kurzwelligen Infrarotbereich (SWIR) aufnehmen.

Zur Wellenlängen-Separation sind optische Filter notwendig. Ist eine direkte Abscheidung der Filterschichten auf den Detektoren nicht möglich, werden Farbfilter auf optisch transparenten Substraten abgeschieden. Die Einzelfilter werden in mechanischen Baugruppen aus Titanlegierungen zu Filterarrays zusammengefasst und vor den Detektoren positioniert. Zur Minimierung von Falschlicht und Effekten des Übersprechens werden die unterschiedlichen Bildkanäle mit mechanischen Blenden und opaken Zwischenschichten optisch isoliert /2/.

Die Abscheidung der Filterschichten auf mit optischer Präzision vorgefertigten Einzelfiltersubstraten erfolgte durch Optik Balzers Jena GmbH. Die Einzelfilter wurden in mechanischen Haltern mit Fertigungsgenauigkeiten $< 10 \mu\text{m}$ auf mechanische Anschläge positioniert und zusätzlich zur Reduzierung der mechanischen Belastungen während des

Satellite-based instruments for earth observation scan the surface in different spectral ranges to map and acquire geophysical data. The Sentinel 2 satellites /1/ will detect the earth surface at a resolution of 10, 20 and 60 meters and a swath width of 290 km at 13 different bands from the visible near infrared (VNIR) to the short wave infrared (SWIR) spectral range.

Optical filters are necessary for wavelength selection. The filter elements are deposited on optically transparent substrates if direct coating of the filter layers onto the detector elements is not possible. The single filter elements are arranged into mechanical subassemblies made of titanium alloys and aligned with the optical instrument in front of the detectors. To help minimize stray light and ghosting effects, different imaging channels are separated optically by mechanical apertures and opaque layers /2/.

Deposition of the filter coatings on single filter elements was realized by Optik Balzers Jena GmbH. Single filter substrates were polished to optical quality and coated in one batch per spectral band. During integration, the optical elements are arranged into mechanical holders with positioning accuracies of less than $10 \mu\text{m}$ using mechanical stops. The filter arrays were additionally fixed by an elastic adhesive to minimize mechanical loads during launch. The optical apertures were

1 VNIR (links) und SWIR (rechts) Filterarrays für Sentinel 2. |

VNIR (left) and SWIR (right) filter arrays for Sentinel 2.

Starts mit elastischem Klebstoff fixiert. Die Strukturierung der optischen Blenden in die mechanischen Bauteile erfolgte durch Präzisionsfertigung. Mechanische Strukturen wurden mit Genauigkeiten von $\pm 15 \mu\text{m}$ hergestellt.

Zur Einzelfilter-Integration ist die Qualifizierung aller Prozesse und Materialien für den Weltraumeinsatz notwendig. Dies wurde in Zusammenarbeit mit Jena-Optronik GmbH realisiert /3, 4/ und komplexe Charakterisierungen (z.B. Messung der Blendenstrukturen bezüglich integrierter Justiermarken der Filterarrays) durchgeführt. Die Filterarrays wurden in das Sentinel 2 A Instrument integriert, welches auf den Start im April 2015 vorbereitet wird /5/.

Danksagung

Die Untersuchungen wurden mit finanzieller Unterstützung der ESA/Jena-Optronik GmbH durchgeführt.

Literatur / References

- /1/ Cazaubiel, V. et. al.; Intern. Conf. of Space Optics (ICSO) 2008
- /2/ Lippmann, U. et. Al.; Intern. Light Simulation Symposium (LISYS) 2012
- /3/ Schröter, K. et. al.; Intern. Conf. of Space Optics (ICSO) 2008
- /4/ Chorvalli, V. et. al.; Intern. Conf. of Space Optics (ICSO) 2012
- /5/ <http://www.space-airbusds.com/de/pressezentrum/airbus-defence-and-space-liefert-umweltsatelliten-sentinel-2a-zur-testkampagne.html>

realized by precision manufacturing of the mechanical parts. Manufacturing accuracies in the functional opto-mechanical structures of less than $\pm 15 \mu\text{m}$ have been achieved.

Integrating the filter arrays necessitates the space qualification of processes and materials used, which was performed in cooperation with Jena-Optronik GmbH /3, 4/. Characterization of components and sub-assemblies with μm -uncertainties (e.g. measurements of filter aperture positions with respect to integrated alignment marks) was realized. The filter arrays were integrated into the Sentinel 2 A instrument. Launch is scheduled for April 2015 /5/.

Acknowledgment

This study was carried out with the financial support of ESA/Jena-Optronik GmbH.

AUTHORS

Matthias Mohaupt

CONTACT

Matthias Mohaupt

Phone +49 3641 807-342

matthias.mohaupt@iof.fraunhofer.de

GESCHÄFTSFELD
BUSINESS FIELD



FUNKTIONALE OBERFLÄCHEN UND SCHICHTEN

FUNCTIONAL SURFACES AND LAYERS

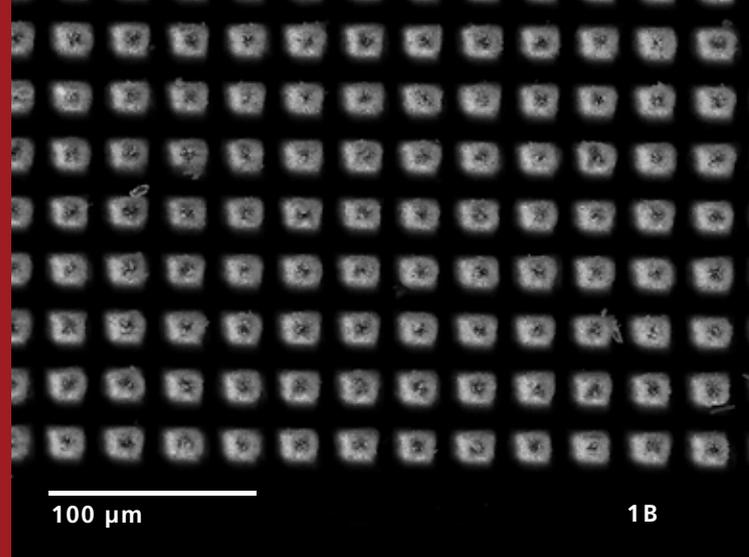
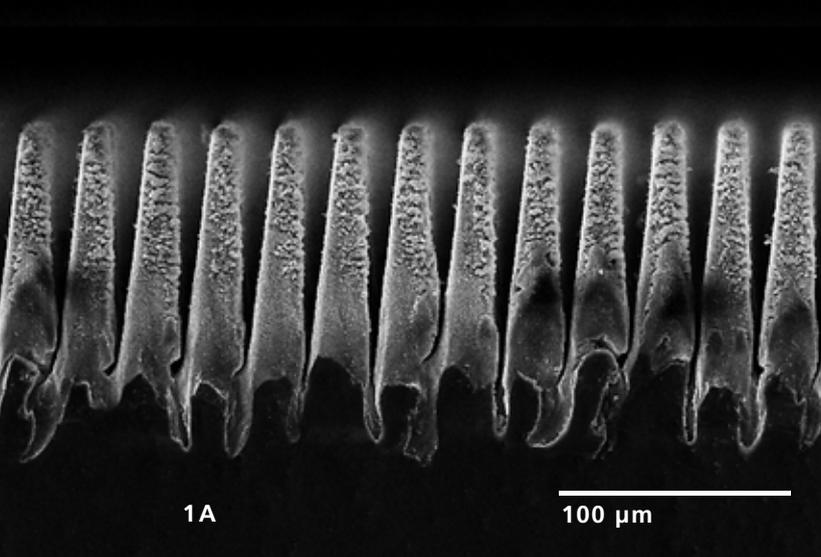
Das Fraunhofer IOF entwickelt funktionalisierte optische Oberflächen und multifunktionale optische Schichtsysteme auf allen wesentlichen optischen Materialien, wie Kunststoff, Glas, Keramik, Halbleitern und Metall, und für alle Bereiche des optischen Spektrums vom Röntgen/EUV bis zum IR. Dabei werden vielfältige Anwendungen mit hohem Innovationspotenzial abgedeckt: von der optischen Übertragungsfunktion in Strahlquellen und Kommunikationssystemen bis zu Anwendungen in der Medizin, in der industriellen Fertigung oder Umwelttechnik bis hin zur photovoltaischen oder thermischen Energieerzeugung. Dabei wird der gesamte Prozess von Design, Herstellung bis hin zur Analyse und Charakterisierung auf Weltspitzenniveau abgedeckt.

Das Fraunhofer IOF ist weltweit führend in der Entwicklung innovativer Entspiegelungen und reflektiver Hochleistungsoptiken für die industrielle Lithografie bei extrem kurzen Wellenlängen. Es ist dank seiner einzigartigen Ausstattung in der Lage, extreme Anforderungen in Bezug auf Substrate, Gradienten, spektrale Eigenschaften und Umweltbedingungen zu erfüllen.

The Fraunhofer IOF develops highly functionalized optical surfaces and multifunctional optical layer systems on all major classes of optical materials, such as glass, ceramics, polymers, semiconductors and metals and for the full range of the optical spectrum from the X-Ray/EUV to IR. It covers a large range of highly innovative applications ranging from the design of optical transfer functions in beam sources and communication systems, to applications in medicine, manufacturing, conservation, photovoltaics and thermal energy production. It covers the entire technological cycle of design, manufacturing and analysis on a global level of excellence.

The Fraunhofer IOF is a world leader in the development of innovative anti-reflective structures and reflective high-end optics for industrial lithography application at extremely short wavelengths. Owing to its unique set of equipment, it is able to fulfill extreme requirements with respect to substrates, gradients, spectral properties and environmental stability.

LEFT *Antireflex-Beschichtungen für den Automobilbereich (McLaren F1 Modell 1:12). | Antireflective coatings for automotive applications (model McLaren F1 1:12).*



LASERGENERIERTE ANTIREFLEXSTRUKTUREN FÜR TERAHERTZ-OPTIKEN

LASER-GENERATED ANTIREFLECTION STRUCTURES FOR TERAHERTZ OPTICS

Im Terahertz (THz)-Spektralbereich zwischen 0,1 und 10 THz (Wellenlängen von 3 mm bis 30 μm) existieren nur wenige Materialien, die aufgrund ihrer Transparenz und Wirkung für Optik-Komponenten verwendet werden können. Für Terahertz-Linsen werden in der Regel wasserfreie Kunststoffe (z.B. HDPE, TPX, Zeonex®) mit Brechzahlen um die 1,5 oder bis 1,9 bei Metalldotierung sowie hochbrechende Siliziumoptiken eingesetzt. Hochohmiges Silizium ($>10 \text{ k}\Omega$) mit einem Brechungsindex von ca. 3,41 (zw. 0,5 und 4,5 THz) eignet sich aufgrund der geringen Absorption ($<0,01 \text{ cm}^{-1}$ zw. 0,2 und 2 THz /1) für Ein- und Auskoppellinsen hochbrechender THz-Quell- und Detektormaterialien, für Strahlteiler-Elemente oder Optiken mit hoher numerischer Apertur. Allerdings erzeugt der hohe Brechzahlssprung zwischen Luft und Silizium relativ große Reflexionsverluste ($> 30\%$) und Störsignale durch Reflexionen innerhalb der Linsen, sodass die Abbildungsleistung und Signalqualität in THz-Systemen drastisch gemindert wird.

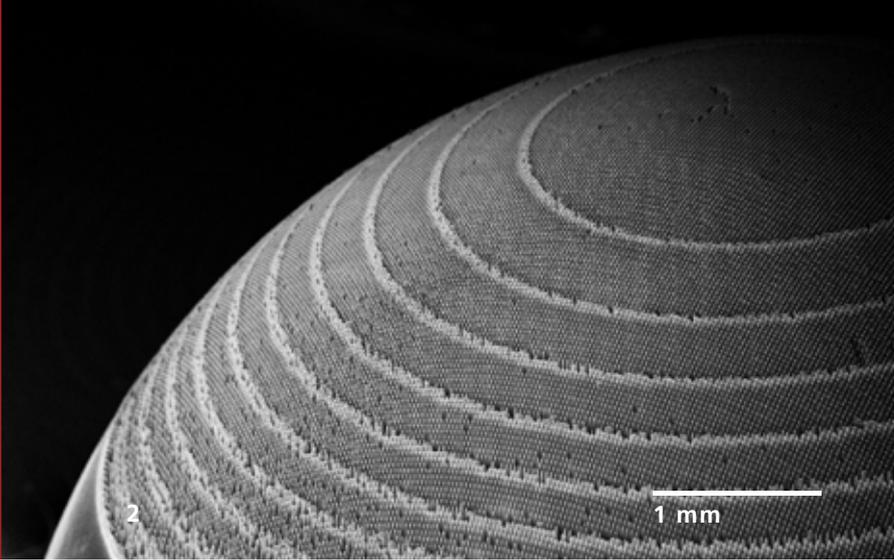
Abhilfe schaffen neue, breitbandige Antireflex (AR)-Strukturen, die in Form von Mottenaugen-Strukturen mit Ultrakurzpuls-Lasern auf Freiform-Oberflächen von Siliziumoptiken aufgebracht werden können. Durch die kurze Interaktionszeit ($<10 \text{ ps}$) zwischen den hochenergetischen Pulsen und der Materialoberfläche werden Ablationsprozesse, ohne thermische und mechanische Schädigungen, zur hochpräzisen Mikrostrukturierung verwendet. Dabei arbeitet das Verfahren

In the Terahertz (THz) spectral range between 0.1 and 10 THz (wavelengths from 3 mm to 30 μm), only a few materials can be used for THz optics due to high absorption losses. As a result, waterless plastics such as HDPE, TPX or Zeonex® with refractive indices of about 1.5 or up to 1.9 with metal-doping, as well as high refractive silicon optics, are usually used for THz lenses. In particular, high-resistive float-zone ($>10 \text{ k}\Omega$) silicon with a refractive index of 3.4 for the spectral range from 0.5 to 4.5 THz and an absorption of less than 0.01 cm^{-1} (between 0.2 and 2 THz /1) is very useful for THz lenses in front of photoconductive emitter and detector devices, beam splitter elements or for optics where a higher numerical aperture is needed. Nevertheless, the high refractive index difference between air and silicon leads to Fresnel reflection losses of more than 30% and disturbing signals are caused by reflections within the THz optics. These effects reduce the image and signal qualities significantly.

Broadband antireflection (AR) structures based on the moth eye principle can be used to overcome these problems. We generate structures of this type with ultrashort pulse lasers on silicon surfaces of various shapes. The short interaction time between the high power laser pulses (duration $<10 \text{ ps}$) and the material surface enables precise material ablation on a micrometer scale by a nearly direct solid-vapor transition. This method is also flexible, contactless and free of any chemicals.

1 Homogene AR-Strukturen auf einem Silizium-Wafer. | Homogeneous AR structures on a silicon wafer.

2 REM-Aufnahme einer strukturierten Silizium-Linse. | SEM image of a structured silicon lens.



flexibel, berührungslos und frei vom Einsatz zusätzlicher Chemikalien bisheriger Ätztechnologien.

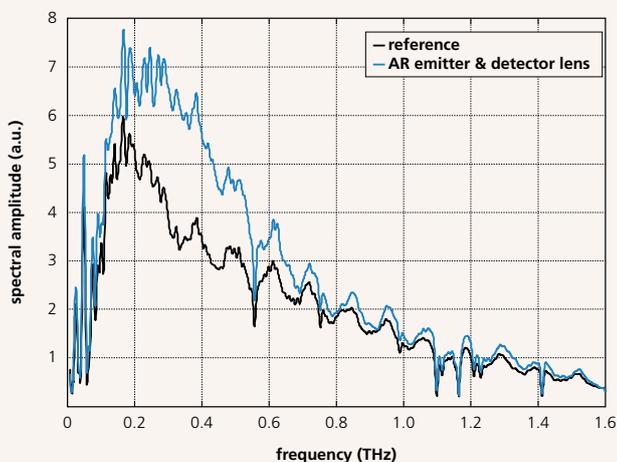
Im Ergebnis entstanden homogene Strukturen (Abb. 1) für ebene Siliziumflächen, die mit Perioden von 30 μm und Tiefen bis 180 μm den THz-Bereich von 0,1 bis 1,5 THz entspiegeln. Hierbei konnten die Reflexionsverluste für einzelne THz-Frequenzen bis zu 32% gemindert werden. Auch die Strukturierung von sphärischen Siliziumlinsen (Abb. 2) eines THz-Zeitbereichsspektroskopie (TDS)-Systems reduzierte die Systemverluste für einzelne THz-Frequenzen um bis zu 58% für den Spektralbereich von 0,25 bis 1,5 THz (vgl. Abb. 3) /2/.

Literatur / References

/1/ Dai, J.; Zhang, J.; Zhang, W.; Grischkowsky, D.: J. Opt. Soc. Am. B 21 (7), 1379–1386 (2004).

/2/ Brahm, A.; Döring, S.; Wilms, A.; Notni, G.; Nolte, S.; Tünnermann, A.: Appl. Opt. 53 (13), 2886–2891 (2014).

As a result, optimized homogeneous AR structures (fig. 1) for planar silicon surfaces were generated with a structural period of about 30 μm and depths of up to 180 μm . They provide an AR effect from 0.1 to 1.5 THz. The reflection losses of individual THz frequencies were decreased by up to 32%. In addition, AR structures on spherical silicon lenses (fig. 2) of both photoconductive emitter and detector devices in a time-domain spectroscopy (TDS) system were demonstrated and characterized. Here, single frequencies show an improvement of the spectral amplitude of up to 58% for the range from 0.25 to 1.5 THz (fig. 3) /2/.



3 Vergleich der THz-Spektren – unentspiegelter (schwarz) und entspiegelter (blau) THz-System. | Spectral comparison – reference system (black) and system with AR structures (blue).

AUTHORS

Anika Brahm^{1,2}

Sven Döring²

Stefan Nolte^{1,2}

Gunther Notni^{1,3}

¹Fraunhofer IOF

²Institut für Angewandte Physik,

Friedrich-Schiller-Universität Jena

³Fakultät für Maschinenbau – FG Qualitätssicherung und Industrielle Bildverarbeitung,

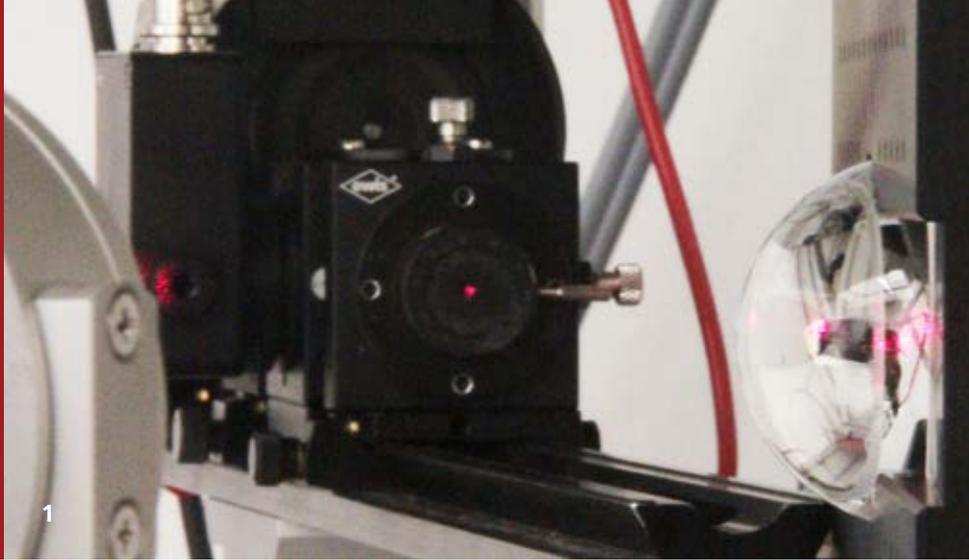
TU Ilmenau

CONTACT

Anika Brahm

Phone +49 3641 807-237

anika.brahm@iof.fraunhofer.de



ANALYSE GERINGSTER VERLUSTE VON OPTISCHEN SCHICHTEN ANALYSIS OF LOW LOSSES IN OPTICAL COATINGS

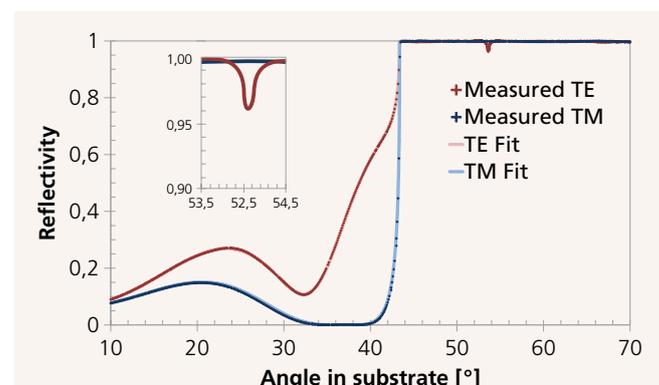
Die Messung geringster Verluste in optischen Schichten spielt eine wichtige Rolle bei der Entwicklung und Optimierung hochwertiger optische Dünnschichtsysteme. Sehr geringe Verluste ($\text{Im}[n] < 10^{-4}$) dünner Schichten können für übliche Dicken von optischen Schichten nicht mittels Spektralphotometrie bestimmt werden. Alternative Methoden, wie die Laserkalorimetrie oder die Messung der thermisch induzierten Lichtablenkung, erreichen Empfindlichkeiten bis zu $\text{Im}[n] \sim 10^{-8}$; allerdings sind dafür hohe Beleuchtungsintensitäten und komplexe Messaufbauten notwendig.

Ein Grund der reduzierten Empfindlichkeit von Reflexions- / Transmissionsmessungen ist der begrenzte Energieverlust bei der Wechselwirkung des Lichts mit der dünnen Probe. Dieser Energieeintrag kann deutlich gesteigert werden, indem die Wechselwirkungslänge des Lichts mit der Probe erhöht wird. Anstelle von »multi-pass« Anordnungen ist es möglich, an der Oberfläche geeigneter Proben geführte Leckmoden /1/ auszunutzen. Diese können große Ausbreitungslängen erreichen und werden auch für empfindliche Biosensoren eingesetzt /2/.

Im Experiment wird die Probe mit einer Laserdiode ($P \sim 10$ mW) über eine indexangepasste Halbkugel (Abb. 1) beleuchtet, um das gesamte Winkelspektrum im Substrat nutzen zu können. Die winkelaufgelöste Reflexion (Abb. 2) wird für beide Polari-

The analysis of low losses in optical coatings is of crucial importance to developing and improving high quality dielectric thin film stacks. Unfortunately, low losses ($\text{Im}[n] < 10^{-4}$) cannot be detected by spectrophotometry for common layer thicknesses of optical coatings. Methods such as thermal deflection spectroscopy or laser calorimetry enable a level of precision down to $\text{Im}[n] \sim 10^{-8}$, but involve high illumination intensity and experimental complexity.

One reason for the reduced sensitivity of reflection/ transmission experiments is the limited amount of energy lost



2 Winkelaufgelöste Reflexion gemessen mit TE und TM Polarisation. Die TE polarisierte Resonanz ist nochmals vergrößert dargestellt. | Angularly resolved reflectivity obtained for TE and TM polarized light. The inset shows the enlarged TE polarized resonance.

1 Goniometer mit Halbkugellinse zur Lichtkopplung bei großen Winkeln. | Goniometer set-up comprising half-ball lens coupling for large observation angles.

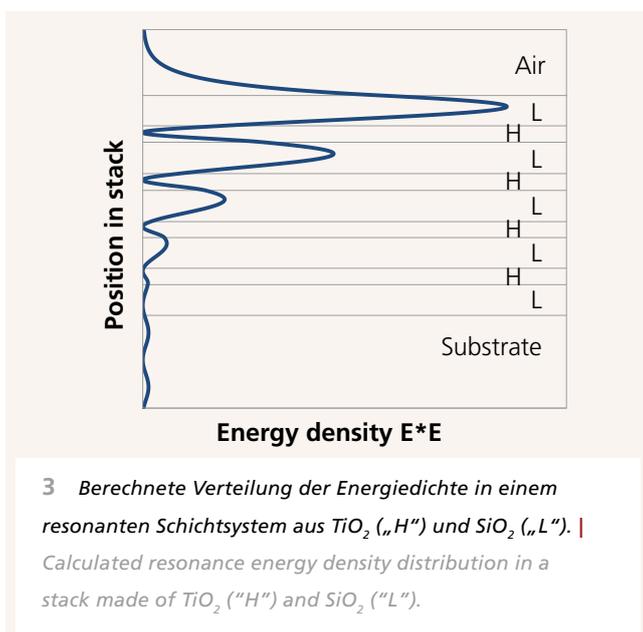
sationen so gemessen, dass die Breite und Tiefe der Leckwellenresonanz aufgelöst werden. Die Verluste können aus der Anpassung der gemessenen Reflexionsdaten abgeleitet werden; ein Vergleich mit externen Absorbieren ist ebenfalls möglich /3/. Abb. 2 veranschaulicht die Analyse eines Mehrschichtsystems aus $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$, bei dem für eine Wellenlänge von 660 nm $\text{Im}[n_{\text{SiO}_2}] \sim 6 \cdot 10^{-6}$ bestimmt wurde. Die Verteilung der Energiedichte im Schichtstapel (Abb. 3) verdeutlicht, dass dieses Ergebnis wenig durch die TiO_2 Absorption beeinflusst wird; allerdings sind mögliche Streuteile im gemessenen Verlust ebenfalls enthalten.

Literatur / References

- /1/ P. Yeh, A. Yariv, C.-S. Hong, J. Opt. Soc. Am. 67 (1977) 423-438.
/2/ R. Rizzo, N. Danz et al., Opt. Expr.22 (2014) 23202-23214.
/3/ F. Michelotti, A. Sinibaldi et al., Opt. Lett. 38 (2013) 616-618.

upon interaction with the sample. This energy input can be considerably increased by extending the interaction length of the probe beam with the sample. Instead of working with a multi-pass configuration, leaky modes guided at the surface of properly designed dielectric stacks /1/ are utilized. These yield long propagation lengths and are currently being used for sensitive label-free biochemical sensing /2/.

In the experiment, the sample is illuminated by a laser diode ($P \sim 10$ mW) via an index matched half-ball lens (fig. 1) to access the full angular range inside the substrate glass. Angularly resolved reflectivity is measured for both polarizations (fig. 2) to accurately resolve the depth and width of the surface wave's resonance. Losses can be identified by directly adapting the intensity distribution. An experimental cross check with external absorbers is also feasible /3/. Fig. 2 illustrates the analysis of a $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$ multilayer stack that yields $\text{Im}[n_{\text{SiO}_2}] \sim 6 \cdot 10^{-6}$ at 660 nm wavelength. As the intensity distribution indicates (fig. 3), this value is rather insensitive for TiO_2 absorption but may also be affected by scattering losses.



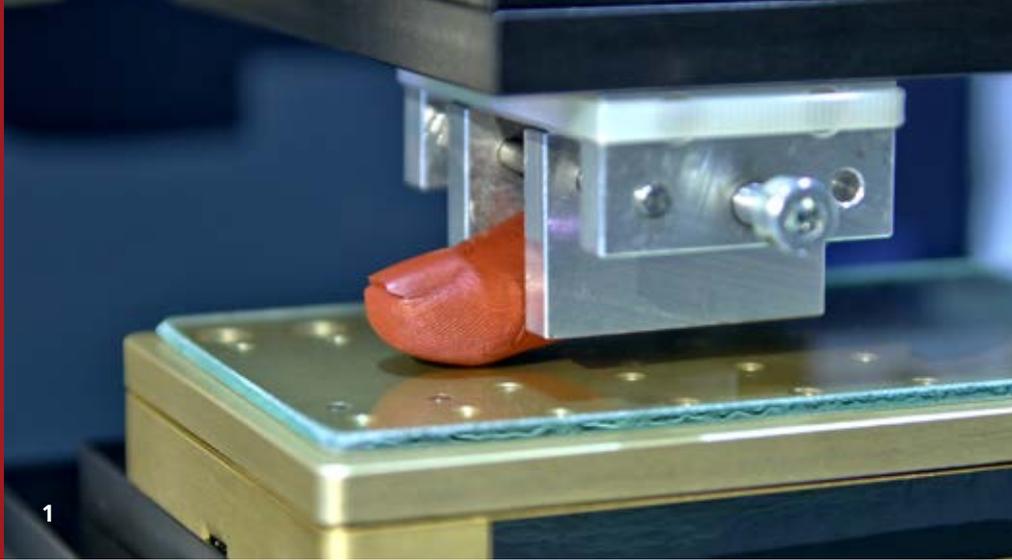
AUTHORS

Christoph Wächter
Riccardo Rizzo¹
Peter Munzert
Francesco Michelotti¹
Norbert Danz

¹ Sapienza Università di Roma, Italy

CONTACT

Dr. Norbert Danz
Phone +49 3641 807-750
norbert.danz@iof.fraunhofer.de



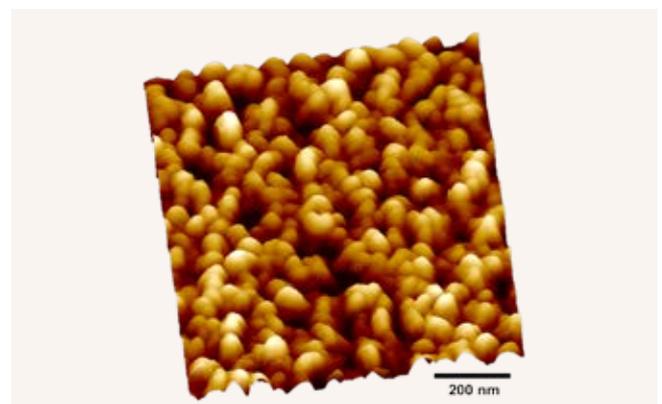
ABRIEBSTABILE OPTISCHE OBERFLÄCHEN MIT EINSTELLBARER BENETZUNG MECHANICALLY STABLE OPTICAL SURFACES WITH ADJUSTABLE WETTING PROPERTIES

Die Anforderungen an Glasoberflächen mit multifunktionalen Eigenschaften sind höchst komplex. Beispielsweise sollen diese ein extremes Benetzungsverhalten (Selbstreinigungs- oder Anti-Beschlag-Effekt), gleichzeitig aber auch ausgezeichnete optische Qualität aufweisen. Grundvoraussetzung für die Praxistauglichkeit derartiger Funktionselemente ist die Herstellung langzeitstabiler Oberflächen mittels kostengünstiger und einfacher Verfahren. Dies setzt eine gewisse mechanische Stabilität voraus, wobei bei dieser Forderung die Rauheitsstruktur eine entscheidende Rolle spielt /1/.

Am Fraunhofer IOF wurde nun eine effiziente Möglichkeit geschaffen, mit einem Sol-Gel-Tauchverfahren multifunktionale Schichtsysteme auf Glasoberflächen zu realisieren, die den o. g. Anforderungen gerecht werden /2/. Dabei handelt es sich um stochastisch nanoraue Al_2O_3 -Schichten, versehen mit einer SiO_2 -Schutzschicht. Die Nano-Rauheit der Al_2O_3 -Strukturen (Abb.2) lässt sich systematisch abtufen und somit das Benetzungsverhalten sowohl für Hydrophilie als auch – nach Aufbringen einer dünnen hydrophoben Deckschicht – für Hydrophobie kontrolliert einstellen /3/. Diese funktionale Wirkung ging bisher jedoch bereits bei geringer mechanischer Beanspruchung durch Abrieb der Strukturen verloren. Unsere Ergebnisse zeigen nun, dass das konforme Aufbringen einer dünnen schützenden SiO_2 -Schicht direkt auf die raue Al_2O_3 -Beschichtung deren Abriebstabilität

Glass surfaces with multifunctional properties have to satisfy various complex demands. This e.g. implies high optical quality in addition to an extreme wetting behavior (self-cleaning or anti-fog effects). Moreover, real-world applications of such functional components require that durable surfaces be manufactured by cost-efficient and easy-to-use technologies. The essential mechanical stability of these surfaces in particular concerns their functional roughness structures /1/.

Fraunhofer IOF has now established an efficient possibility of utilizing a sol-gel dip-coating process to realize multifunctional coating systems on glass surfaces which fulfill the above-mentioned demands /2/. These systems comprise nanorough Al_2O_3 -coatings covered by a thin protecting SiO_2 layer.



2 Nanostruktur der Sol-Gel-Schicht (AFM-Aufnahme). |
Nanostructure of the sol-gel coating (AFM image).

1 Abriebuntersuchung am Tribometer mit Kunstfinger. |
Mechanical wear test with artificial finger.

um ein Vielfaches erhöht, ohne die Funktionalität, d.h. das superhydrophobe bzw. superhydrophile Verhalten, zu beeinträchtigen (Abb. 3).

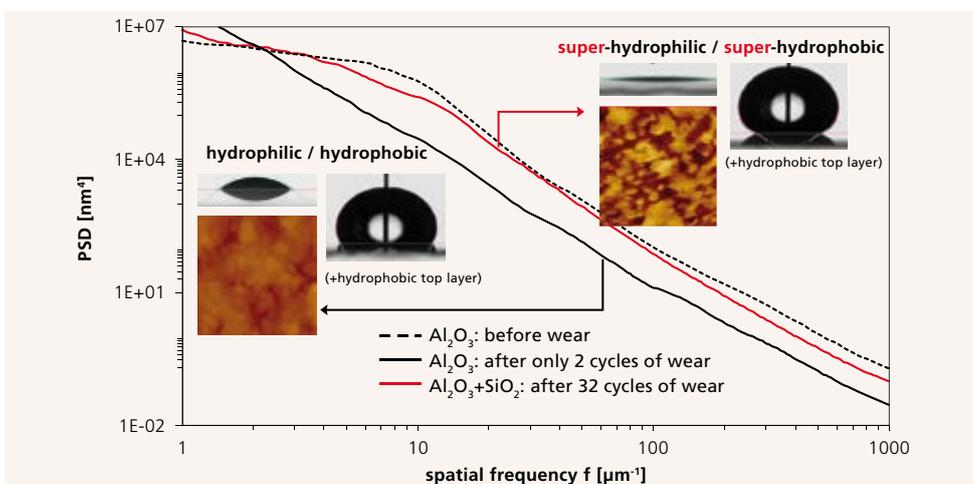
Die damit gegebenen Möglichkeiten der effizienten Herstellung optischer Oberflächen mit einstellbarer Benetzung und gleichzeitig gesteigerter Abriebstabilität stellen eine Schlüssel-funktion bei der Ressourceneinsparung (u. a. Reduktion der Belastung durch Reinigungsmittel) dar. Zudem können derartige Schichten für Untersuchungen von Zusammenhängen zwischen Struktur, Tribologie und Funktionalität dienen.

Literatur / References

- /1/ Duparré, A., Coriand, L.: Assessment Criteria for Superhydrophobic Surfaces with Stochastic Roughness, Mittal, K.L.: Advances in Contact Angle, Wettability and Adhesion, Scrivener Publishing LLC, 2013, 193-202.
/2/ Fraunhofer IOF, patent application DE102014112133.3
/3/ Felde, N, et al.: Functional Model Coatings With Graded Roughness, IOF Annual Report, 2013, 58-59.

The Al_2O_3 roughness structures (fig. 2) can be systematically graded, thus enabling adjustable wettability for both hydrophilicity and – after depositing a thin hydrophobic top layer – hydrophobicity /3/. The problem previously consisted in the mechanical instability of the Al_2O_3 nanostructures and, consequently, the loss of functionality after even low wear stress. As our results demonstrate, depositing a thin protective SiO_2 film onto the rough Al_2O_3 coating significantly enhances its wear resistance without negatively affecting functionality, i.e. the superhydrophobic or superhydrophilic behavior (fig. 3).

This enables an efficient fabrication of optical surfaces with adjustable wettability and high wear resistance at the same time. The new approach hence constitutes a main key for the conservation of resources (e. g. reduction of detergents). Moreover, such coatings also allow structural, tribological and functional surface properties to be related to each other.



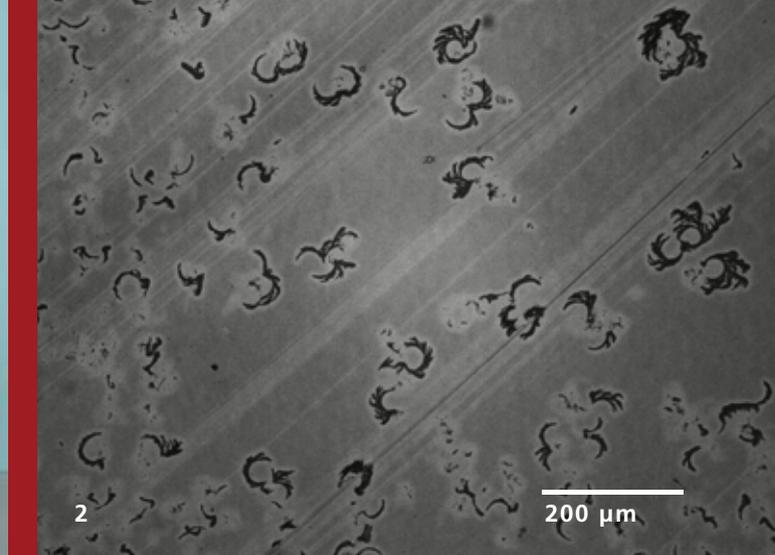
3 AFM-Aufnahmen und Rauheitsspektren (PSD) einer nanorauen Schichtoberfläche vor und nach Abrieb mit 1,5 N sowie Benetzungsverhalten. | AFM images and power spectral densities (PSD) of a nanorough coating before and after wear with a force of 1.5 N as well as its wettability.

AUTHORS

Nadja Felde
Luisa Coriand
Angela Duparré

CONTACT

Nadja Felde
Phone +49 3641 807-316
nadja.felde@iof.fraunhofer.de



EPOS – NANOSTRUKTURIERUNG VON POLY-CARBONAT FÜR AUTOMOBILANWENDUNGEN

EPOS – NANOSTRUCTURING OF POLYCARBONATE FOR AUTOMOTIVE APPLICATIONS

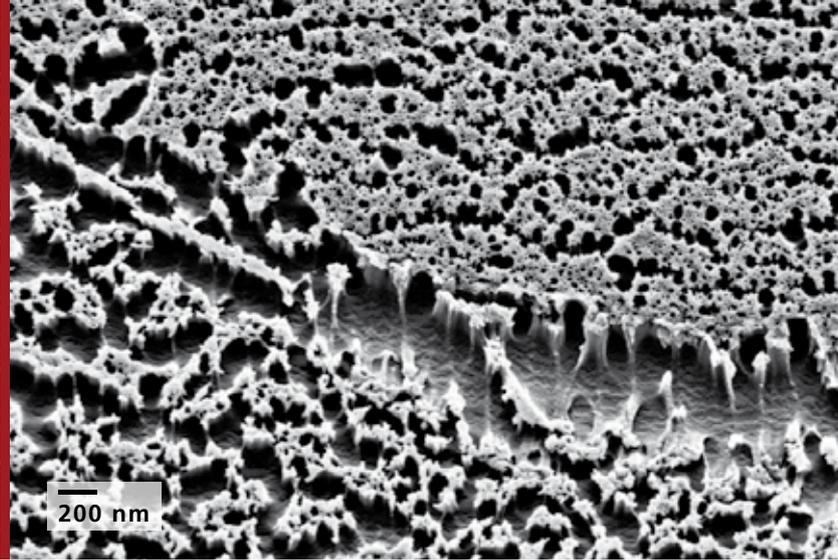
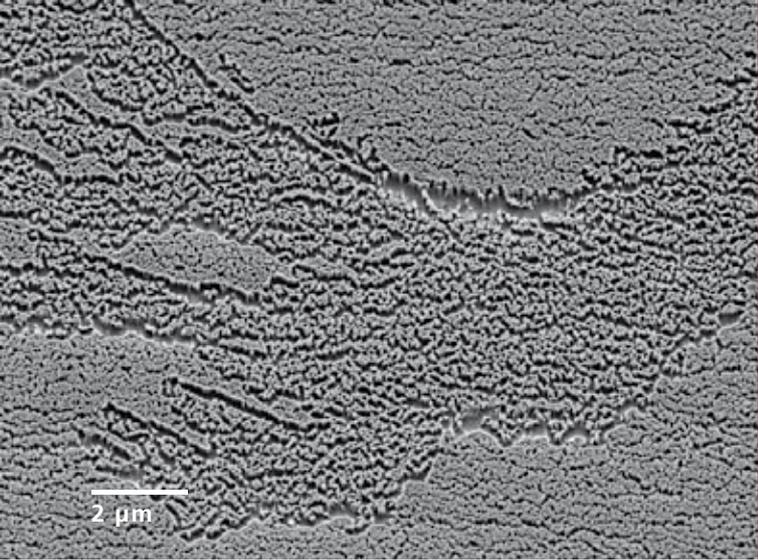
Aufgrund seiner außergewöhnlichen Bruchfestigkeit, der Temperaturstabilität bis 120 °C sowie seiner hohen Chemikalienbeständigkeit ist Polycarbonat (PC) das bevorzugte Material für alle Arten von transparenten Abdeckungen im Automobil. Störende Reflexionen auf solchen Abdeckungen könnten mit Antireflexbeschichtungen verringert werden (Abb.1), jedoch bestehen diese Beschichtungen auf PC in den meisten Fällen nicht die extremen Anforderungen der Automobilindustrie /1/. Besonders bei Tests, die wechselnde Umweltbedingungen simulieren, wie z.B. Temperaturschock-Zyklen, treten oft Risse und Schichtablösung auf /2/. Daher könnten Subwellenstrukturen, die einen Entspiegelungseffekt hervorrufen, eine Alternative bieten. Die selbstorganisierte Bildung stochastisch angeordneter Nanostrukturen durch Plasmaätzen wurde bereits in vielen Publikationen unserer Arbeitsgruppe beschrieben /3/. Dieser ARplas® genannte Strukturierungsprozess konnte bereits auf vielen verschiedenen Kunststoffoberflächen erfolgreich angewendet werden, bis jetzt aber noch nicht auf Polycarbonat. In Rahmen des BMBF-Verbundprojekts EPOS (Entspiegelung von Polycarbonat durch Schichten und Strukturen /4/) soll

The most convenient material for display covers in automobiles is polycarbonate (PC) due to its high breaking strength, temperature stability up to 120 °C and resistance to many chemicals. Since disturbing reflections deteriorate visibility, anti-reflection coatings may be highly beneficial for all kinds of display covers (fig. 1). In most cases, however, anti-reflection coatings on polycarbonate do not fulfill the harsh requirements of the automotive industry /1/. In particular, challenging environmental conditions such as temperature shock cycles lead to cracks and delamination of such coatings from the polymer /2/. Sub-wavelength nanostructures that can provide an anti-reflection effect could therefore be an alternative. The self-organized formation of stochastically arranged anti-reflective structures by plasma etching has already been described in many papers from our group /3/. This nanostructuring process, called ARplas®, has been successfully applied on many different polymers, but not to date on polycarbonate.

On a joint BMBF project entitled “EPOS” (antireflection of polycarbonate with coatings and nanostructures /4/), the aim is to transfer this plasma structuring technique to polycarbonate.

1 Instrumententafel eines AUDI A6 mit einer entspiegelten (rechts) und einer nicht entspiegelten (links) Abdeckscheibe aus Glas. | Demonstration dashboard of an AUDI A6 with an anti-reflective (right) and an uncoated (left) glass cover.

2 Defekte auf einer nanostrukturierten PC Oberfläche (Rasterelektronenmikroskop-Bilder) | Defects on a nanostructured PC surface (left image from optical microscope (SEM-image)).



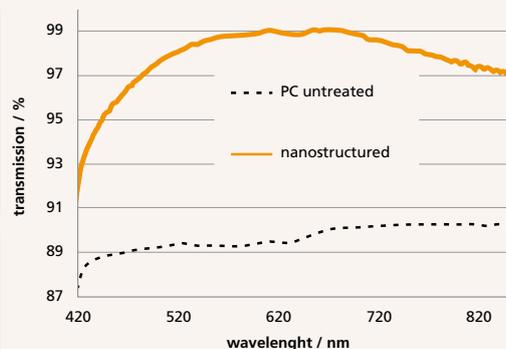
dieser Entspiegelungsprozess auf PC überführt werden. Es konnte bereits gezeigt werden, dass die Entstehung derartiger Strukturen mit einem guten Entspiegelungseffekt unter bestimmten Plasmabedingungen möglich ist.

Jedoch wurden auf strukturierten Proben Defekte sichtbar, die sich mittels Elektronenmikroskopie als laterale Unterschiede in der Strukturgeometrie herausstellten (Abb. 2). Es wurde nachgewiesen, dass lateral ungleichmäßig auf der PC-Oberfläche verteilte Ausblühungen bestehend aus Polymeradditiven für die ungünstige Strukturbildung verantwortlich sind. Experimente zur Vorreinigung der PC-Scheiben zeigten bei Verwendung von Ethanol als Reinigungsmittel Erfolg. Um diesen Reinigungsschritt vermeiden zu können, wurde eine Plasmavorbehandlung entwickelt, die unmittelbar vor der Strukturierung ohne Vakuumunterbrechung angewendet werden kann. Mit diesem Verfahren kann nunmehr eine homogen entspiegelte PC-Oberfläche erzeugt werden (Abb. 3).

It has already been demonstrated that nanostructure evolution is possible under certain plasma conditions, producing a satisfying anti-reflection effect. However, from microscopy investigations of the generated patterns on a PC sample, laterally distributed irregularities in the structure growth became obvious (fig. 2). It was shown that surface contamination affects the structure growth and that contaminants are not equally distributed on the sample surfaces. Pre-cleaning experiments of the samples showed success if ethanol was used as the cleaning agent. To avoid the need for an additional cleaning procedure, a short plasma treatment process that could be conducted together with the structure etching step in vacuum was successfully applied to achieve a homogeneously structured sample surface as shown in fig. 3.

References / Literatur

- /1/ C.C. Lee, J.C. Hsu, C.C. Jaing, "Optical coatings on polymethyl methacrylate and polycarbonate", Thin Solid Films 295, 122 (1997)
- /2/ J. Allen, A. Tregunna, "Antireflection coatings for plastic optics", J. Appl. Phys. 21, 92-95 (1988).
- /3/ U. Schulz, "Review of modern techniques to generate antireflective properties on thermoplastic polymers", Appl. Opt. 45 (2006) 1608–1618
- /4/ http://www.photonikforschung.de/fileadmin/Verbundsteckbriefe/8_Plasma/barrierefreie_Steckbriefe/6-bf-Psb_EPOS_Plasma-bf.pdf



3 Defektfrei nanostrukturierte PC Scheibe (Struktur nur auf der rechten Hälfte der Scheibe). | Defect-free nanostructured PC disk (structure only on the right half).

AUTHORS

Peter Munzert
Sylvelin Reinhard
Ulrike Schulz

CONTACT

Dr. Peter Munzert
Phone +49 3641 807-271
peter.munzert@iof.fraunhofer.de



UV-VERSTÄRKTE SILBERSCHICHTEN MIT EXZELLENTER UMWELTBESTÄNDIGKEIT

UV-ENHANCED AG COATINGS WITH EXCELLENT ENVIRONMENTAL STABILITY

Bei optischen Instrumenten (wie Teleskopen und Scannern) werden i.d.R. metallbeschichtete Spiegel eingesetzt. Sie bieten eine hohe Reflexion innerhalb einer großen spektralen Bandbreite.

Silber ist das Metall mit der höchsten Reflexion vom VIS- bis in den IR-Bereich, jedoch können Korrosionsprodukte wie Ag_2S und AgCl diese reduzieren. Deshalb werden Schutzschichten aus dielektrischen Materialien (SiO_2 , Al_2O_3 , etc.) aufgebracht, um Korrosion zu verhindern und die hohe Reflexion zu erhalten. Am Fraunhofer IOF durchgeführte Untersuchungen zeigen, dass die Abscheidung einer geschlossenen und dichten Schutzschicht eine notwendige aber nicht ausreichende Bedingung für einen effektiven Schutz von Silber ist: Hygroskopische Partikel, die Cl und/oder S enthalten, können in Kombination mit einer feuchten Umgebung auch Silberschichten mit zuvor fehlerfreien Schutzschichten schädigen [1].

Zum besseren Schutz von Silber wurde ein Mehrschichtansatz (Multilayeransatz) entwickelt. Dabei werden Schichtmaterialien mit bestimmten chemischen Beständigkeiten gegen die relevanten Kontaminationen kombiniert. Solche Mehrfach-Schutzsysteme bieten eine höhere spezifische Umweltbeständigkeit als jede der Einzelschichten, aus der das Schutzsystem besteht.

Mirrors with metal coatings are used in many optical instruments (such as telescopes and scanners), providing high reflectivity and a broad spectral bandwidth.

Silver has the highest reflectivity of all metals from VIS to IR, but corrosion products such as Ag_2S and AgCl can reduce this reflectivity. Protective layers of transparent dielectric materials such as SiO_2 , Al_2O_3 , etc. are therefore applied to prevent corrosion and preserve the high reflectivity of silver mirrors. Investigations performed at Fraunhofer IOF show that the deposition of a closed and dense protective layer is a necessary but insufficient condition for the effective protection of silver: hygroscopic particles containing Cl and/or S in combination with a humid environment can harm even silver coatings protected by a previously defect-free protective layer [1].

A multilayer approach was developed to improve protection of Ag, in which materials with specific chemical resistances to crucial contaminations are combined in the protective coating. These multilayer protection systems display better specific environmental stability than a single layer of any of the contained materials.

With an appropriate design, the multilayer protection can also operate as an optical interference coating with which the reflection can be adjusted. In the case of silver, it is advisable

1 UV-verstärkte Silberschichten mit exzellenter Umweltbeständigkeit auf Silizium- und Glas Substraten. |

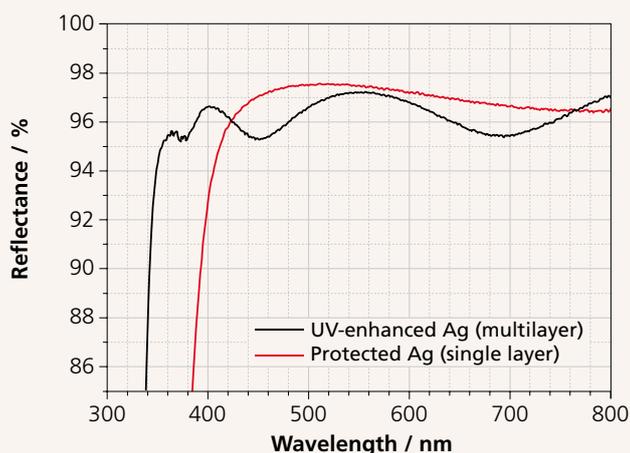
UV-enhanced Ag coatings with excellent environmental stability on silicon and glass substrates.

Multilayer-Schutzschichten wirken bei entsprechendem Design auch als Interferenzschichten, mit denen die Reflexion gezielt eingestellt werden kann. Bei Silber bietet es sich an, den starken Reflexionsabfall im UV auf Kosten der Reflexion im VIS zu kompensieren. Solche dielektrischen Systeme werden als UV-verstärkt bezeichnet. Abbildung 2 zeigt eine erhöhte Reflexion im spektralen Bereich von 350 – 450 nm (UV-enhanced) im Vergleich zum Schutz mit einer Einfachschicht (single layer). Diese erhöhte Reflexion wurde mit einem Multilayer-Schutzsystem erreicht, welches zugleich eine erheblich bessere Umweltbeständigkeit aufweist. Neben einer guten Beständigkeit gegenüber Feuchtigkeit, tiefen und hohen Temperaturen, besteht eine verbesserte Beständigkeit gegenüber hygroskopischen Partikeln, die Cl und/oder S enthalten.

to compensate the strong drop of reflectivity in the UV range at the expense of reflectivity in the VIS range. Such dielectric systems are known as UV enhanced systems. Fig. 2 shows a higher reflectivity in the spectral range of 350-450 nm (UV-enhanced) in comparison to a coating with a single protective layer. This enhanced reflectivity could be achieved due to a multilayer protective coating which at the same time provides considerably increased environmental stability. In addition to good resistance to moisture, low and high temperatures, improved resistance to hygroscopic particles with Cl and/or S was achieved.

References / Literatur

/1/ M. Schürmann, S. Schwinde, P. J. Jobst. HIGH-REFLECTIVE COATINGS FOR GROUND AND SPACE BASED APPLICATIONS; International Conference on Space Optics; Tenerife 2014.



2 Reflexion einer UV-verstärkten Silberschicht mit einem Multilayer-Schutzsystem (schwarze Kurve) im Vergleich mit konventionell geschütztem Silber mit einer Einfachschicht (rote Kurve) bei einem Einfallswinkel von 6° I/I. | Reflectance of UV-enhanced Ag with multilayer protective coating (black curve) in comparison with conventionally protected Ag with a single protective layer (red curve) at 6° angle of incidence I/I.

AUTHORS

Stefan Schwinde
Mark Schürmann
Norbert Kaiser

CONTACT

Stefan Schwinde
Phone +49 3641 807-297
stefan.schwinde@iof.fraunhofer.de



HOCHREFLEKTIERENDE BESCHICHTUNGEN FÜR DIE NÄCHSTE GENERATION DER LITHOGRAPHIE HIGH-REFLECTIVE COATINGS FOR NEXT-GENERATION LITHOGRAPHY

Die Entwicklung von Mo-Si Multilayer-Beschichtungen für die EUV-Lithographie, die bei einer Wellenlänge von 13,5 nm Spitzenreflektivitäten von bis zu 70% erreichen können, ist nahezu zur Sättigung gekommen. »Beyond EUV lithography (BEUVL)« (»jenseits der EUV-Lithographie«) bei einer Wellenlänge von 6,X nm hat ein sehr großes Potential, die EUVL unter den 11 nm - Knoten zu erweitern /1/. La-B Multilayer-Spiegel mit einer theoretischen Reflektivität von bis zu 79% bei 6,65 nm sind die vielversprechendsten Optiken für die nächste Generation der EUV-Lithographie. Allerdings sind La-B Spiegel im Vergleich zu konventionellen Mo-Si Spiegeln sehr schmalbandig /2/, was ein großes Hindernis in der Entwicklung der weiteren BEUVL darstellen kann. Um die B-basierten Spiegel zur industriellen Anwendung zu bringen, müssen Reflektivitäten von über 70% in naher Zukunft experimentell nachgewiesen werden. Mit LaN-B Multilayern wurde die derzeit höchste Reflektivität für nahezu senkrechten Lichteinfall von 64,0% bei 6,65 nm experimentell erreicht /3/.

In unserer Arbeit konzentrieren wir uns auf eine Untersuchung von B₄C-basierten Multilayer-Systemen: LaN-B₄C und La-B₄C mit und ohne Diffusionsbarrieren, um Reflexionen > 65% zu erreichen. Alle ausgewählten Systeme erreichen theoretische Reflektivitäten von bis zu 75% bei 6,65 nm Wellenlänge. Die untersuchten Multilayer sind am Fraunhofer IOF in einer industriellen Sputteranlage (Abb. 1) /4/ beschichtet und an der PTB in Berlin vermessen worden. Auch ohne vollständige Opti-

The development of Mo-Si multilayer coatings designed for the wavelength of 13.5 nm with high peak reflectance up to 70% for EUV lithography (EUVL) is close to saturation. Beyond EUV lithography (BEUVL) at 6.X nm wavelength has great potential to extend EUVL beyond the 11 nm node /1/. It is known that La-B multilayer mirrors with theoretical reflectance up to 79% @ 6.65 nm are the most promising reflective coatings for the next generation of EUVL. At the same time, it should be noted that La-B mirrors are extremely narrowband in comparison to conventional Mo-Si ones /2/, creating a formidable obstacle to further BEUVL development. To implement the B-based mirrors and enable their industrial application, an experimental reflectance of > 70% needs to be achieved in the near future. Currently, the highest reported experimental reflectance of 64.0% @ 6.65 nm was recently achieved on LaN-B multilayer coatings designed for near-normal incidence /3/.

In this study, we focused our interest on a comparative study of different B₄C-based multilayer systems: LaN-B₄C and La-B₄C with and without carbon diffusion barriers. In theory, all selected multilayers show maximum reflectivities of more than 75% at 6.65 nm. The studied multilayer mirrors were deposited by an industrial sputtering system (fig. 1) /4/ and measured by reflectometry at the PTB, Berlin. Maximum near-normal incidence reflectances of 51.1%, 58.1%, and 56.7% at a wavelength of 6.67 nm for La-B₄C, LaN-B₄C, and

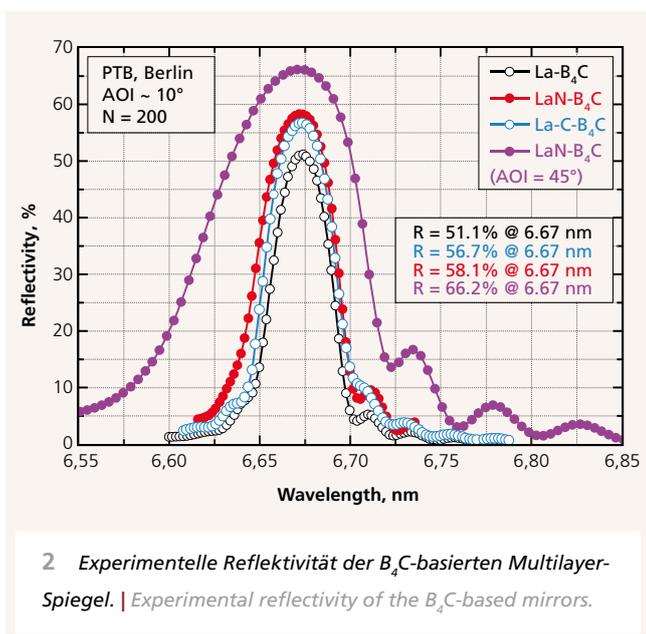
1 Magnetron sputtering system NESSY-3. | UNESSY-3 magnetron sputtering system.

mierung der Beschichtung konnten für nahezu senkrechten Lichteinfall Reflektivitäten von 51,1%, 58,1% und 56,7% bei 6,67 nm Wellenlänge für La-B₄C, LaN-B₄C, und La-C-B₄C Multilayer (Abb. 2) nachgewiesen werden. Eine merkliche Verbesserung auf 66,2% konnte mit LaN-B₄C Spiegeln für einen Einfallswinkel (AOI) von 45° erreicht werden. Hierbei wurden spektrale Bandbreiten von 0,05 nm und 0,094 nm für LaN-B₄C Spiegel bei nahezu senkrechtem bzw. streifendem (AOI = 10° bzw. 45°) Einfall gemessen.

La-C-B₄C multilayer mirrors was achieved without full optimization of multilayer designs and deposition parameters (fig. 2). A considerable reflectivity improvement to 66.2% can be achieved by using LaN-B₄C mirrors designed at an angle of incidence (AOI) of 45 degrees. Maximum spectral bandwidths of 0.05 nm and 0.094 nm are measured on LaN-B₄C multilayer mirrors designed at the near-normal (AOI = 10°) and grazing (AOI = 45°) incidences (Fig. 2), respectively.

References / Literatur

- /1/ Banine V. et al.: Next generation of EUV lithography: Challenges and opportunities: International Workshop on Extreme Ultraviolet Sources, Dublin, Ireland, Nov. 13 - 15, 2010.
- /2/ Yulin S. et al.: Reflective optics for next generation of lithography: Fraunhofer IOF Jahresbericht, 2011.
- /3/ Kuznetsov D. et al.: Controlling interface chemistry in 6 nm La/B multilayer optics: International Workshop on EUV and Soft X-Ray Sources, Dublin, Ireland, Nov. 3 - 6, 2014.
- /4/ Yulin S. et al.: New deposition system for high-precision XUV optics: Fraunhofer IOF Jahresbericht, 2013.

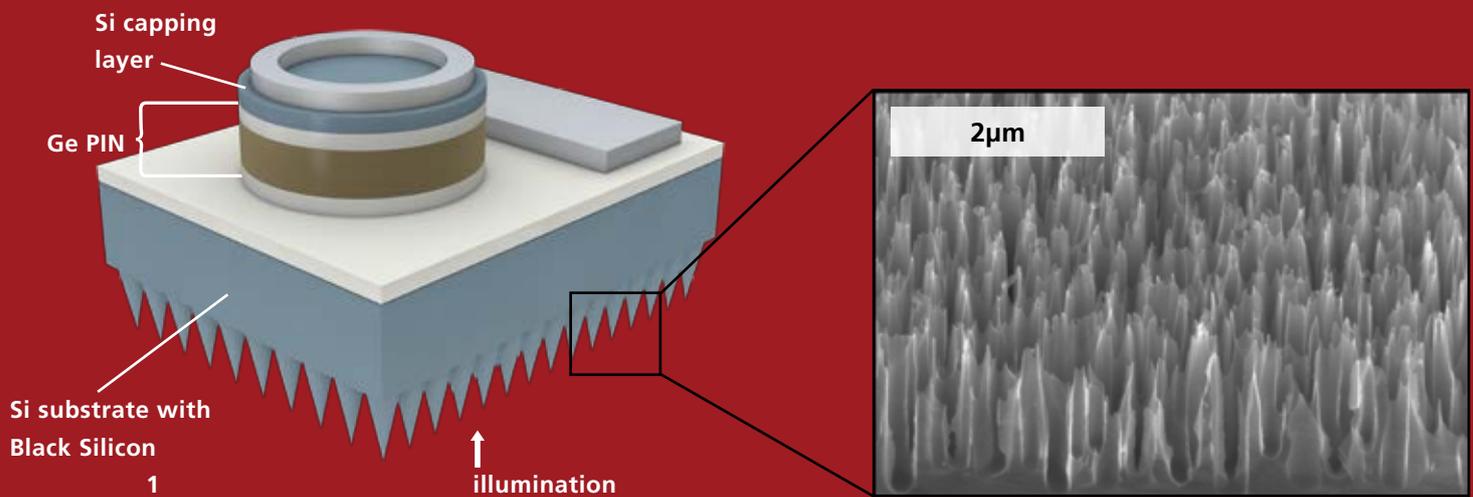


AUTHORS

Sergiy Yulin
Philipp Naujok
Norbert Kaiser

CONTACT

Dr. Sergiy Yulin
Phone +49 3641 807-241
sergiy.yulin@iof.fraunhofer.de



DURCH BLACK SILICON VERBESSERTE GE-ON-SI-PHOTODIODEN BLACK SILICON ENHANCED GE-ON-SI PHOTODIODES

Das Breitbandinternet ist ein entscheidender Wirtschaftsfaktor der modernen Wissensgesellschaft. Ein rascherer Ausbau der bestehenden Telekommunikations-Infrastruktur scheitert nicht zuletzt an verhältnismäßig hohen Investitionskosten. Kostengünstigere Photodioden zur Umwandlung der fasergeführten Lichtsignale in elektrische Signale würden maßgeblich zur Reduktion dieser beitragen.

Ein vielversprechendes Detektorkonzept stellen epitaktisch auf einem Silizium-Chip integrierte Germanium-Photodioden dar. Germanium ist jedoch nur schwach absorbierend im relevanten Spektralbereich von 1300 nm bis 1700 nm, sodass für eine hinreichende Photostromausbeute hohe Schichtdicken von einigen µm notwendig sind. Andererseits erfordert der Einsatz in schnellen Telekommunikationssystemen sehr hohe Detektorbandbreiten (> 10 GHz). Dies kann wiederum nur durch den Einsatz sehr dünner Germaniumschichten von wenigen 100 nm aufgrund der verkürzten Laufzeit der Photoladungsträger gewährleistet werden.

Die Anwendung von Black Silicon, einer nadelartigen, selbstorganisiert und damit kostengünstig herstellbaren Silizium-Nanostruktur, kann diesen Konflikt auflösen. Aufgebracht auf

Fast internet access is a crucial economic factor in the modern knowledge society, but increasing the speed of development in the existing telecommunication infrastructure is hampered by the prohibitively high investments costs. Cheaper photodiodes for the conversion of fiber-delivered light signals into electrical signals would significantly contribute to their reduction.

A promising detector concept is represented by germanium photodiodes epitaxially integrated on a silicon chip. Germanium, however, is only weakly absorbent in the relevant spectral range from 1300 nm to 1700 nm, thus necessitating high layer thicknesses of a few µm for a sufficient photocurrent yield. On the other hand, application in fast telecommunication systems requires very high detector bandwidths (> 10 GHz), which in turn can only be achieved by using thin germanium layers of a few 100 nm thickness due to the truncated photocarrier transit time.

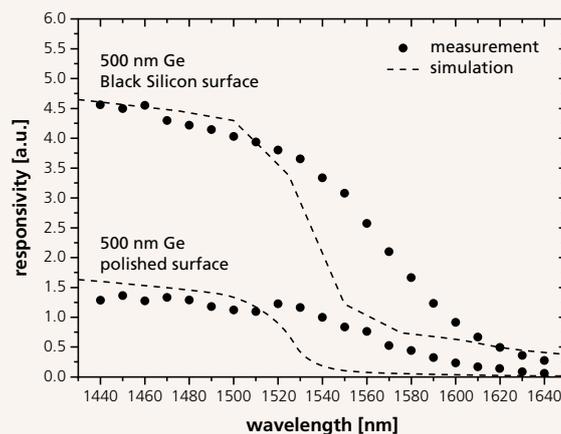
Application of black silicon, a needle-like, self-organized and thus affordably manufacturable silicon nanostructure, can solve this problem. Placed on the rear of the silicon chip – which is transparent in this wavelength range – a light-trap is

1 *Ge-on-Si-Detektorkonzept mit Black Silicon Lichtfalle zur Steigerung der intrinsischen Ge-Absorption. Auf dem Siliziumsubstrat befindet sich eine epitaktische Ge-PIN-Photodiode. Die Beleuchtung erfolgt über die Black-Silicon-strukturierte Rückseite des Bauelements. | Ge-on-Si detector concept with black silicon light-trapping for enhancement of intrinsic Ge absorption. An epitaxial Ge PIN photodiode is arranged on the silicon substrate. Illumination is performed over the black silicon-structured rear side of the device.*

der Rückseite des in diesem Spektralbereich transparenten Si-Chips wird eine Lichtfalle implementiert, welche die Lichtabsorption in dünnem Germanium stark erhöht (Abb. 1). Damit kann die Empfindlichkeit ultra-schneller Ge-on-Si-Detektoren mit Bandbreiten bis zu 100 GHz um einen Faktor 3 bis 10 gesteigert werden. Insbesondere treten bei diesem Lösungsansatz nicht die Probleme auf, die üblicherweise beim Einsatz von Siliziumnanostrukturen in der Optoelektronik beobachtet werden. Da die Photostromerzeugung im Germanium erfolgt, stellt die erhöhte Oberflächenrekombinationgeschwindigkeit der Si-Nanostruktur kein Hindernis dar. Theoretisch vorhergesagte Erhöhungen der Lichtabsorption durch das eingesetzte Black Silicon Lichtfallenkonzept lassen sich daher direkt in äquivalente Empfindlichkeitserhöhungen umsetzen (Abb. 2). Weiterhin kann die Herstellung des Black Silicon auf der Rückseite des Chips unproblematisch im Rahmen der Back-End-Fertigung erfolgen.

implemented that strongly increases light absorption in thin germanium (fig. 1). As a result, the responsivity of ultrafast Ge-on-Si detectors with bandwidths of up to 100 GHz can be increased by a factor of 3 to 10.

In particular, common problems that are related to the application of silicon nanostructures are circumvented with this approach. Since photocurrent generation takes place in the germanium, the raised surface recombination velocity of the silicon nanostructures imposes no drawback. Thus, theoretically predicted absorption enhancements by means of the applied black silicon light-trapping can be directly transferred into equivalent responsivity enhancements (fig. 2). Furthermore, the fabrication of black silicon can be carried out easily on the chip's rear during back-end processing.



2 Theoretisch vorhergesagte Absorptionssteigerung durch rückseitige Black Silicon Lichtfalle für eine Ge-Absorberdicke von 500 nm (gestrichelte Linie) und entsprechende, am Bauelement nachgewiesene Empfindlichkeitssteigerung (Punkte). Abweichungen im Bereich der Ge-Bandlücke um 1550 nm sind auf Verspannungen in der epitaktischen Ge-Schicht zurückzuführen. | Theoretically predicted absorption increase due to rear black silicon light-trapping for an absorber thickness of 500 nm (dashed lines) and corresponding responsivity increase proven at the device (dots). Deviations in the vicinity of the Ge bandgap around 1550 nm can be ascribed to strain in the epitaxial Ge layer.

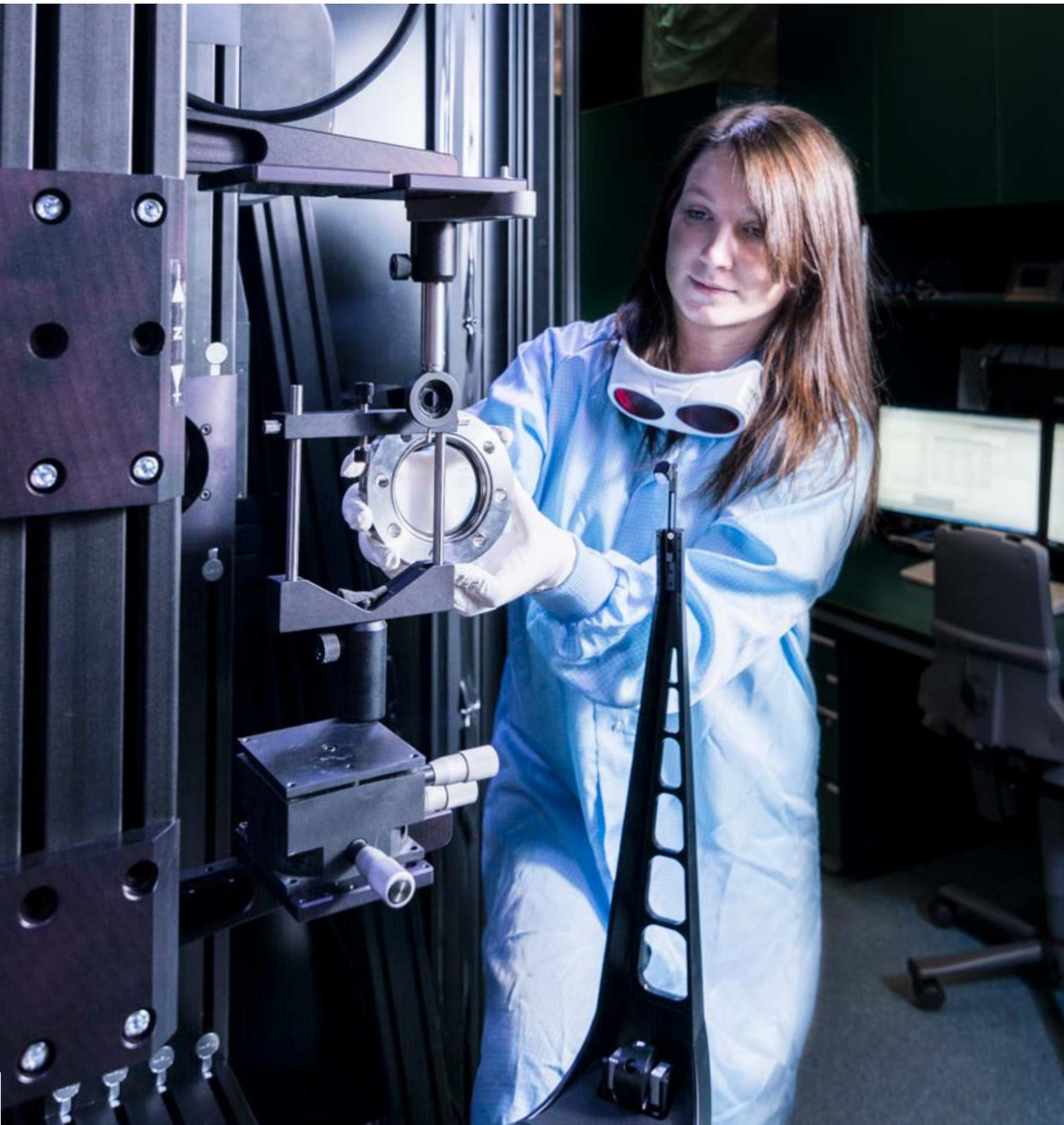
AUTHORS

Martin Steglich
Thomas Käsebier
Matthias Zilk
Frank Schrepel
Ernst-Bernhard Kley

CONTACT

Martin Steglich
Phone +49 3641 9-47838
martin.steglich@uni-jena.de

GESCHÄFTSFELD
BUSINESS FIELD



PHOTONISCHE SENSOREN UND MESSSYSTEME / PHOTONIC SENSORS AND MEASURING SYSTEMS

Das Fraunhofer IOF entwickelt optische und optoelektronische Mess- und Sensorsysteme. Die Forschungsarbeiten umfassen neuartige Messmethoden, Sensorprinzipien, Auswerteverfahren sowie Systemlösungen. Dazu nutzt das Fraunhofer IOF modernste optische und miniaturisierte bzw. mikrooptische Komponenten sowie Sendeeinheiten und Empfangseinheiten (z.B. flache und bidirektionale Sensoren), Projektionstechniken (Arrayprojektion, LCoS, OLED) und Lichtquellen (Femtosekunden-Laser, LEDs), in Verbindung mit integrierten Datenverarbeitungssystemen.

Einen Schwerpunkt bilden Muster- und Streifenprojektions-3D Messsysteme, die auf Basis von fs-Lasern, THz-Detektoren und CT-Systemen zu tomografischen Messverfahren erweitert werden. Systeme zur Schicht- und Oberflächencharakterisierung, darunter Streulichtmesssysteme zur Rauheitsbestimmung, Mikro- und Nanostrukturvermessung oder Defektdetektion und Schichtcharakterisierung bilden einen zweiten Schwerpunkt. Auf Basis bioinspirierter Facettenoptiken entwickelt das Fraunhofer IOF zudem revolutionär kompakte Kameras und Mikroskope.

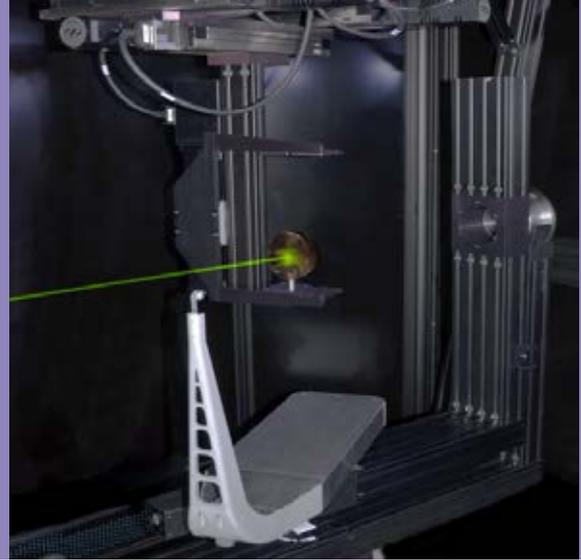
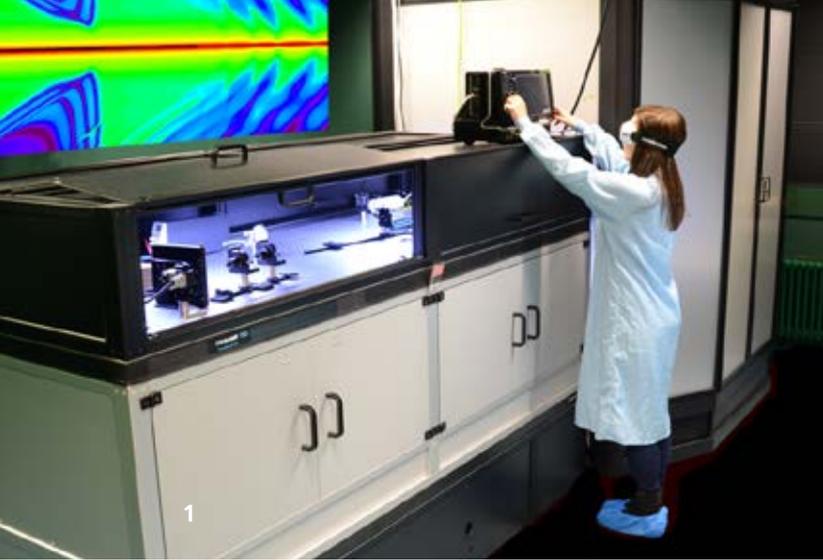
Viele der genannten Themen werden in den nachfolgenden Beiträgen behandelt, so die spektral- und winkelaufgelöste Streulichtmesstechnik, das flachste Mikroskop der Welt, ein unterwassertauglicher 3D Sensor, die 3D Messtechnik mit navigationsbasierter Positionsbestimmung, sowie die Zweispitzen-Nahfeldmikroskopie.

The Fraunhofer IOF develops optical and optoelectronic measurement and sensor systems. Research includes novel measuring methods, sensor principles, evaluation, and system solutions. The Fraunhofer IOF utilizes advanced and miniaturized or micro-optical components, as well as transmitter and receiver units (e.g. flat and bi-directional sensors), projection techniques (array projection, LCoS, OLED) and light sources (femtosecond lasers, LEDs), in combination with integrated data processing architectures.

One focus is on pattern and fringe projection 3D measurement systems and the inclusion of tomographic measurement methods on the basis of fs-lasers, THz detector and CT systems. An additional focal point are systems for coating and surface characterization, including light scattering based instruments for roughness determination, micro- and nano-structure measurement, and defect detection and characterization of optical coatings. On the basis of bio-inspired faceted optics, the Fraunhofer IOF also develops revolutionary compact cameras and microscopes.

Many of these issues are addressed in the subsequent contributions, such as spectral and angle resolved light scattering measurement techniques, the world's thinnest microscope, a submersible 3D Sensor, 3D measurement technologies with navigation-based positioning, as well as the Dual-SNOM technology.

LEFT *Vorbereitung einer optische Komponente für die Streulichtvermessung. | Preparation of an optical component for the light-scattering measurement.*



SPEKTRALE UND WINKELAUFGELÖSTE STREULICHTANALYSE SPECTRAL AND ANGLE RESOLVED LIGHT SCATTERING ANALYSIS

Die Kontrolle der Streulichteigenschaften optischer Komponenten ist der Schlüssel zum Erreichen höchster optischer Qualität und Leistungsfähigkeit. Dies erfordert insbesondere direkte Messungen bei den Anwendungswellenlängen /1/.

In den letzten Jahrzehnten wurde am Fraunhofer IOF eine Reihe von Systemen für hochsensitive winkelaufgelöste Streulichtmessungen (ARS) bei Wellenlängen vom tiefen und extremen UV über das Sichtbare bis in den IR Spektralbereich entwickelt. Diese werden vor allem in der optischen Industrie für Astronomie- und Lithographie-Anwendungen eingesetzt. Bisher waren diese Messungen allerdings auf diskrete Laserwellenlängen beschränkt. Jüngste Studien haben jedoch gezeigt, dass es für einige Anwendungen essentiell ist, Messungen nicht nur bei einzelnen Wellenlängen sondern über bestimmte Wellenlängenbereiche durchzuführen. Daher wurde ein neues System für spektrale und winkelaufgelöste Streulichtmessungen entwickelt (Abb. 1).

Das System basiert auf einer OPO-Lichtquelle, die ein kontinuierliches Durchstimmen der Wellenlänge im Bereich zwischen 225 nm und 1750 nm ermöglicht. Das hochsensitive System ermöglicht 3D ARS-Messungen bei beliebigen Einfallswinkeln. Die gewonnenen Daten, unter anderem die Bidirectional Scattering Distribution Function (BSDF), kann weiter analysiert werden, um weitere wichtige Parameter, wie etwa das Totale

Controlling the light scattering of optical components is key to achieving the highest optical quality and performance. This, in particular, requires direct measurements at the wavelengths of application /1/.

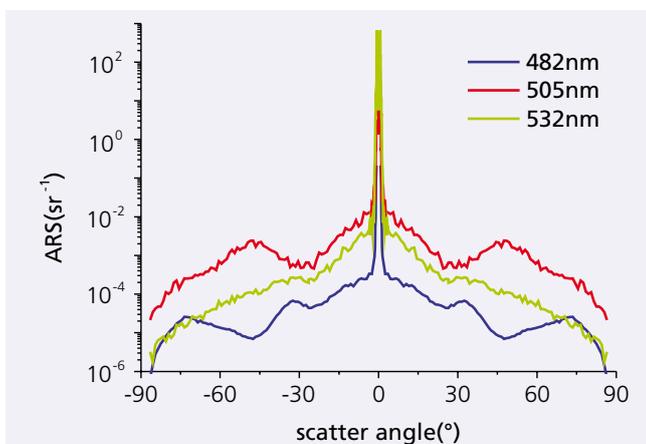
Over the past decades, both laboratory and table-top instruments for highly sensitive angle resolved scatter (ARS) measurements in the deep and extreme UV, visible and IR spectral regions have been developed at Fraunhofer IOF. They are used primarily in the optical manufacturing and coating industry for applications such as lithography and space optics. Yet to date, measurements had been restricted to certain laser wavelengths. Recent studies, however, have revealed that some applications demand measurements not only at single but over a whole range of wavelengths /2/. A new instrument for spectral scatter measurements has therefore been developed (fig. 1).

The instrument is based on an OPO light source which allows the incident wavelength to be tuned between 225 nm and 1750 nm. The highly sensitive scatterometer enables 3D ARS measurements to be performed at arbitrary angles of incidence. The resulting data, for example the Bidirectional Scattering Distribution Function (BSDF), can be further analyzed to determine important parameters such as the total scattering. The instrument is of crucial importance for new tasks ranging from the spectral characterization of

1 Instrument zur hochsensitiven winkelaufgelösten Streulichtmessung. | Instrument for highly sensitive spectral and angle resolved light scattering measurements.

Streulicht, zu bestimmen. Das System ist von hoher Bedeutung für neue Anwendungen wie die spektrale Charakterisierung von Interferenzfiltern und der Defekterkennung auf optischen Oberflächen bis hin zur Analyse von Pathogenen in biomedizinischen Anwendungen.

Die Ergebnisse von Untersuchungen an einem Rugatefilter für 532 nm sind in Abb. 2 dargestellt. Das totale Streulicht, berechnet durch Integration der ARS-Kurven, steigt dramatisch von 0,1% bei der Zentralwellenlänge 532 nm auf mehr als 2% an der Bandgrenze bei 505 nm. Diese Effekte wurden bisher vernachlässigt, können jedoch einen kritischen Einfluss insbesondere bei Anwendungen mit Breitbandstrahlung oder bei thermischen Shifts in Interferenzfiltern haben. Mit dem neuen Messsystem haben wir nun die Möglichkeit, solche und andere spektrale Streulichteffekte genauer zu untersuchen. Dies ist eine wichtige Basis für die Entwicklung neuer optischer Komponenten mit höchster Leistungsfähigkeit.



2 Resonante Streulichterhöhungen an der Bandkante eines Rugatefilters (siehe Text). | Resonant scatter enhancements at the band edge of a Rugate filter.

optical interference filters and the detection of defects on optical surfaces to the analysis of pathogens in biomedical applications.

The results of an investigation of a Rugate filter for 532 nm are shown in fig. 2. The total scatter loss, calculated by integrating the ARS curves, increases dramatically from 0.1% at the center wavelength of 532 nm to more than 2% at the edge of the reflection band at 505 nm. This effect has been overlooked so far, but may have a significant impact on applications involving broadband radiation or thermal and environmental spectral shifts of interference filters. With the new instrumentation, we now have the capability to investigate these and other spectral scattering effects in detail. This is an important basis for the development of new optical components with the highest performance.

References / Literatur

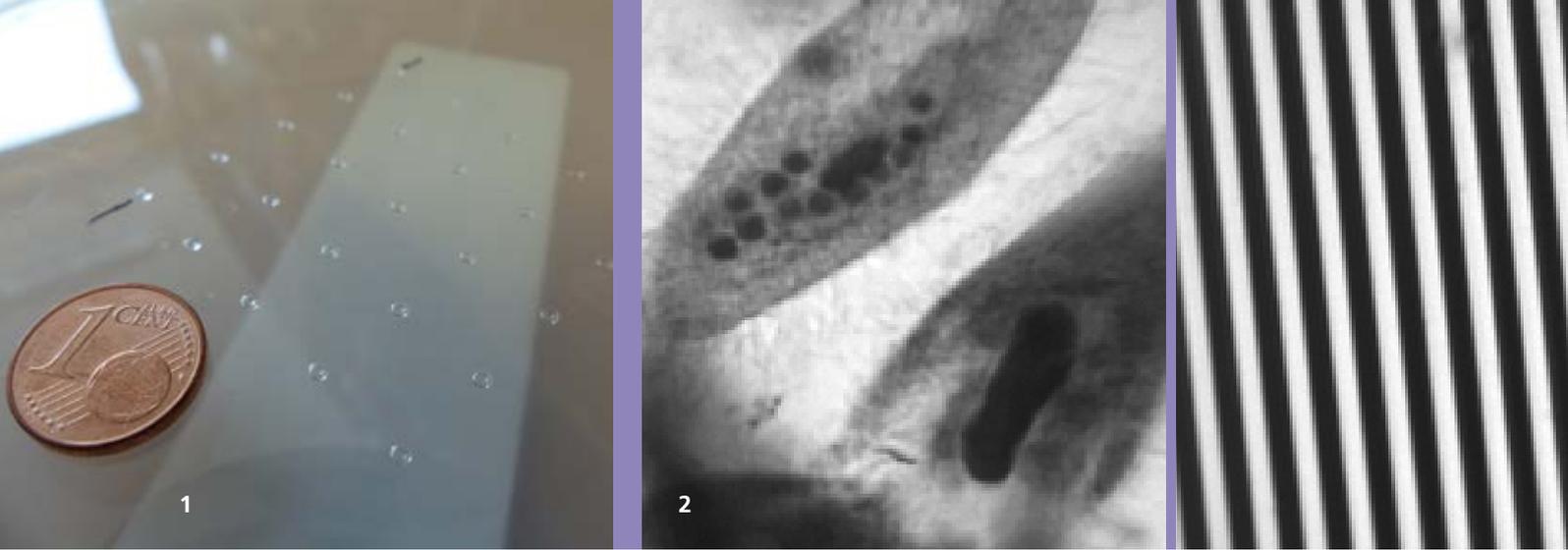
- /1/ S. Schröder, M. Trost, T. Herffurth, A. von Finck and A. Duparré, Adv. Opt. Techn. 3 (2014).
- /2/ S. Schröder, D. Unglaub, M. Trost, X. Cheng, J. Zhang and A. Duparré, Appl. Opt. 53, A35-A41 (2014).

AUTHORS

Sven Schröder
Marcus Trost
Alexander von Finck
Angela Duparré

CONTACT

Dr. Sven Schröder
Phone +49 3641 807-232
sven.schroeder@iof.fraunhofer.de



FLACHBAUENDES ARRAY-MIKROSKOP MIT HOHEM AUFLÖSUNGSVERMÖGEN THIN ARRAY MICROSCOPE WITH HIGH OPTICAL RESOLUTION

Mikroskope sind ein unverzichtbares Hilfsmittel zur Betrachtung feinsten Strukturen, welche mit dem bloßen Auge nicht wahrnehmbar sind. Durch die wachsende Zahl von Lab-on-a-chip Lösungen für die Vor-Ort-Diagnostik besteht ein großes Interesse daran, die durch ein Mikroskop erreichbare hohe Strukturauflösung mit der schnellen Erfassung einer möglichst großen Fläche innerhalb eines kompakten Systemaufbaus zu kombinieren. Zusätzlich erfordert die für das Anwendungsfeld angestrebte hohe Marktdurchdringung kostengünstige Fertigungsmethoden.

Entgegen konventionellen Systemen verfügt das Array-Mikroskop über eine Vielzahl von nebeneinander angeordneten Abbildungskanälen, welche jeweils einen Teilbereich des Objektes vergrößert abbilden. Ein in einem Laboraufbau realisiertes System erreicht mit einer numerischen Apertur von 0,3 und einer 10-fachen optischen Vergrößerung eine Ortsauflösung von $1,1 \mu\text{m}$, wobei die optische Baulänge des Array-Mikroskops nur 11,8 mm beträgt. Die Abbildung jedes Kanals erfolgt durch drei Mikrolinsen (Abb. 1). Die Herstellung der Linsen-Arrays erfolgt durch einen Step & Repeat UV-Abformungsprozess eines Einzellinsenwerkzeuges, der bei großem Produktionsvolumen niedrige Stückkosten ermöglicht.

Die laterale Ausdehnung der Abbildungsoptik ist prinzipiell nicht begrenzt, sodass sich entsprechend vorhandener Bild-

Microscopes are an indispensable tool for viewing extremely fine structures which are not visible to the naked eye. Due to the growing number of lab-on-a-chip solutions for on-the-spot diagnostics, there is great interest in combining the high resolution of a microscope with the fast capture of large areas in a compact system design. In addition, a high market penetration in the application field requires cost-effective production methods.

Contrary to conventional systems, the array microscope has a large number of neighbouring imaging channels, where each channel conveys a part of the overall object field. A laboratory setup achieved a spatial resolution of $1.1 \mu\text{m}$ using a numerical aperture of 0.3 and a 10x optical magnification. The geometrical length of the array microscope is only 11.8 mm. The imaging system of each channel consists of three micro lenses (fig. 1). The lens array is produced via a step & repeat UV-molding process of a single lens tool. This technology enables low unit costs in large production volumes.

The lateral extension of the imaging optics is in principle unlimited, so that large object surfaces can be captured according to existing image sensor formats. Corresponding to the optical magnification, the images generated by the channels are larger than the corresponding object area,

1 Foto eines Mikrolinsenarrays für den Laboraufbau. | Photography of a microlens array for laboratory setup.
2 Bildaufnahmen mit Durchlichtbeleuchtung: Pantoffeltierchen (links), Liniengitter mit 120 LP/mm (rechts). |
Images acquired with backside illumination: paramecium (left), line grid with 120 line pairs per mm (right).

sensorformate große Objektflächen erfassen lassen. Aufgrund der optischen Vergrößerung sind die durch die Kanäle generierten Einzelbilder größer als der zugehörige Objektbereich, wodurch das Objekt erst mit mehreren lateral versetzten Bildaufnahmen vollständig erfasst werden kann.

Das bisher umgesetzte optische Design ist für einen schmalen Spektralbereich um eine Wellenlänge von 580 nm optimiert. Durch die Nutzung verschiedener Polymere für die Mikrolinsen kann jedoch auch eine Verringerung der Farbfehler und damit die Abbildung des gesamten visuellen Spektralbereichs erreicht werden.

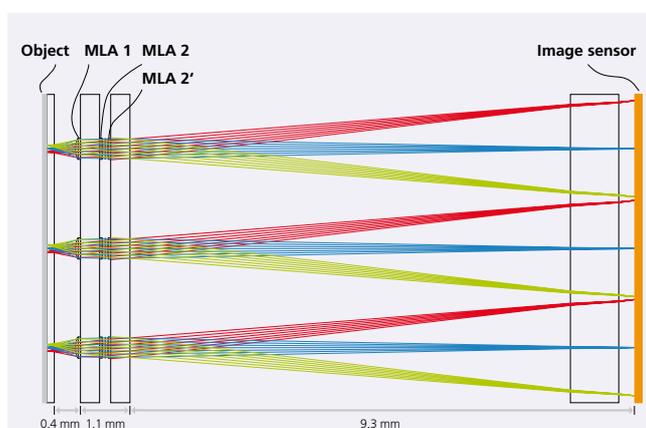
Weitere Simulationsergebnisse zeigen, dass mit sechs Linsen eine über den visuellen Spektralbereich nahezu beugungsbegrenzte Abbildung mit einer numerischen Apertur von 0,5 und einer Ortsauflösung von ca. 700 nm erreicht werden kann.

Das Konzept des Array-Mikroskops bietet damit eine leistungsfähige, kostengünstige und hochkompakte Produktlösung, beispielsweise für den Einsatz in der Medizin zur viralen Erkrankungsdiagnostik.

meaning that the whole object can only be captured with multiple laterally displaced images.

The previously described optical design is optimized for a narrow spectral range around a wavelength of 580 nm. We have also shown that a reduction of chromatic aberration is possible with the use of different polymers for the micro lenses, which allows imaging of the visible spectral range. Other simulation results show that six lenses allow nearly diffraction-limited imaging of the full visible spectral range up to a numerical aperture of 0.5, resulting in a spatial resolution of about 700 nm.

The concept of the array microscope provides a powerful, cost-effective and highly compact product solution, such as for application in medicine for viral disease diagnosis.



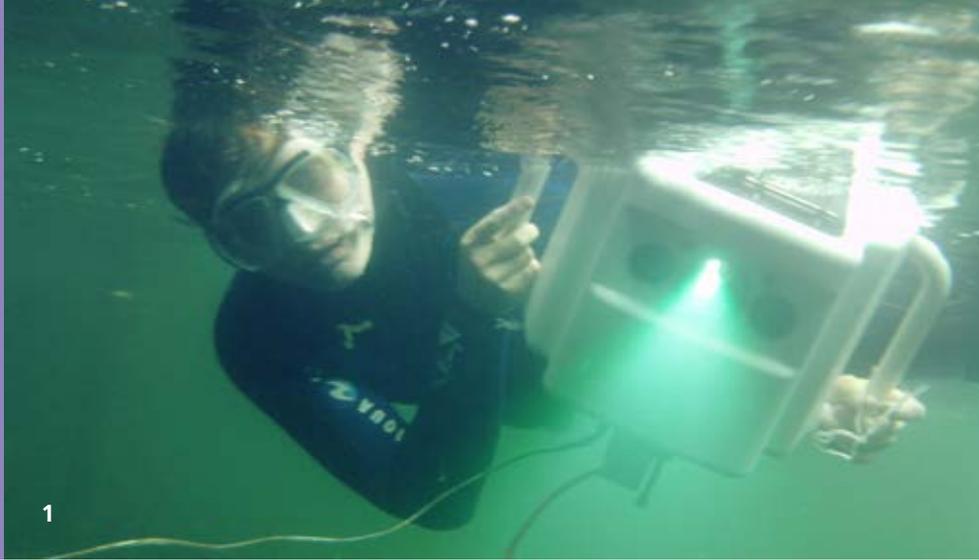
3 Schematische Darstellung von drei optischen Kanälen. |
Schematic layout of three optical channels.

AUTHORS

Tobias Hermeyer
Andreas Brückner
Andreas Reimann
Frank Wippermann
Andreas Bräuer

CONTACT

Dr. Andreas Brückner
Phone +49 3641 807-421
andreas.brueckner@iof.fraunhofer.de



HANDSCANNER FÜR DIE 3D-OBERFLÄCHENERFASSUNG UNTER WASSER

HANDHELD UNDERWATER 3D SCANNER

Streifenprojektionsbasierte 3D-Sensoren als handgeführte, mobile Messgeräte gewinnen immer größere Bedeutung. Ein bisher kaum erschlossenes Anwendungsgebiet ist die Vermessung unter Wasser. Mögliche Aufgabenfelder sind hier die Dokumentation versunkener Objekte wie z.B. Schiffsteile, die Vermessung der Oberfläche von Rohrleitungssystemen oder auch die Vermessung biologischer Objekte.

Am Fraunhofer IOF wurde ein neuartiger Handscanner für die 3D-Oberflächenerfassung entwickelt, der sowohl für den Außeneinsatz unter widrigen Witterungsbedingungen (Spritzwasser, starker Wind, ungünstige Lichtverhältnisse) als auch für den Unterwassereinsatz geeignet ist. Die optischen Komponenten des Sensors sind zwei Kameras und ein Projektor. Der Sensor deckt Messfelder von ca. 280 mm x 210 mm (über) und ca. 210 x 160 mm unter Wasser ab. Die laterale Auflösung im Objektraum beträgt ca. 175 μm (über) und ca. 130 μm unter Wasser. Der Sensor wiegt ca. 10 kg und ist für Tauchtiefen bis 30 m ausgelegt. Das Gehäuse wurde in einem 3D-Druckverfahren aus Kunststoffpulver hergestellt. Die Messzeit für einen 3D-Scan beträgt ca. 200 ms. Der Steuer- und Auswerterechner ist in das Gehäuse integriert. Ein Display auf der Gehäuserückseite realisiert die grafische Darstellung der aktuellen Messwerte und ermöglicht dem Bediener eine Echtzeitbewertung der Ergebnislage bereits während der Messwertaufnahme unter Wasser.

Aufgrund der optischen Eigenschaften des Mediums Wasser verändern sich die inneren und äußeren Kameraparameter

3D sensors based on the fringe projection technique as handheld, mobile measurement devices are increasing in importance. A weakly developed application field is the underwater use of such equipment. Possible applications are the documentation of sunken objects such as boat parts, the surface characterization of pipeline systems, or even the measurement of biological objects.

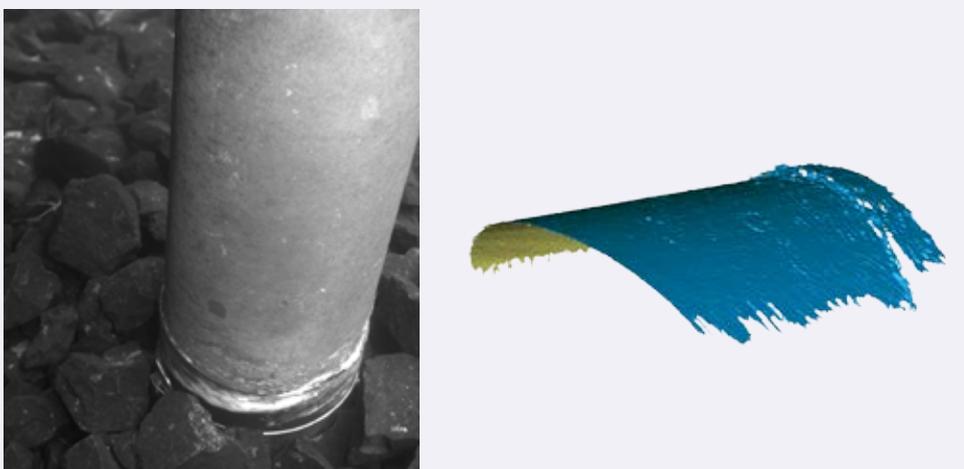
At the Fraunhofer IOF, a new, handheld 3D surface scanner was developed which is also suitable for outdoor use under harsh environmental conditions such as splashing water, strong wind, bad illumination conditions and for the underwater use. The optical components of the sensor are two cameras and one projector. The measurement field is about 280 mm x 210 mm in air and about 210 x 160 mm under water. The lateral resolution is approximately 175 μm and 130 μm , respectively. The weight of the scanner is some 10 kg and the maximum diving depth is 30 m. The housing was made of synthetic powder using a 3D printing technique. The measurement time for one scan is 200 ms. The computer for measurement control and data analysis is integrated into the housing of the scanner. A display on the backside graphically shows the results of each measurement for a real-time evaluation of the user during the recording of the measurement data.

Due to the optical properties of the media water, the intrinsic and extrinsic camera parameters are different in application under water and in use outside water (in air). An adapted calibration methodology was developed for underwater

1 *Handscanner bei Tauchgang. | Underwater scanner in action.*

des Sensors beim Unterwassereinsatz im Vergleich zur Anwendung über Wasser. Für den Unterwassereinsatz wurde ein angepasstes Kalibrierverfahren entwickelt. Dabei werden die inneren und äußeren Kameraparameter aus der Über-Wasser-Kalibrierung geschätzt und durch wenige Kontrollmessungen unter Wasser korrigiert. Erste Untersuchungen dienten der Bestimmung der erreichbaren Messgenauigkeit über und unter Wasser sowie der Überprüfung des neuen Kalibrierverfahrens für den Unterwasser-Einsatz an ausgewählten Prüfkörpern. Des Weiteren wurde die Vollständigkeit der Messwerterfassung an weiteren Messobjekten überprüft. Die Standardabweichung der 3D-Messpunkte auf den Oberflächen betrug bei den Luftmessungen zwischen 10 und 25 μm und bei den Unterwasser-Messungen zwischen 15 und 50 μm .

use. Initially, the intrinsic and extrinsic parameters of the air calibration were modified according to the law of refraction. These new parameters of the underwater calibration were corrected using a few evaluation measurements under water. Measurements of selected specimens were performed in order to obtain values for the determination of the accuracy and the noise of the 3D measurement data over and under water and evaluation of the underwater calibration procedure. Additionally, the completeness of the measurement value acquisition was checked using several measurement objects. The standard deviation of the 3D measurement points was between 10 and 25 μm in air and between 15 and 50 μm under water.



2 *Unterwassermessung eines Rohrs: Foto (links), 3D-Darstellung (rechts). |
Underwater measurement of a pipe: photograph (left), 3D representation (right).*

AUTHORS

Matthias Heinze
Christian Bräuer-Burchardt
Ingo Schmidt
Peter Kühmstedt
Gunther Notni

CONTACT

Matthias Heinze
Phone +49 3641 807-215
matthias.heinze@
iof.fraunhofer.de

1



2



NAVIGATIONSBASIERTE AUTOMATISCHE MULTI-VIEW-3D-MESSUNG NAVIGATION-BASED AUTOMATIC MULTI-VIEW 3D MEASUREMENT

Streifenprojektionsbasierte, portable 3D Scanner mit niedriger Messunsicherheit sind ideal geeignet, um die dreidimensionale Form von Objekten in ihrer natürlichen Umgebung zu erfassen. Das NavOScan /1/ Projekt, finanziert von der EU, entwickelte eine Zusatz-Einheit für solche 3D Scanner, um automatisch die einzelnen Teilansichten zusammzusetzen. Dazu kommt eine robuste Sensor-Posen-Schätzung (Position und Orientierung) und 3D-Daten Ausrichtung zum Einsatz. In Abbildung 2 ist die Navigationseinheit, welche direkt am 3D Sensor befestigt ist, abgebildet.

Die Navigationseinheit schätzt kontinuierlich die aktuelle Sensor-Pose. Dazu kombiniert sie Daten eines hochauflösenden Inertialnavigationssystems (IMU) und eines Bildsensors mit erweitertem Kontrastumfang (HDR) und Weitwinkeloptik. Während die IMU genaue Bewegungsschätzungen bei schneller Scanner-Bewegung liefert, unterstützt der optische Sensor die Genauigkeit der Posenschätzung bei längeren Scan-Aufnahmen.

Beide Sensor-Datenströme werden fusioniert, um ständig aktuelle Sensor-Posen-Schätzung verfügbar zu haben. Die inertielle Navigation nutzt einen erweiterten Kalman-Filter, um die Sensorpose samt Geschwindigkeit und den systematischen Fehler des Gyroskops und des Beschleunigungssensors zu schätzen.

Fringe projection-based portable 3D scanners with low measurement uncertainty are ideally suited to capturing the 3D shape of objects directly within their natural environment. The NavOScan /1/ project, funded by the European Community, developed an add-on unit for structured light 3D scanners to automatically align the individual scans based on robust sensor pose (position and orientation) estimation and 3D data matching. The NavOScan approach employs a navigation unit directly attached to the 3D sensor (fig. 2).

The navigation unit continuously estimates the current sensor pose by combining data from a high-definition inertial measurement unit (IMU) and a high dynamic range (HDR) imaging sensor with a wide-angle lens. The IMU provides accurate motion estimates during fast scanner movement, whereas the imaging sensor maintains the accuracy of the estimated pose during extended scanning.

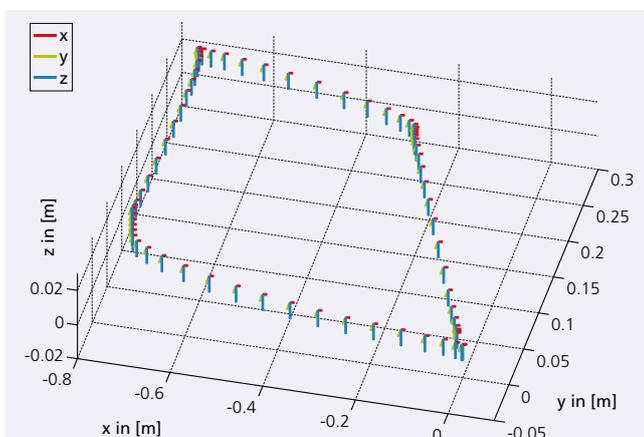
Both sensor data streams are fused to continuously provide sensor pose estimations. The inertial navigation uses an extended Kalman filter to estimate six degrees of freedom pose, including the velocity and the bias of the gyro and the acceleration sensor. The visual navigation is based on monocular key frame based simultaneous localization and mapping /2/.

1 3D Scans einer Gips-Statue. | 3D scanning examples of plaster bust.

2 Handhabung des NavOScan Navigationseinheit-Prototyps (montiert auf dem Fraunhofer IOF "kolibri CORDLESS" 3D Scanner). | Handling of the NavOScan navigation unit prototype (mounted on the Fraunhofer IOF "kolibri CORDLESS" 3D scanner).

Die optische Navigation beruht auf monokularer, Key-Frame basierter, gleichzeitiger Lokalisierung und Abbildung /2/. In Abbildung 3 ist das Ergebnis der Posenschätzung bei einer rechteckigen Bewegung mit Schleifenschluss dargestellt. Die Pfadlänge beträgt ca. 1500 mm. Der Fehler nach Schleifenschluss beträgt 16 mm RMS für die Position und 0.2° RMS für die Orientierungsmessung.

Die Sensor-Posen-Schätzung der Navigationseinheit wird als Startlösung zur Ausrichtung der 3D Punktwolke der aktuellen Ansicht relativ zu den überlappenden Bereichen vergangener Ansichten mittels eines Standard-Algorithmus /3/ genutzt. Aus allen Scans wird ein komplettes 3D Modell des Messobjekts in Echtzeit erzeugt und angezeigt. Diese Darstellung, zusammen mit weiteren Qualitätskriterien, dient als Nutzerführung zur leichten und effizienten Scandurchführung.



3 *Positionsbestimmung unter Nutzung von kombinierten visuellen und inertialen Messungen mit Schleifenschluss. | Visual inertial position measurement with loop closure.*

Fig. 3 shows the result of the visual inertial measurement with a rectangular motion and a loop closure. The trail length is approximately 1500 mm. The error after the loop closure measures 16 mm RMS for the position and 0.2° RMS for the orientation measurement.

The sensor pose estimation from the navigation unit is used as a starting solution for 3D point cloud matching of the current versus overlapping parts of previous scans using a standard algorithm /3/. From all the scans, a complete 3D model of the current object is assembled and presented to the user in real time. This, together with other quality criteria, serves as real-time user guidance to easily and efficiently complete a given scanning task.

References / Literatur

- /1/ Kleiner, B.: NavOScan project homepage. 2014. <http://www.navoscan.eu>.
- /2/ Klein, G.; Murray, D.: "Parallel tracking and mapping for small AR workspaces" 2007 ISMAR 2007, pp. 225–34.
- /3/ Besl, P.J.; McKay, H.D.: "A method for registration of 3D shapes," IEEE Trans. Pattern Anal. Machine Intell. 1992, 14, pp. 239–56.

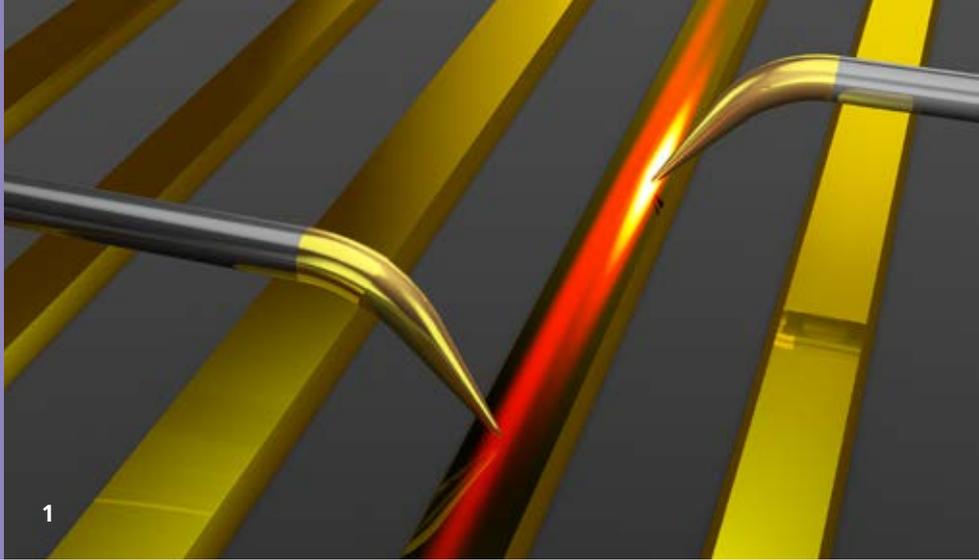
AUTHORS

Christoph Munkelt
Peter Kühmstedt
Gunther Notni
Bernhard Kleiner¹

¹ Fraunhofer IPA, Stuttgart

CONTACT

Dr. Christoph Munkelt
Phone +49 3641 807-245
christoph.munkelt@iof.fraunhofer.de



ZWEISPITZEN-NAHFELDMIKROSKOPIE AN NANOOPTISCHEN BAUELEMENTEN DUAL-SNOM CHARACTERIZATION OF NANO-OPTICAL DEVICES

Durch photonische Schaltkreise können Informationen potentiell schneller verarbeitet werden als in den heute gängigen mikroelektronischen Schaltkreisen. Photonische Schaltkreise setzen sich aus mikro- und nanooptischen Bauelementen zusammen. Da eine kompakte Bauweise angestrebt wird, bieten sich plasmonische Bauelemente an, in denen stark lokalisierte Anregungen auftreten.

Zur Charakterisierung solcher plasmonischer Bauelemente wird optische Rasternahfeldmikroskopie (SNOM, scanning near-field optical microscopy) eingesetzt. Als Rastersonde dient eine dünn ausgezogene, metallbeschichtete optische Faser. Die Metallbeschichtung weist an der Spitze eine winzige Apertur auf, deren Durchmesser meist zwischen 50 nm und 200 nm beträgt. Durch die Nahfelder an der Apertur kann die untersuchte Struktur entweder lokal angeregt werden, oder sie wird aus dem Fernfeld beleuchtet, während die Spitze lokal Licht sammelt. Im Gegensatz zur konventionellen Mikroskopie können durch SNOM die an der Probenoberfläche lokalisierten optischen Nahfelder abgebildet werden, und die Auflösung ist prinzipiell nicht begrenzt. Üblicherweise erfolgt bei der SNOM-Charakterisierung entweder die Beleuchtung oder die Detektion im Fernfeld mit durch Beugung begrenzter Auflösung.

Es ist uns gelungen, zwei Rasternahfeldmikroskope mit Faser-
spitzen zu einem Zweispitzen-SNOM zu kombinieren, sodass

Information can potentially be processed faster in photonic circuits than in current electronic microchips. Nano-optical plasmonic devices are the building blocks of compact photonic circuits due to their ability to localize light within small volumes. Microscopically characterizing such devices requires a method which can map the near-fields that are localized at the sample surface and which surpasses the diffraction limit of resolution.

In scanning near-field optical microscopy (SNOM), a sharp, metal-coated tip fabricated from a tapered optical fiber is scanned along the sample surface. The metal coating features a small aperture at the apex. The aperture diameter is chosen between 50 nm and 200 nm in most cases. The sample can either be locally excited by the aperture's near-field, or the sample is illuminated from the far-field while the tip serves to locally collect light.

Usually, either the illumination or the collection is carried out in the far-field and with diffraction-limited resolution, thus hampering the characterization of plasmonic devices. We succeeded in combining two SNOMs with fiber tips into a dual-SNOM setup. Here, the samples can be near-field illuminated at a freely chosen position by the first tip, while the second tip scans the sample surface and maps the optical near-fields /1/. A specially developed approach-warning mechanism serves to prevent collisions between the tips /2/.

1 Die beiden Aperturspitzen eines Zweispitzen-Nahfeldmikroskops auf einem Goldstreifenwellenleiter (künstlerische Darstellung). | The two tips of a dual-SNOM on a gold strip waveguide (artist's view).

Proben durch die erste Spitze an beliebiger Position aus dem Nahfeld angeregt werden können, während die zweite Spitze die Probenoberfläche abrastert und die optischen Nahfelder abbildet /1/. Dabei werden Kollisionen beider Spitzen durch ein eigens entwickeltes Abstandswarnsystem /2/ verhindert.

Mit dem Zweispitzen-SNOM wurden plasmonische Leckmoden in Goldstreifen-Wellenleitern verschiedener Breite untersucht. Durch Variation der Anregungsposition war es möglich, die relativen Anregungsstärken einzelner Moden zu steuern. Es ist außerdem möglich, die Polarisation der Anregung zu steuern und einzelne Polarisationsanteile des optischen Nahfelds abzubilden /1/. Durch die Möglichkeit, Moden lokal und selektiv anzuregen und gleichzeitig deren Nahfelder abzubilden, eröffnet das Zweispitzen-SNOM vielfältige Möglichkeiten zur Charakterisierung verschiedener nano- und mikrooptischer Bauteile und Strukturen. Insbesondere bei der Untersuchung von Transport- und Kopplungsphänomenen bietet die gleichzeitige Nahfeldanregung und -detektion Vorteile gegenüber Fernfeldtechniken, die nur eine begrenzte Auflösung bieten.

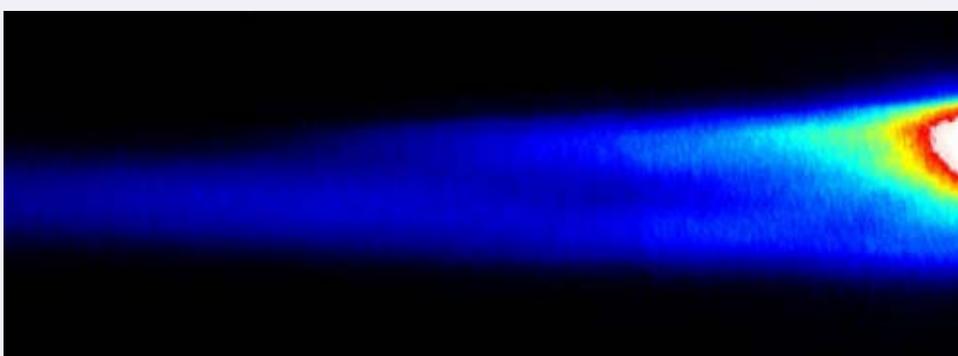
The dual-SNOM was used to investigate plasmonic leaky modes in gold strip waveguides. Mode beating patterns were observed in waveguides which support several leaky modes. By varying the excitation position, the relative excitation strengths of the different modes could be finely tuned.

The capability to selectively and locally excite modes and map their optical near-fields at the same time makes the dual-SNOM a valuable and versatile tool for the characterization of a wide range of micro- and nano-optical devices and structures. In particular, coupling and transport phenomena can be advantageously investigated via simultaneous near-field excitation and near-field detection with subwavelength resolution.

References / Literatur

/1/ A. E. Klein, N. Janunts, M. Steinert, A. Tünnermann, and T. Pertsch, *Nano Lett.* 14, 5010 (2014).

/2/ A. E. Klein, N. Janunts, A. Tünnermann, and T. Pertsch, *Appl. Phys. B* 108, 737 (2012).



2 Zweispitzen-SNOM-Aufnahme eines Goldstreifenwellenleiters (Breite: 2.5 μm, Lichtwellenlänge: 663 nm). Die Anregungsspitze befindet sich in der Nähe des linken Bildrands. |
Dual-SNOM image of a gold strip waveguide (width: 2.5 μm, light wavelength: 663 nm).
The illumination tip is near the left edge of the image.

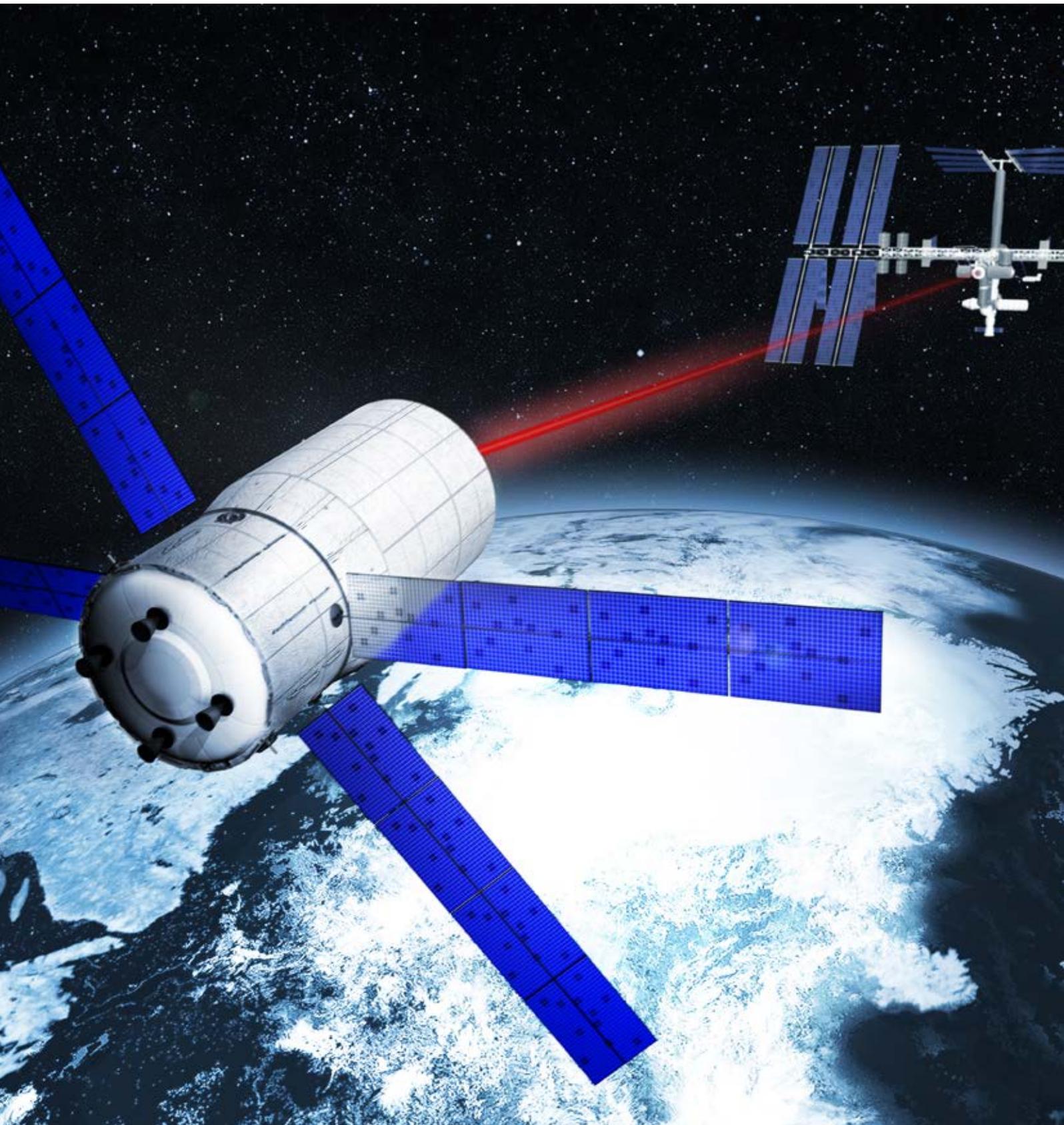
AUTHORS

Angela E. Klein
Norik Janunts
Thomas Pertsch

CONTACT

Angela E. Klein
Phone +49 3641 9-47845
angela.klein@uni-jena.de

GESCHÄFTSFELD
BUSINESS FIELD



LASERTECHNIK

LASER TECHNOLOGY

In dem Geschäftsfeld Lasertechnik werden neuartige Hochleistungsfaserlaser sowie Prozesse zur Laser-Mikro-Materialbearbeitung entwickelt. Arbeitsschwerpunkte sind die Leistungskalierung beugungsbegrenzter Faserlaser im Multi-Kilowatt-Bereich, die Erschließung des gesamten optischen Spektrums vom EUV bis zu THz durch nichtlinear-optische Techniken, die Erzeugung ultrakurzer Attosekundenimpulse in Faserlasern sowie die Führung und Formung von Laserstrahlung höchster Leistung und Intensität. Zudem führt das Fraunhofer IOF Untersuchungen zur Laser-Materie-Wechselwirkung ultrakurzer Pulse durch und entwickelt aus den Ergebnissen Lasermaterialbearbeitungsprozesse.

Sowohl in der Faserlaserentwicklung als auch in der Ultrakurzpuls-Präzisionsbearbeitung gehört das Fraunhofer IOF zu den forschungstärksten Instituten mit globaler Sichtbarkeit und zahlreichen technologischen Alleinstellungsmerkmalen. Durch die systematische Optimierung von aktiven Faserpreformen auf die speziellen Bedürfnisse der eigenentwickelten Faserlaser wird das Fraunhofer IOF erstmals in die Lage versetzt, Multi-Kilowatt-Laserquellen monolithisch aufzubauen. Durch den Zuwachs an Robustheit qualifizieren sich diese Hochleistungslaser sowohl für Anwendungen in extremen Umgebungen, wie z.B. dem Weltraum, als auch als wirtschaftliche Prozessquellen hoher Verfügbarkeit für die im Hause entwickelten industriellen Strukturierungs- und Materialbearbeitungstechniken.

Novel high performance fiber lasers, as well as processes for laser micro-machining are developed in the laser technology business field. Areas of expertise include the power scaling of diffraction limited fiber lasers into the multi-kilowatt range, the coverage of the complete optical spectrum from the EUV to THz by nonlinear optical methods, the generation of ultra short pulses down to attosecond pulse durations, and the guiding and shaping of pulses with extreme power and intensity. The Fraunhofer IOF also conducts research on laser-matter interaction of ultrashort pulses and derives industrial solutions that utilize ultrashort pulse laser material processing.

In fiber laser development as well as precision machining using ultra-short laser pulses the Fraunhofer IOF is among the global leaders in research and defines the technological state of the art. By systematically optimizing active fiber preforms and the development of in-house drawing capabilities it is now able to breach the kilowatt limit for monolithic fiber lasers. The resulting growth in robustness and reduction in footprint make these lasers suitable for novel applications in extreme environments, e.g. in the aerospace industry, and triggers cross-pollination effects, where ultra-short pulse laser material processing strategies become more reliable and economical, opening new markets to the laser industry as a whole.

LEFT Erprobung von Faserlaser für Rendezvous und Docking im Weltraum. | Testing fiber laser for rendezvous and docking in space.



FASERLASER FÜR RENDEZVOUS UND DOCKING FIBER LASER FOR RENDEZVOUS AND DOCKING

Ein Grund für den weltweiten Erfolg der Telekommunikation mittels Glasfaser liegt in der Tatsache, dass das Signal direkt in der Faser verstärkt werden kann. Für gewöhnlich wird das Signallicht in modernen Telekommunikationsnetzwerken in Erbium-dotierten Glasfasern verstärkt. Neben den laseraktiven Fasern existiert für fast jedes klassische optische Bauelement (z.B. Spiegel) ein faseroptisches Pendant. Aufgrund der lichtführenden Eigenschaft der Faser sind faseroptische Komponenten hochgradig mechanisch robust und können außerdem mit jeder anderen Faser nahezu verlustfrei und ohne Justageaufwand verbunden werden.

Die Vorteile solcher faseroptisch-integrierten Komponenten wurden nun genutzt, um einen Laser zu entwickeln, welcher an die extremen Bedingungen des Weltraums angepasst wurde. Dazu zählt nicht nur die hohe physische Belastung (Vibration und Schock) während des Starts der Trägerrakete, sondern auch eine besonders hohe Gamma-Strahlungsbelastung am Einsatzort, dem niedrigen Erdorbit. Der Faserlaser selbst ist Bestandteil eines Sensor-Prototyps des Thüringer Raumfahrtunternehmens Jena-Optronik GmbH, der zum 3D-Scannen von Objekten im Weltraum eingesetzt werden soll. Dazu werden sehr kurze Laserpulse (nur wenige milliardstel einer Sekunde) an verschiedene Positionen im Raum

One reason for the success of global communication using optical glass fibers is the possibility of signal light amplification directly within the fiber. For IR-B (C-band) emissions around $1,55 \mu\text{m}$ wavelength, which are commonly used in telecommunication networks, these amplifier fibers consist of erbium-doped fused silica. Apart from these active fibers, almost every component known in traditional optics (e.g. mirrors) has a fiber-optical counterpart. Due to the very nature of light guidance in fibers, these components feature a high degree of mechanical stability and can be spliced to form a monolithic, alignment free laser setup.

These advantages have been used to develop a laser which is adapted to the extreme conditions inherent in space applications. In addition to mechanical stresses such as vibrations and shock during carrier rocket lift-off, power and cooling restrictions, high gamma and particle radiation are challenges in the design of the fiber laser for its operating site, the low Earth orbit. As a part of a new sensor type, developed by the space company Jena-Optronik GmbH, the fiber laser is dimensioned for scanning objects in space within the km range and at cm resolution. For this purpose, the fiber laser generates two short ns pulses, one reference and one main pulse. The main laser pulse has a peak power

1 *Live-Verfolgung des ATV-5 Docking Manövers bei der Jena-Optronik GmbH (Foto: Lutz Prager, OTZ).* |

Live stream of the ATV-5 docking maneuver at Jena-Optronik GmbH (photo: Lutz Prager, OTZ).

2 *Qualifizierter Kurzpuls-Faserlaser für LIDAR Anwendungen.* |

Space-qualified short-pulse fiber laser for LIDAR applications.

geschossen. Falls sich ein Objekt an einer dieser Positionen befindet, wird ein Teil der Strahlung an den Scanner zurück reflektiert. Obwohl das ausgesendete Licht sehr schnell ist, braucht es trotzdem eine gewisse Zeit, um vom Laser zum Objekt und wieder zurück zu gelangen. Diese Pulslaufzeit kann dann in eine Distanz und so in ein echtes 3D-Bild umgerechnet werden. Live getestet wurde der Jena-Optronik 3D-Sensor mit dem Fraunhofer-IOF Faserlaser erstmals während des Andockmanövers des letzten von der ESA ausgestatteten Versorgungstransporters (ATV-5) an die Internationale Raumstation ISS am 12. August 2014.

of up to 5 kW and is sent to a defined position in space. If the pulse comes into contact with an object, a part of its energy will be scattered back to the sensor. The time of flight between reference and back-scattered pulse can now be translated into a distance. By repeating this procedure for different spatial directions and at pulse repetition frequencies between 25-150 kHz, a 3D image can be generated in less than a second. The new sensor developed by Jena-Optronik GmbH, including the Fraunhofer IOF fiber laser, was successfully tested during the rendezvous and docking maneuver between the ESA's ATV-5 vehicle and the international space station (ISS) on August 12, 2014.

AUTHORS

Oliver de Vries
Thomas Schreiber
Ramona Eberhardt
Andreas Tünnermann

CONTACT

Dr. Oliver de Vries
Phone +49 3641 807-232
oliver.devries@iof.fraunhofer.de



LEISTUNGSDYNAMISCH DURCHSTIMMBARER LASER FÜR LIDAR PRÜFSTAND HIGHLY DYNAMIC (>100 dB) CONTINUOUS POWER-TUNABLE FIBER LASER

Moderne 3D-Abstandsscanner können dreidimensionale Bilder ihrer Umgebung erstellen und damit Form, Distanz und Bewegung selbst weit entfernter und nicht reflektierender Körper analysieren. Damit sind diese Systeme besonders gut für Rendezvous und Docking-Anwendungen geeignet.

Grundsätzlich besteht ein 3D-Rangefinder aus drei Schlüsselkomponenten: gepulste Laserquelle, Scan-Optik und Empfängermodul. In den letzten drei Jahren wurde am Fraunhofer IOF ein ns-gepulster Faserlaser-Prototyp bei augensicherer Wellenlänge (1550 nm) für besonders widrige Umgebungsbedingungen (große Temperaturschwankungen, Vakuum, Vibrationen, harte Strahlung) entwickelt. Mit einer Spitzenleistung von 5 kW bei Pulsfrequenzen zwischen 25 und 150 kHz können Objekte in km-Entfernung mittels Galvanometer-Scanner in Echtzeit mit cm-Auflösung erfasst werden. Dabei muss der Empfänger (z.B. eine stromverstärkte Avalanche-Photodiode) stark unterschiedliche zurückgestreute Lichtleistungen verarbeiten, die während des räumlichen Abtastvorgangs auftreten können. Diese reichen vom nW-Bereich (Detektionsgrenze) bis in den Wattbereich (Zerstörschwelle des Empfängers), was einer Dynamik von >90 dB entspricht.

Für die Evaluierung, Optimierung und Kalibrierung des Empfängermoduls hinsichtlich der Sensitivität und der Dynamikgrenzen hat das Fraunhofer IOF im Auftrag der Jena-Optronik

Modern 3D rangefinders are capable of creating three-dimensional images of their surrounding area and can therefore analyze the shape, distance and movement of even non-reflecting and remote objects, thus making this type of LIDAR system ideal for rendezvous and docking applications.

Such systems essentially consist of three key units: a pulsed laser source, scanner optics and a receiver module. Over the last three years, Fraunhofer IOF has developed an ns-pulsed LIDAR prototype fiber laser at eye-safe optical wavelength (1550 nm) destined for operation under harsh conditions (e.g. major temperature changes, vacuum, vibration, hard radiation). With a peak power of up to 5 kW and pulse repetition frequencies between 25 and 150 kHz, objects at a distance of kilometers can be sensed via galvanometer scanners in real-time with centimeter spatial resolution. The receiver unit (e.g. an avalanche photo diode and current amplifier electronics) usually has to handle very different peak power levels of the back-scattered laser pulses during the spatial scanning process, which can range from nW level (detection limit) to the watt level (damage threshold), corresponding to a dynamic range of >90 dB.

To evaluate, optimize and calibrate the receiver unit in terms of detection sensitivity and noise/power thresholds, Fraunhofer IOF, on the commission of Jena-Optronik GmbH

1 Leistungsdynamisch durchstimmbarer Laser für LIDAR Prüfstand. |
Highly dynamic (>100 dB) continuous power-tunable fiber laser.

GmbH und der DLR¹ einen speziellen Faserlaser aufgebaut, um verschiedene realistische Szenarien (d.h. verschiedene Spitzenleistungen und Pulslaufzeiten) simulieren zu können. Die 3 bzw. 10 ns Laserpulse mit kontinuierlich durchstimmbarer Spitzenleistung zwischen 1 nW und 10 W (simuliertes Streuverhalten mit ~100 dB Dynamik) können bei verschiedenen Pulsfolgefrequenzen und mit drei diskreten zeitlichen Verzögerungen gegenüber einem Referenzpuls (simulierte Pulslaufzeit) vom System emittiert werden. Dieser Prüfstand kann direkt mit dem Empfängermodul verbunden und über ein Computerprogramm gesteuert werden.

¹ Auftraggeber: Raumfahrtmanagement des DLR e.V. aus Mitteln des Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages.

and the German Aerospace Center (DLR)¹ built a special fiber optics-based laser system to simulate different scenarios (in terms of peak power level and pulse runtime) likely to occur in real-world operation. The 3 or 10 ns laser pulses with continuous-tunable peak powers between 1 nW and 10 W (simulating back-scattering behavior with a dynamic of ~100 dB) are emitted at arbitrary repetition frequencies and with three discrete temporal delays in relation to a reference pulse (simulating different target distances). This device can directly be connected to the receiver module and easily controlled using customized computer software.

AUTHORS

Oliver de Vries

Thomas Schreiber

Ben Zaage

Ramona Eberhardt

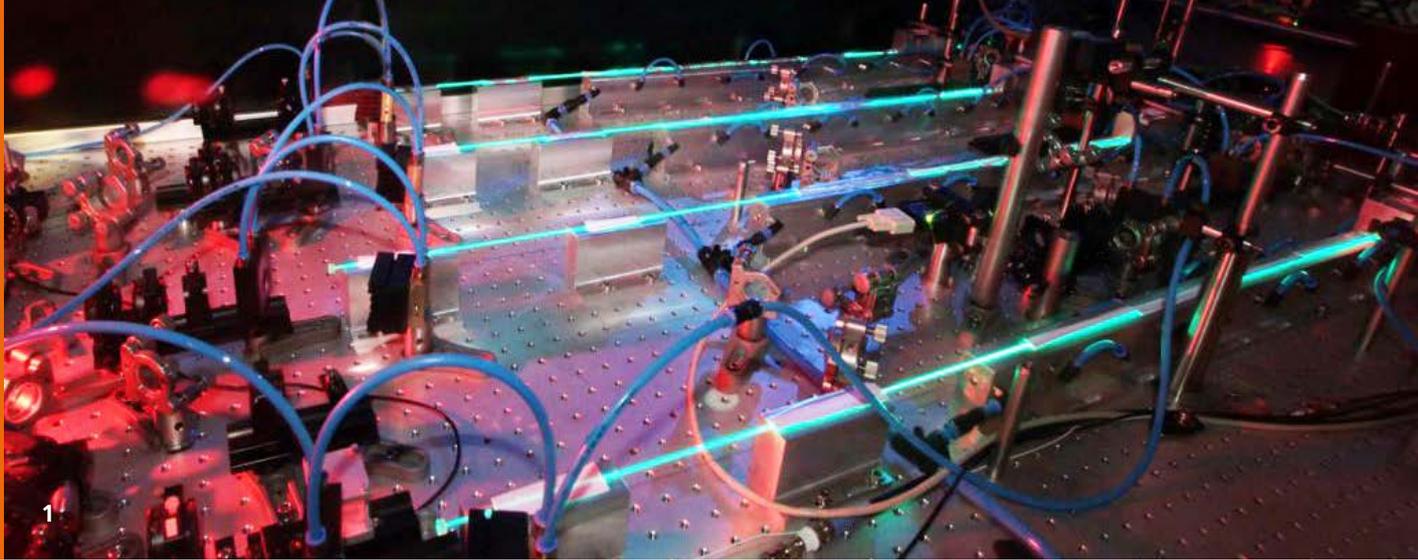
Andreas Tünnermann

CONTACT

Dr. Oliver de Vries

Phone +49 3641 807-232

oliver.devries@iof.fraunhofer.de



KOHÄRENTE ADDITION ULTRAKURZER PULSE COHERENT ADDITION OF ULTRASHORT PULSES

Ultrakurzpuls-Faserlasersysteme haben sich in den letzten Jahren als Strahlungsquellen in einer Vielzahl von Anwendungen etabliert. Sie zeichnen sich besonders durch ihre hohe Strahlqualität, einen effizienten Betrieb und kompakte Bauweise sowie hohe Durchschnittsleistungen aus. Auch in der erreichbaren Pulsspitzenleistung wurden bedeutende Fortschritte erzielt, sodass Faserlaser heute selbst auf dem Gebiet der ultrakurzen Pulse allen anderen Laserkonzepten mehr als ebenbürtig sind. Allerdings gelangt diese Leistungskalierung immer mehr an ihre fundamentalen physikalischen Grenzen, sodass eine weitere Performancesteigerung zwar prinzipiell möglich ist, jedoch immer schwieriger wird. Eine Lösung dieses Dilemmas ist Parallelisierung, d.h. die kohärente Addition mehrerer Laserverstärker ^{1/}. Laserleistung ist so nicht mehr durch physikalische Effekte limitiert, sondern nur noch durch Größe und Kosten des geplanten Systems.

Um dieses zu realisieren, wird in einem Hochleistungs-Lasersystem der Ausgangsstrahl des letzten Vorverstärkers auf vier parallele Kanäle aufgeteilt. In jedem dieser Kanäle befindet sich ein Großkern-Faserverstärker, der auf dem am IAP/IOF entwickelten Large-Pitch Design beruht ^{2/}. Alle Kanäle werden schließlich räumlich zu einem einzigen Ausgangsstrahl kombiniert. Hierzu ist eine hochgenaue zeitliche Überlagerung der jeweiligen Laserpulse mit Genauigkeiten von deutlich weniger als einem optischen Zyklus erforderlich, weshalb eine aktive Weglängenstabilisierung genutzt wird.

Die erzielten Ausgangsparameter sind in Bezug auf Strahlqualität und Pulsdauer vergleichbar mit einem Einzelkanal-

Fiber-laser systems emitting ultrashort pulses have proven to be an indispensable tool for a large number of applications. These systems are distinguished by their excellent beam quality, efficient operation, compact footprint and high average power. Additionally, outstanding progress has been made in increasing the maximum peak power in recent years. Today's fiber lasers are thus more than able to compete with other architectures. However, although further power scaling is still possible, it is becoming ever more demanding due to fundamental physical limitations. One solution is to use parallelization, i.e. the coherent addition of multiple laser amplifiers ^{1/}. Laser power is then no longer limited by physics but only by the size and cost of the envisioned system.

In the setup, the output beam of the last pre-amplifier in a high-power laser system is split into four parallel channels. Large-mode-area fiber amplifiers employing large-pitch fibers developed at IAP/IOF ^{2/} are located in each of the channels. Afterwards, the output of all the channels is recombined into a single beam. The combination requires a high-precision temporal overlap of the corresponding laser pulses with a variation of less than one optical cycle and therefore, employs active optical-path-length stabilization.

The properties of the combined laser pulses are comparable in beam quality and duration to a single-channel system. However, dramatically higher pulse energies and average powers are achievable. In experimental conditions, 200 fs pulses with an energy of 5.7 mJ, a peak-power of 22 GW

¹ Hauptverstärker eines Ultrakurzpuls-Faserlasersystems mit vier parallelen Kanälen. |

Main amplifier of an ultrashort-pulse fiber-laser system employing four parallel channels.

system. Allerdings können deutlich höhere Pulsenergien und Durchschnittsleistungen erreicht werden. So konnten im Experiment 200 fs lange Pulse mit einer Energie von 5.7 mJ und einer Spitzenleistung von 22 GW bei einer Durchschnittsleistung von 230 W erzeugt werden. Dies stellt einen neuen Weltrekord im Bereich der Faserlaser dar /3/.

Die Anwendungen für solch ein Lasersystem sind vielfältig. Es kann beispielsweise zur Erzeugung von Lichtpulsen im XUV Wellenlängenbereich eingesetzt werden. In einem ersten Experiment wurde so eine Durchschnittsleistung bei diesen kurzen Wellenlängen erreicht, die im Bereich eines Synchrotrons liegt /4/. Zusätzlich ist in Zukunft mit weiteren Leistungssteigerungen z.B. durch Erhöhung der Anzahl der Kanäle ein Einsatz solcher Systeme im Bereich der Laserpartikelbeschleunigung denkbar.

Literatur / References

- /1/ J. Limpert et al., IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron. 20, 1–10 (2014).
- /2/ J. Limpert et al., Light Sci. Appl. 1, e8 (2012).
- /3/ A. Klenke et al., erscheint in Optics Letters.
- /4/ S. Hädrich et al., Nat. Photonics 8, 779–783 (2014).

and an average power of 230 W were realized, representing a new record for fiber laser systems /3/.

There are a large number of applications for such laser sources. For example, coherent light pulses in the XUV wavelength range can be produced. In a first experiment, an average power for these short wavelengths comparable to a synchrotron was achieved /4/. With additional power scaling, e.g. by increasing the number of parallel channels, these systems might even be used for applications such as laser particle acceleration.

AUTHORS

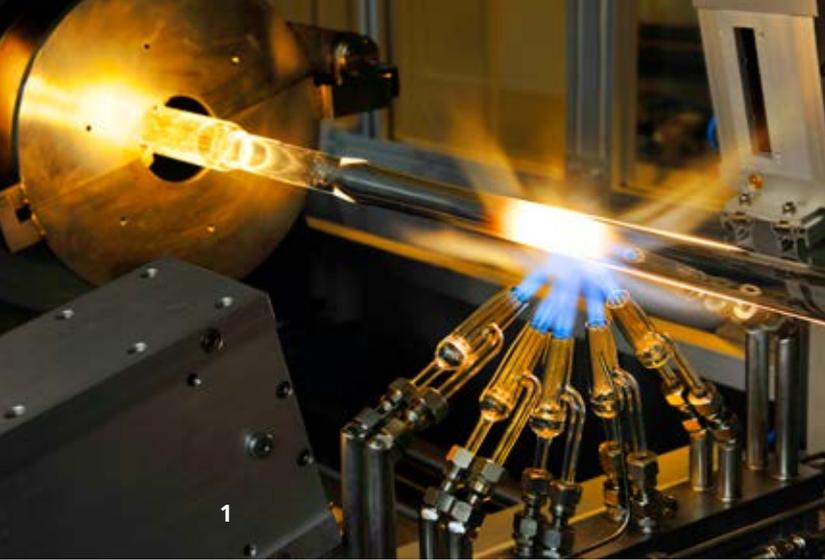
Jens Limpert^{1,2}
Tino Eidam¹
Arno Klenke¹
Marco Kienel¹

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

² Fraunhofer IOF

CONTACT

Prof. Dr. Limpert Jens
Phone +49 3641 9-47811
jens.limpert@uni-jena.de



PROFILOPTIMIERUNG LASERAKTIVER PREFORMEN UND FASERN PROFILE OPTIMIZATION OF LASER-ACTIVE PREFORMS AND FIBERS

Der Aufbau von monolithischen Faserlasern mit Ausgangsleistungen im Kilowattbereich und beugungsbegrenzter Strahlqualität auf der Basis von Doppelkernfasern erfordert die optimale Abstimmung der Brechzahlprofile mit allen weiteren Komponenten (passive Faser mit Faser-Bragg-Gitter (FBG), Übertragungsfaser).

Hierzu wird das Brechzahlprofil der Preform an verschiedenen Ortspositionen zerstörungsfrei vermessen. Ein Simulationsprogramm bewertet die Ergebnisse im Vergleich mit den Brechzahlprofilen der für den Aufbau eines monolithischen Oszillators erforderlichen passiven Fasern (hier sind die als Resonatorspiegel arbeitende FBG integriert) bezüglich der Überlappung mit der Grundmode. Darauf aufbauend wird die Geometrie der zu verziehenden Faser im Rahmen der technologischen Grenzen festgesetzt. Nach dem Ziehprozess der laseraktiven Faser wird diese mit den passiven Komponenten verspleißt. Die Optimierung dieses Technologieschrittes ist eine weitere Herausforderung bezogen auf den Gesamtprozess, da sich die Brechzahlprofile der Fasern durch Diffusionsprozesse während des Spleißvorgangs stark ändern können, wie hochaufgelöste Indexmessungen zeigen (siehe Abb. 4).

In enger Kooperation mit dem Leibniz IPHT wurde die Beherrschung der gesamten Prozesskette an Hand des Aufbaus eines

The setup of monolithic fiber lasers with output powers in the kilowatt range and diffraction-limited beam quality based on double-clad fibers requires optimized balancing of the refractive index profiles with all other components (passive fiber with FBG, transmission fiber, etc.).

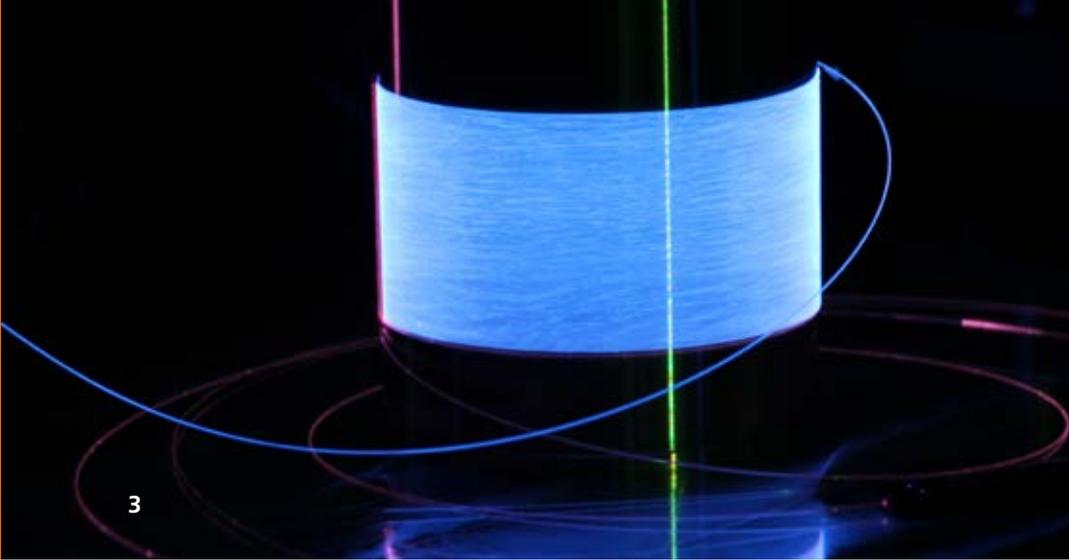
The first step is the non-destructive measurement of the index profile of the preform at various angles and at different positions along the fiber preform. The results are then compared with the refractive index profiles of the passive fibers in terms of the overlap of the fundamental modes. This is required for the construction of a monolithic oscillator with FBG integrated in the passive fiber. Subsequently, the geometry for the fiber is set within the bounds of technological limits. Following the drawing process, the laser-active fiber is spliced to the passive components. The optimization of this measurement technology along the splice is a further challenge in the overall process, since the refractive index profiles of the connected fibers can change their shape dramatically by diffusion processes during the splicing (see fig. 4).

In close cooperation with the Leibniz IPHT, mastery of the closed process chain was demonstrated by the realization

1 *MCVD-Anlage.* | *MCVD system.*

2 *Preform.* | *Preform.*

3 *Faser.* | *Fiber.*



3

monolithischen 1 kW Faserlasers mit beugungsbegrenzter Strahlqualität demonstriert. Der stabile Laserbetrieb wurde über 700 h gezeigt.

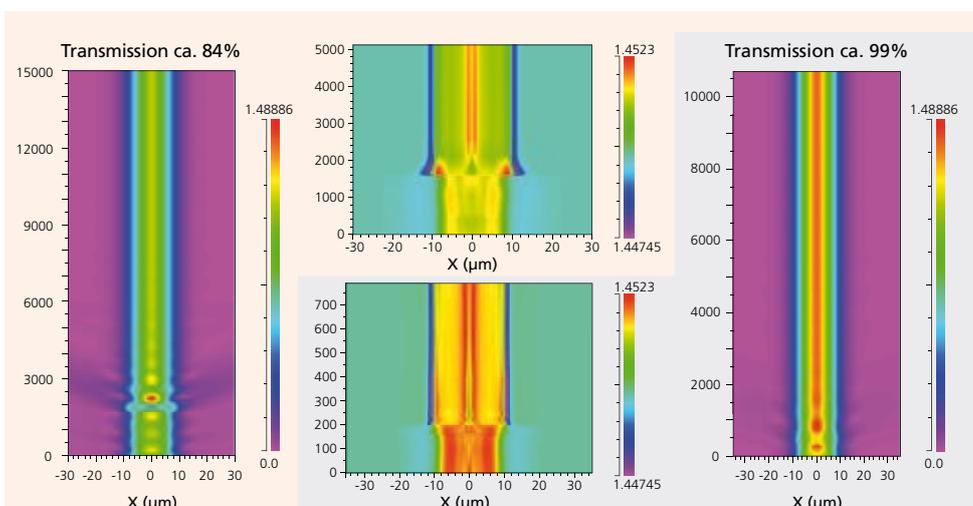
Zur Verbesserung der optischen Eigenschaften der Fasern wird der Gesamtprozess systematisch optimiert mit speziellem Fokus auf neuartige Brechzahlprofile. Zur Minimierung profilformender Diffusionsprozesse werden dazu sowohl die Kodotanden als auch einzelne Prozessschritte angepasst. Erste Ergebnisse führten zu einer Fasern mit geringer numerischer Apertur (0.04) im Kern, die im Laseraufbau eine grundmodige Leistung von 2.7 kW bei einem differentiellen Wirkungsgrad gegenüber absorbierter Pumpleistung von 90% zeigte. Eine weitere Skalierung und die Adressierung neuer Wellenlängen gehört zu den zukünftigen Aufgaben.

Die Arbeiten wurden gefördert durch das BMBF-Projekt TEHFA (13N 11972 PT-VDI)

of a monolithic fiber laser with an output power of 1 KW and diffraction-limited beam quality. Stable operation was demonstrated in a long-term test of more than 700 h.

To extend the optical properties toward further power scaling, activities are focused on novel refractive index profiles and doping profiles by adapting codopand-concentration and high-temperature process steps. First results lead to a fiber with a low numerical aperture core of 0.04, which could be scaled to 2.7 kW of average power in diffraction limited beam quality with a slope efficiency of 90% with respect to absorbed pump power. A further scaling and addressing new wavelength is part of future work.

The work was supported by the BMBF TEHFA project (13N 11972 PT-VDI)



4 Gemessene Brechzahlverläufe und numerischer Propagation der Grundmode im Spleißbereich. | Measured refractive index profiles and calculated propagation of the fundamental mode in the spliced area.

AUTHORS

Volker Reichel
Ladislav Kido
Johannes Nold
Andreas Liem
Thomas Schreiber

CONTACT

Dr. Nicoletta Haarlammert
Phone +49 3641 807-334
nicoletta.haarlammert@iof.fraunhofer.de



VERBESSERTE MATERIALBEARBEITUNG MIT RAUM-ZEITLICH GEFORMTEN ULTRAKURZEN LASERPULSEN

ENHANCED MATERIAL PROCESSING USING SPATIOTEMPORAL PULSE SHAPING

Die hochpräzise Strukturierung transparenter Medien mit ultrakurzen Laserpulsen hat viele Anwendungen von der Bearbeitung von Gläsern bis hin zur präzisen Chirurgie im Auge ermöglicht. Während die bisherigen Verfahren hierbei hauptsächlich auf bandbreiten-begrenzten Pulsen basierten, zielen neuartige Ansätze auf maßgeschneiderte Bearbeitungsprozesse mit Hilfe raum-zeitlich geformter Pulse ab.

Bei der Laserbearbeitung tief innerhalb transparenter Materialien resultiert die begrenzte numerische Apertur der Fokussierung in hohen Intensitäten und unerwünschten nichtlinearen Wechselwirkungen bereits weit vor dem eigentlichen geometrischen Fokus ^{/1/}. Um die extremen Intensitäten und damit die nichtlineare Wechselwirkung auf den Fokusbereich zu begrenzen, wurde die raum-zeitliche Fokussierung (simultaneous spatial and temporal focusing, SSTF) untersucht. Hier erreicht der Laserpuls seine ultrakurze Dauer ausschließlich im Bereich des Fokus ^{/2/}. Außerhalb des Fokus verringert sich die Intensität sowohl durch die Divergenz des Strahls als auch zusätzlich durch die kontinuierliche Erhöhung der Pulsdauer. Zum Vergleich des durch SSTF und konventioneller Fokussierung erzeugten opti-

Precise processing of transparent materials using ultrashort laser pulses has enabled a range of applications, from the processing of glass to ophthalmology. While bandwidth-limited pulses were mainly used in the past, innovative treatment strategies aim at tailoring the nonlinear modification processes using spatiotemporally shaped pulses.

For laser processing deep within the bulk material, the limited numerical aperture of the focusing optics results in high intensities and detrimental nonlinear pulse-material interactions far in front of the geometrical focus ^{/1/}. Simultaneous spatial and temporal focusing (SSTF) was applied to strongly confine the extreme intensities to the focal region. With SSTF, the laser pulse possesses its ultrashort duration only in the vicinity of the focal plane ^{/2/}. The intensity dramatically drops outside of the focal region, due to both the geometrical divergence and temporal prolongation of the pulse. To investigate the laser-induced optical breakdown, the formation of the plasma and the subsequent evolution of the shock waves were studied in water as a model system. SSTF and conventional focusing were compared using focusing conditions typical for intraocular surgery. Moreover,

1 Schematische Darstellung der raum-zeitlichen Fokussierung (SSTF). |

Schematic illustration of simultaneous spatial and temporal focusing (SSTF).

2 Schattenfotografische Aufnahmen der laser-induzierten Plasmen in Wasser, welche die verbesserte Lokalisierung der Modifikationen durch SSTF zeigen. | *Shadowgraphic images of the laser-induced plasma in water showing the enhanced modification confinement due to SSTF.*

Conventional focusing



schon Durchbruchs wurden die Plasmaentstehung und die resultierenden Disruptionen in Wasser als Modellsystem untersucht. Vergleichende detaillierte Simulationen der Pulspropagation wurden in Zusammenarbeit mit dem »Max-Planck-Institut für Physik komplexer Systeme«, Dresden, durchgeführt, um ein tieferes Verständnis der Wechselwirkungsmechanismen beider Techniken zu erlangen. Im Vergleich zu konventioneller Fokussierung wiesen die mittels SSTF erzeugten Plasmen eine um den Faktor 2 reduzierte Länge auf, was sowohl im Experiment als auch in den Simulationen übereinstimmend zu beobachten war /3/. Darüber hinaus konnte durch die verbesserte Lokalisierung der Spitzenintensitäten bei SSTF die Erzeugung ausgedehnter Filamente oder zusätzlicher Nebenkeulen des Plasmas verhindert werden, welche die Präzision der Modifikationen bei konventioneller Fokussierung stark reduzierten. Während die lange Propagation konventionell fokussierter Pulse im transparenten Medium zu starker Weißlichterzeugung führte, konnte durch die stark lokalisierte nichtlineare Wechselwirkung bei SSTF eine spektrale Verbreiterung nahezu vollständig vermieden werden. Anwendungsvorteile ergeben sich aus der präziseren Lokalisierung der Strukturierung sowohl für die Augenheilkunde als auch für Bearbeitung von Gläsern und Kristallen.

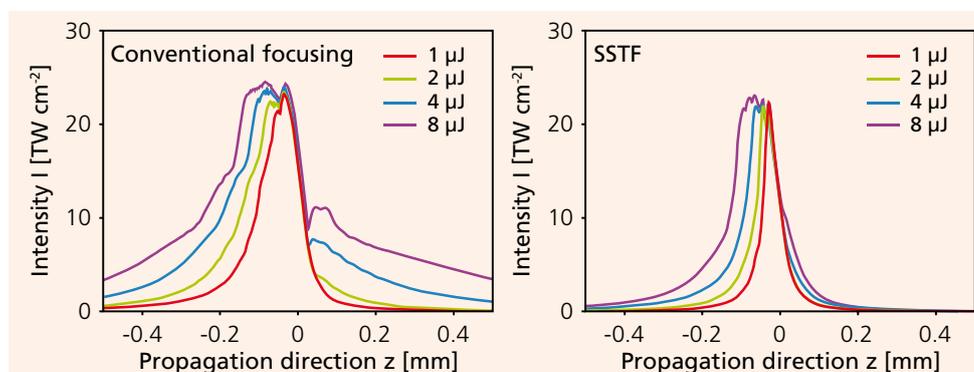
detailed simulations were carried out in cooperation with the Max Planck Institute for the Physics of Complex Systems, Dresden, Germany. Concurring with the theoretical investigations, the experimentally detected length of the plasma channels induced with SSTF was reduced by a factor of 2 compared to conventional focusing /3/. Moreover, the enhanced intensity confinement of SSTF prevented the formation of extended plasma filaments and sprawling plasma sidelobes observed with conventional focusing, which strongly reduced the precision of the applied modifications. In addition, while the long propagation of conventionally focused pulses within the transparent media resulted in intense white-light generation, the localization of the nonlinear interaction by SSTF almost entirely suppressed spectral broadening. Significant benefits for eye surgery and precision processing of glasses and crystals result from the more precise localization of the induced modifications.

References / Literatur

/1/ Bergé et al.: Reports on Progress in Physics 70, 10, 1633-1713 (2007)

/2/ Zhu et al.: Optics Express 13, 6, 2153-2159 (2005)

/3/ Kammel et al.: Light: Science & Applications 3, 5, e169 (2014)



AUTHORS

Robert Kammel¹

Jens Thomas^{1,3}

Stefan Nolte^{1,2}

Andreas Tünnermann^{1,2}

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

² Fraunhofer IOF

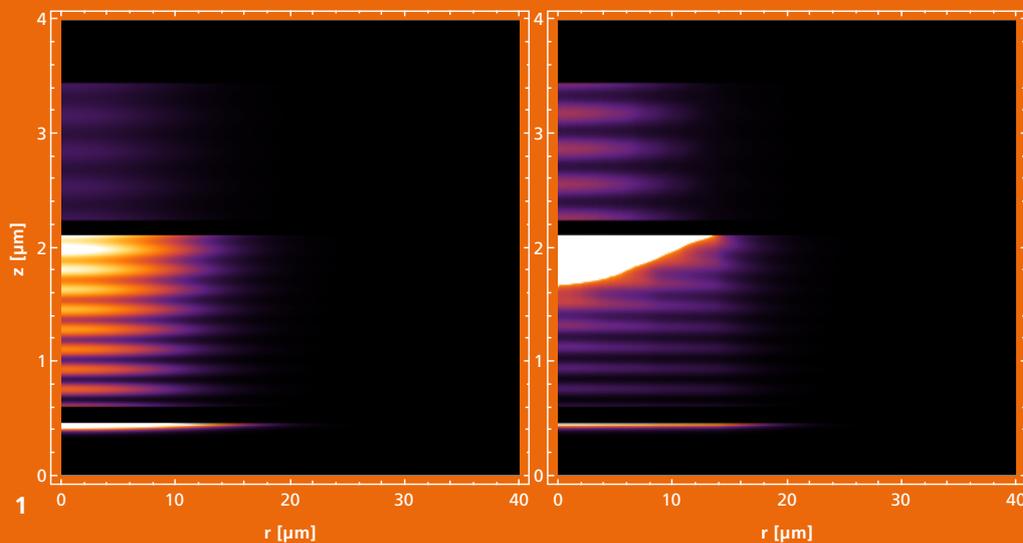
³ Colorado School of Mines, Golden, USA

CONTACT

Robert Kammel

Phone +49 3641 9-47821

robert.kammel@uni-jena.de



MODELLE ZUR LASER-STRUKTURIERUNG VON DÜNNFILM-SOLARZELLEN

MODELS FOR LASER STRUCTURING OF THIN-FILM SOLAR CELLS

Solarenergie soll in den nächsten Jahrzehnten einen wesentlichen Beitrag zum Ersetzen fossiler Energiequellen leisten. Dünnschichtsolarezellen auf der Basis von Kupfer-Indium-Gallium-Diselenid (CIGS) können dabei eine entscheidende Rolle spielen, da diese als komplette Module hergestellt werden können sowie im Vergleich zu herkömmlichen Silizium-basierten Zellen deutlich weniger Material benötigen.

Während des Herstellungsprozesses wird die Verschaltung der einzelnen Zellen zum Modul durch zwischengeschaltete Strukturierungsprozesse erreicht. Mittels Laser können diese Strukturen schneller und präziser als mit herkömmlichen, mechanischen Methoden erzeugt werden, wodurch der Gesamtwirkungsgrad des Moduls um ca. 6% steigt. Um das Verständnis des Abtragsprozesses zu verbessern und Möglichkeiten der Optimierung aufzuzeigen, wurden theoretische Modelle der Wechselwirkung ultrakurzer Laserpulse mit Dünnschichtsystemen entwickelt.

Der erste Teil des Modells beschreibt das optische Verhalten des Systems. Kernpunkt ist die Lichtausbreitung im Vielschichtsystem. Nichtlineare Prozesse, insbesondere die Dynamik der erzeugten Ladungsträger und deren Einfluss auf die Strahlausbreitung, haben einen signifikanten Einfluss, da die mit freien

In the coming decades, solar energy is due to make an important contribution to the substitution of fossil energy sources. Thin-film solar cells based on copper indium gallium diselenide (CIGS) can play a decisive role in this because they can be produced as complete modules and require far less material than conventional silicon-based cells.

During the production process, connecting the individual cells to make a module is achieved by intercalated structuring processes. Using lasers, these structures can be produced faster and more precisely than with conventional mechanical methods, which allows an increase in the overall efficiency of the module of up to 6%.

In order to improve the understanding of the ablation process and to show possibilities for its optimization, theoretical models of the interaction of ultra-short laser pulses with thin film systems were developed.

The first part of the model describes the system's optical behavior. The crucial point is light propagation in the multilayer system. Non-linear processes, especially due to the dynamics of the produced carriers and their influence on beam

1 Radialer Schnitt durch die Verteilung der Absorption. Das linke Bild zeigt die Verteilung zu Beginn, das rechte zum Ende des Pulses. Parameter: Wellenlänge 1064 nm, Pulsdauer: 10 ps, Pulsenergie: 100 nJ, Strahldurchmesser 28 μm. | Distribution of absorption in the layer system. The image on the left shows the distribution at the beginning, the one on the right at the end of the pulse. Parameters: wavelength 1064nm, pulse duration 10 ps, pulse energy 100 nJ, beam diameter 28 μm.

Ladungsträgern verbundenen Plasmaeffekte den Laserstrahl abschirmen können. Als Ergebnis des optischen Modells erhält man die räumliche und zeitliche Verteilung der im Schichtsystem deponierten Energie.

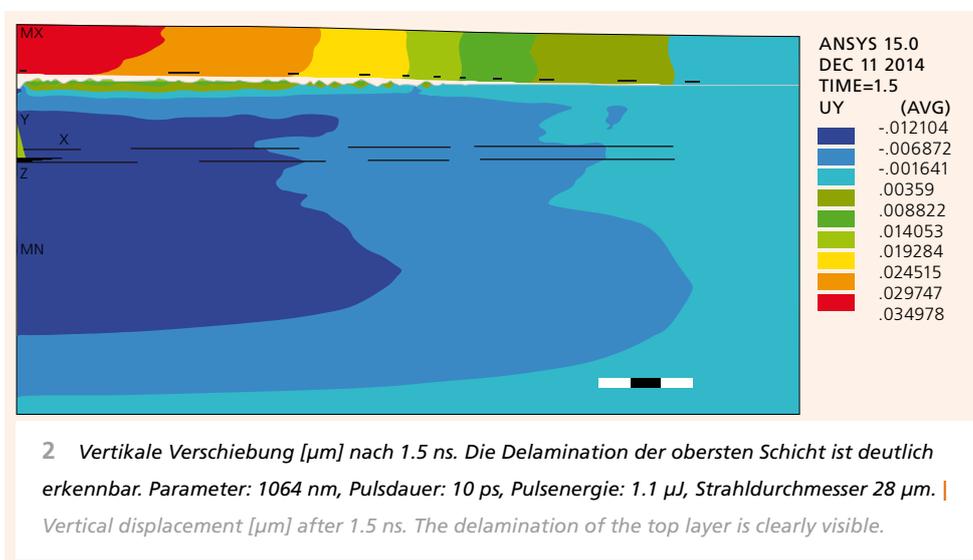
Der zweite Teil des Modells umfasst die Simulation des thermo-mechanischen Verhaltens des Schichtsystems mittels des Finite-Element-Verfahrens. Ausgehend von der Verteilung der eingetragenen Energie wird letztendlich der eigentliche Abtrag beschrieben. Dieser erfolgt indirekt, d.h. Energie wird in die Tiefe des Schichtsystems eingebracht, wobei das darüber liegende, relativ kalte Material abgesprengt wird. Durch diese Prozessführung lassen sich Energiebedarf und thermische Schädigung des umgebenden Materials minimieren. Durch das entwickelte Modell konnte der Laserabtrag an einem einfachen System (auch quantitativ) gut beschrieben werden. Für das komplette Schichtsystem konnte trotz der schlechten Verfügbarkeit verlässlicher Materialparameter zumindest qualitativ eine Übereinstimmung erreicht werden.

Danksagung: Die Arbeiten wurden vom BMBF im Rahmen des Projektes T4nPV (Vertrag Nr. 13N11788) unterstützt.

propagation, have a significant impact. The primary effect is plasma shielding of the laser beam. The result of the optical model is the spatial and temporal distribution of the energy deposited in the layer system.

The second part of the model contains the simulation of the thermo-mechanical behavior of the layer system using finite element analysis. The actual ablation process is described on the basis of the distribution of the deposited energy. This is an indirect ablation, i.e. the laser energy is absorbed in the depth of the layer system. The relatively cold material lying above is blasted off in the process. This process allows for the minimization of energy demand and thermal damage of the surrounding material. With the presented model, it was possible to specify the laser ablation in a simple system fairly well, also from a quantitative point of view. Accordance – at least qualitatively – was achieved for the entire layer system despite the poor availability of reliable material parameters.

The work was supported by the BMBF on the T4nPV project (contract no. 13N11788).



AUTHORS

Thomas Peschel
 Stefan Nolte

CONTACT

Dr. Thomas Peschel
 Phone +49 3641 807-335
 thomas.peschel@iof.fraunhofer.de



FRAUNHOFER-VERBUND LIGHT & SURFACES

FRAUNHOFER GROUP LIGHT & SURFACES

Kompetenz durch Vernetzung

Sechs Fraunhofer-Institute kooperieren im Verbund Light & Surfaces. Aufeinander abgestimmte Kompetenzen gewährleisten eine schnelle und flexible Anpassung der Forschungsarbeiten an die Erfordernisse in den verschiedensten Anwendungsfeldern zur Lösung aktueller und zukünftiger Herausforderungen, insbesondere in den Bereichen Energie, Umwelt, Produktion, Information und Sicherheit. Koordinierte, auf die aktuellen Bedürfnisse des Marktes ausgerichtete Strategien führen zu Synergieeffekten zum Nutzen der Kunden.

Kernkompetenzen des Verbunds

- Beschichtung & Oberflächenfunktionalisierung
- Laserbasierte Fertigungsverfahren
- Laserentwicklung
- Materialien der Optik & Photonik
- Mikromontage & Systemintegration
- Mikro- & Nanotechnologien
- Kohlenstofftechnologie
- Messverfahren & Charakterisierung
- Ultrapräzisionsbearbeitung
- Werkstofftechnologien
- Plasma- & Elektronenstrahlquellen

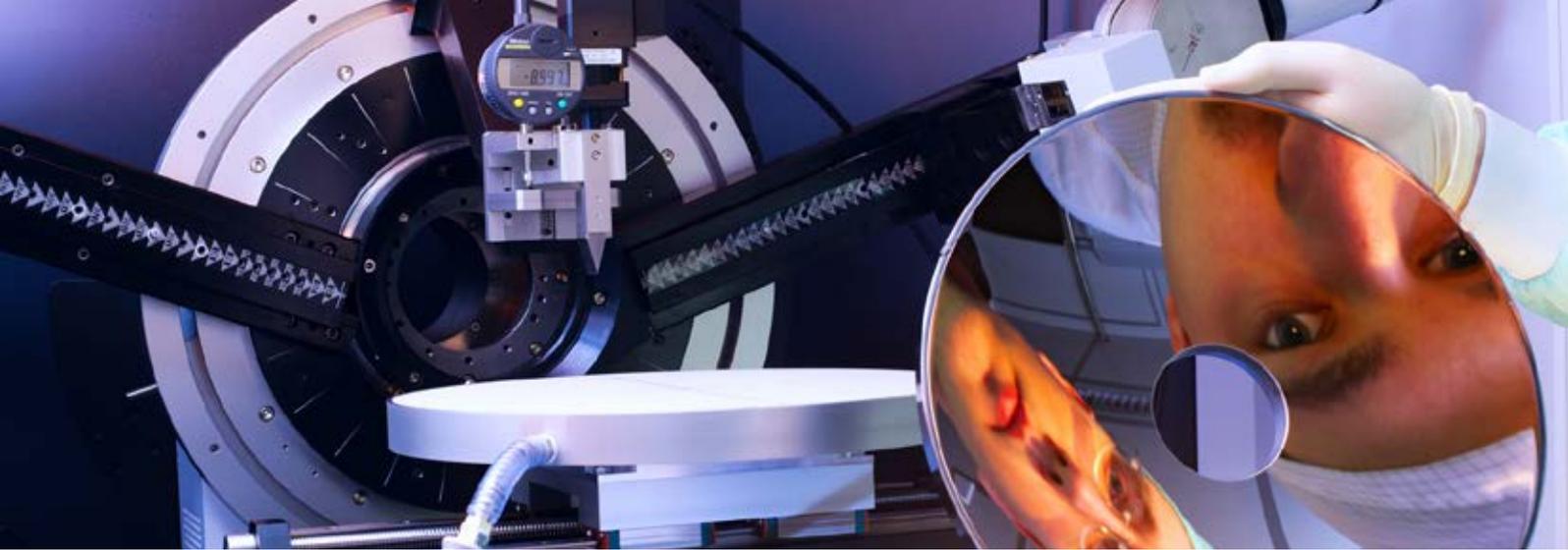
Competence by networking

Six Fraunhofer institutes cooperate in the Fraunhofer Group Light & Surfaces. Co-ordinated competences allow quick and flexible alignment of research work on the requirements of different fields of application to answer actual and future challenges, especially in the fields of energy, environment, production, information and security. This market-oriented approach ensures an even wider range of services and creates synergetic effects for the benefit of our customers.

Core competences of the group

- Surface and coating functionalization
- Laser-based manufacturing processes
- Laser development
- Materials in optics and photonics
- Microassembly and system integration
- Micro and nano technology
- Carbon technology
- Measurement methods and characterization
- Ultra precision engineering
- Material technology
- Plasma and electron beam sources

www.light-and-surfaces.fraunhofer.de



Fraunhofer-Institut für Elektronenstrahl- und Plasmatechnik FEP

Die Kernkompetenzen des Fraunhofer FEP sind die Elektronenstrahltechnologie, die plasmaaktivierte Hochratebedampfung und die Hochrate-PECVD. Die Arbeitsgebiete umfassen die Vakuumbeschichtung sowie die Oberflächenbearbeitung und -behandlung mit Elektronen und Plasmen. Neben der Entwicklung von Schichtsystemen, Produkten und Technologien ist ein wichtiger Schwerpunkt die Aufskalierung der Technologien für die Beschichtung und Behandlung großer Flächen mit hoher Produktivität.

www.fep.fraunhofer.de

Fraunhofer-Institut für Werkstoff- und Strahltechnik IWS

Das Fraunhofer-Institut für Werkstoff- und Strahltechnik IWS steht für Innovationen in den Geschäftsfeldern Fügen, Trennen sowie Oberflächentechnik und Beschichtung. Die Besonderheit des Fraunhofer IWS liegt in der Kombination eines umfangreichen werkstofftechnischen Know-hows mit weitreichenden Erfahrungen in der Entwicklung von Technologien und Systemtechnik. Zahlreiche Lösungen im Bereich der Lasermaterialbearbeitung und Schichttechnik finden jedes Jahr Eingang in die industrielle Fertigung.

www.iws.fraunhofer.de

Fraunhofer Institute for Electron Beam and Plasma Technology FEP

Electron beam technology, sputtering technology, plasma activated high-rate deposition and high-rate PECVD are the core areas of expertise of Fraunhofer FEP. The business units include vacuum coating, surface modification and treatment with electrons and plasmas. Besides developing layer systems, products and technologies, another main area of work is the scale-up of technologies for coating and treatment of large areas at high productivity.

www.fep.fraunhofer.de

Fraunhofer Institute for Material and Beam Technology IWS

The Fraunhofer Institute for Material and Beam Technology is known for its innovations in the business areas joining and cutting as well as in the surface and coating technology. Our special feature is the expertise of our scientists in combining the profound know-how in materials engineering with the extensive experience in developing system technologies. Every year, numerous solution systems have been developed and have found their way into industrial applications.

www.iws.fraunhofer.de

Fraunhofer-Institut für Angewandte Optik und Feinmechanik IOF

Das Fraunhofer IOF entwickelt zur Bewältigung drängender Zukunftsfragen in den Bereichen Energie und Umwelt, Information und Sicherheit sowie Gesundheit und Medizintechnik Lösungen mit Licht. Die Kompetenzen umfassen die gesamte Prozesskette vom Optik- und Mechanik-Design über die Entwicklung von Fertigungsprozessen für optische und mechanische Komponenten sowie Verfahren zur Systemintegration bis hin zur Fertigung von Prototypen. Schwerpunkte liegen auf den Gebieten multifunktionale optische Schichtsysteme, Mikro- und Nanooptik, Festkörperlichtquellen, optische Messsysteme und opto-mechanische Präzisionssysteme.

www.iof.fraunhofer.de

Fraunhofer-Institut für Physikalische Messtechnik IPM

Fraunhofer IPM entwickelt und realisiert optische Sensor- und Abbildungssysteme. Bei den vorwiegend laserbasierten Systemen sind Optik, Mechanik, Elektronik und Software ideal aufeinander abgestimmt. Die Lösungen sind besonders robust ausgelegt und jeweils individuell auf die Bedingungen am Einsatzort zugeschnitten. Insbesondere in den Gebieten Messtechnik, Oberflächenanalytik, optische Materialien, 3D-Scanner, digitale Holographie, schnelle Kameras für die Inline-Messtechnik und die Terahertz-Technologie verfügt das Institut über fundiertes Know-How.

www.ipm.fraunhofer.de

Fraunhofer Institute for Applied Optics and Precision Engineering IOF

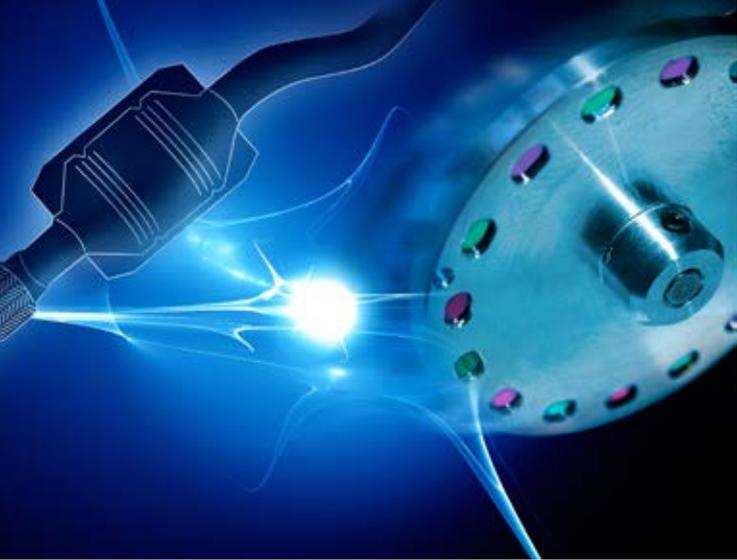
The Fraunhofer IOF develops solutions with light to cope foremost challenges for the future in the areas energy and environment, information and security, as well as health care and medical technology. The competences comprise the entire process chain starting with optics and mechanics design via the development of manufacturing processes for optical and mechanical components and processes of system integration up to the manufacturing of prototypes. Focus of research is put on multifunctional optical coatings, micro- and nano-optics, solid state light sources, optical measurement systems, and opto-mechanical precision systems.

www.iof.fraunhofer.de

Fraunhofer Institute for Physical Measurement Techniques IPM

Fraunhofer IPM develops and builds optical sensor and imaging systems. These mostly laser-based systems combine optical, mechanical, electrical and software components to create reliable and complete solutions of robust design that are individually tailored to suit the conditions at the site of their application. Particular strengths are in the fields measurement systems, surface analytics, optical materials, 3D scanners, digital holography, fast cameras for inline metrology, and terahertz technology.

www.ipm.fraunhofer.de



Fraunhofer-Institut für Lasertechnik ILT

Das Fraunhofer-Institut für die Lasertechnik ILT ist ein weltweit gefragter FuE Partner in der Vorlaufs- und Vertragsforschung auf dem Gebiet seiner Geschäftsfelder Laser und Optik, Lasermesstechnik, Medizintechnik und Biophotonik sowie Lasermaterialbearbeitung. Hierzu zählen u. a. das Schneiden, Abtragen, Bohren, Schweißen und Löten sowie die Oberflächenbearbeitung, die Mikrofertigung und das Rapid Manufacturing. Übergreifend befasst sich das Fraunhofer ILT mit Laseranlagentechnik, Prozessüberwachung und -regelung, Modellierung sowie der gesamten Systemtechnik.

www.ilt.fraunhofer.de

Fraunhofer-Institut für Schicht und Oberflächentechnik IST

Das Fraunhofer IST bündelt als industrienahes FuE-Dienstleistungszentrum Kompetenzen auf den Gebieten Schichtherstellung, Schichtenanwendung, Schichtcharakterisierung und Oberflächenanalyse. Wissenschaftler, Techniker und Ingenieure arbeiten daran, Oberflächen der verschiedensten Grundmaterialien neue oder verbesserte Funktionen zu verleihen, um auf diesem Wege innovative, marktgerechte Produkte zu schaffen. Das Institut ist in folgenden Geschäftsfeldern tätig: Maschinen- und Fahrzeugtechnik, Luft- und Raumfahrt, Werkzeuge, Energie, Glas und Fassade, Optik, Information und Kommunikation sowie Mensch und Umwelt.

www.ist.fraunhofer.de

Fraunhofer Institute for Laser Technology ILT

The Fraunhofer Institute for Laser Technology ILT is worldwide one of the most important development and contract research institutes of its specific fields. Our technology areas cover the following topics: laser and optics, medical technology and biophotonics, laser measurement technology, and laser materials processing. This includes laser cutting, caving, drilling, welding, and soldering as well as surface treatment, micro processing and rapid manufacturing. Furthermore, the Fraunhofer ILT is engaged in laser plant technology, process control, modeling as well as in the entire system technology.

www.ilt.fraunhofer.de

Fraunhofer Institute for Surface Engineering and Thin Films IST

As an industry oriented R&D service center, the Fraunhofer IST is pooling competencies in the areas film deposition, coating application, film characterization, and surface analysis. Scientists, engineers, and technicians are busily working to provide various types of surfaces with new or improved functions and, as a result, help create innovative marketable products. The institute's business segments are: mechanical and automotive engineering, aerospace, tools, energy, glass and facade, optics, information and communication, life science and ecology.

www.ist.fraunhofer.de

DIE FRAUNHOFER-GESELLSCHAFT

THE FRAUNHOFER-GESELLSCHAFT

Forschen für die Praxis ist die zentrale Aufgabe der Fraunhofer-Gesellschaft. Die 1949 gegründete Forschungsorganisation betreibt anwendungsorientierte Forschung zum Nutzen der Wirtschaft und zum Vorteil der Gesellschaft. Vertragspartner und Auftraggeber sind Industrie- und Dienstleistungsunternehmen sowie die öffentliche Hand.

Die Fraunhofer-Gesellschaft betreibt in Deutschland derzeit 67 Institute und Forschungseinrichtungen. Rund 23 000 Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter, überwiegend mit natur- oder ingenieurwissenschaftlicher Ausbildung, erarbeiten das jährliche Forschungsvolumen von 2 Milliarden Euro. Davon fallen rund 1,7 Milliarden Euro auf den Leistungsbereich Vertragsforschung. Über 70 Prozent dieses Leistungsbereichs erwirtschaftet die Fraunhofer-Gesellschaft mit Aufträgen aus der Industrie und mit öffentlich finanzierten Forschungsprojekten. Knapp 30 Prozent werden von Bund und Ländern als Grundfinanzierung beigesteuert, damit die Institute Problemlösungen entwickeln können, die erst in fünf oder zehn Jahren für Wirtschaft und Gesellschaft aktuell werden.

Internationale Kooperationen mit exzellenten Forschungspartnern und innovativen Unternehmen sorgen für einen direkten Zugang zu den wichtigsten gegenwärtigen und zukünftigen Wissenschafts- und Wirtschaftsräumen.

Mit ihrer klaren Ausrichtung auf die angewandte Forschung und ihrer Fokussierung auf zukunftsrelevante Schlüsseltechnologien spielt die Fraunhofer-Gesellschaft eine zentrale Rolle im Innovationsprozess Deutschlands und Europas. Die Wirkung der angewandten Forschung geht über den direkten Nutzen für die Kunden hinaus: Mit ihrer Forschungs- und Entwicklungsarbeit tragen die Fraunhofer-Institute zur Wettbewerbsfähigkeit der Region, Deutschlands und Europas bei. Sie fördern Innovationen, stärken die technologische Leistungsfähigkeit, verbessern die Akzeptanz moderner Technik und sorgen für Aus- und Weiterbildung des dringend benötigten wissenschaftlich-technischen Nachwuchses.

Research of practical utility lies at the heart of all activities pursued by the Fraunhofer- Gesellschaft. Founded in 1949, the research organization undertakes applied research that drives economic development and serves the wider benefit of society. Its services are solicited by customers and contractual partners in industry, the service sector and public administration.

At present, the Fraunhofer-Gesellschaft maintains 67 institutes and research units. The majority of the more than 23,000 staff are qualified scientists and engineers, who work with an annual research budget of 2 billion euros. Of this sum, more than 1.7 billion euros is generated through contract research. More than 70 percent of the Fraunhofer-Gesellschaft's contract research revenue is derived from contracts with industry and from publicly financed research projects. Almost 30 percent is contributed by the German federal and Länder governments in the form of base funding, enabling the institutes to work ahead on solutions to problems that will not become acutely relevant to industry and society until five or ten years from now.

International collaborations with excellent research partners and innovative companies around the world ensure direct access to regions of the greatest importance to present and future scientific progress and economic development.

With its clearly defined mission of application-oriented research and its focus on key technologies of relevance to the future, the Fraunhofer-Gesellschaft plays a prominent role in the German and European innovation process. Applied research has a knock-on effect that extends beyond the direct benefits perceived by the customer: Through their research and development work, the Fraunhofer Institutes help to reinforce the competitive strength of the economy in their local region, and throughout Germany and Europe. They do so by promoting innovation, strengthening the technological base, improving the acceptance of new technologies, and

Ihren Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern bietet die Fraunhofer-Gesellschaft die Möglichkeit zur fachlichen und persönlichen Entwicklung für anspruchsvolle Positionen in ihren Instituten, an Hochschulen, in Wirtschaft und Gesellschaft. Studierenden eröffnen sich aufgrund der praxisnahen Ausbildung und Erfahrung an Fraunhofer-Instituten hervorragende Einstiegs- und Entwicklungschancen in Unternehmen.

Namensgeber der als gemeinnützig anerkannten Fraunhofer-Gesellschaft ist der Münchner Gelehrte Joseph von Fraunhofer (1787–1826). Er war als Forscher, Erfinder und Unternehmer gleichermaßen erfolgreich.

www.fraunhofer.de

helping to train the urgently needed future generation of scientists and engineers.

As an employer, the Fraunhofer-Gesellschaft offers its staff the opportunity to develop the professional and personal skills that will allow them to take up positions of responsibility within their institute, at universities, in industry and in society. Students who choose to work on projects at the Fraunhofer Institutes have excellent prospects of starting and developing a career in industry by virtue of the practical training and experience they have acquired.

The Fraunhofer-Gesellschaft is a recognized non-profit organization that takes its name from Joseph von Fraunhofer (1787–1826), the illustrious Munich researcher, inventor and entrepreneur.

NAMEN, DATEN, EREIGNISSE NAMES, DATA, ACTIVITIES



Besondere Gäste | Special Guests

Nail Akhmediev, Alexander Solntsev, Isabelle Staude

Australian National University Canberra, Australia

Antonio Ancona, Caterina Gaudio

CNR-IFN U.O.S. Bari, Italy

Antoine Camper

Ohio State University, USA

Francis Clube

EULITHA AG, Mikro- und Nanotechnologie,
Würenlingen, Schweiz

Chia-Hua Chan, Yen-Hung Chen

National Central University Jhongli, Taiwan

Claudio Conti

University Sapienza, Italy

Benjamin Eggleton

University of Sydney, Australia

Victor Fleurov

Tel Aviv University, Israel

Nicholas Hendricks

University of Massachusetts, Amherst, USA

LEFT *Bundesministerin für Bildung und Forschung Prof. Dr.*

Johanna Wanka und Prof. Dr. Reimund Neugebauer, Präsident der

Fraunhofer-Gesellschaft, testen die 3D-Hochgeschwindigkeits-

Vermessung des Fraunhofer IOF auf der Hannover Messe 2014. |

Federal Minister for Education and Research Prof. Dr. Johanna Wanka

and Prof. Dr. Reimund Neugebauer, President of the Fraunhofer-

Gesellschaft, trying the 3D high-speed measurement of the

Fraunhofer IOF at HMI 2014.

Flavio Horowitz

University of Porto Alegre, Institute for Physics, Brazil

Peter Herman

University of Toronto, Canada

Yves Jourlin

Université Jean Monnet Saint-Etienne, France

Vincent Laude

FEMTO-ST Institute Besançon, France

Arnan Mitchell

RMIT University Melbourne, Australia

Roberto Morandotti

Énergie, Matériaux et Télécommunications Research Center,
Institut national de la recherche scientifique, Varennes, Canada

Asger Mortensen

Technical University of Denmark, Lyngby

Beat Neuenschwander

Bern University of Applied Sciences, Department of Electrical
and Computer Engineering, Suisse

Mikael Rechtsman

Technion Haifa, Israel

Maria Timoffeeva

Sankt-Petersburg Academic University, Russia

Pasi Vahimaa

University of Eastern Finland, Finland

Réal Vallée

Université Laval, Centre d'optique, photonique et laser (COPL)
Québec, Canada

Philip Walter

Universität Wien, Österreich

Silke Weinfurter

University of Nottingham, England

Robert J. Williams

MQ Photonics Research Center, Macquarie University,
Sydney, Australia

Internationale Kooperationen | International Co-operations

Australia

MQ Photonics Research Center, Macquarie University, Sydney
Richard Mildren

Physics Department, University of Queensland, Brisbane
Andrew White

Nonlinear Physics Center, Australian National University,
Canberra
Dragomir Neshev

Austria

Institut für Quantenoptik und Quanteninformation,
Österreichische Akademie der Wissenschaften, Wien
Rupert Ursin

Physikalisches Institut, Universität Wien
Philip Walter

Institut für Biomedizinische Technik der Fachhochschule
Technikum Wien
Andreas Drauschke

Brazil

University of Porto Alegre, Institute for Physics,
Flavio Horowitz

Chile

Nonlinear Optics Center, University of Chile, Santiago de Chile
Mario Molina

Czech Republic

Brno University of Technology
Miloslav Ohlídal

France

Université Jean Monnet Saint-Etienne,
Olivier Parriaux

Institut de Chimie Moléculaire et des Matériaux d'Orsay
(ICMMO), Laboratoire de Physico-Chimie de L'Etat Solide
(LPCES), Université de Paris Sud 11, Orsay
Matthieu Lancry

Laboratoire Ondes et Matière d'aquitaine (LOMA), University
Bordeaux
Lionel Canioni

Great Britain

Imperial College London,
Molly Stevens

Indonesia

Institute for Technology Bandung,
Aleksander Iskander

Israel

Solid State Institute, Technion - Israel Institute of Technology,
Haifa
Moti Segev

Italy

SAPIENZA Università di Roma,
Francesco Michelotti

Insubria University,
Paolo Di Trapani

Politecnico di Torino,
Fabrizio Georges

Università di Torino,
Federico Bussolino

Japan

Tohoku University, Sendai,
Toshikuno Kaino

Mexico

Quantum Optics Group, Instituto Nacional de Astrofísica,
Óptica y Electrónica, Puebla
Hector Moya-Cessa

People's Republic of China

Tongji University
Xinbin Cheng

Russia

Space Research Institute Moscow
Alexander Yascovich

Spain

ICFO, Barcelona
Romain Quidant, Valerio Pruni, Yaroslav Kartashov

ICFO, Castelldefels
Lluís Torner

Switzerland

IMT University Neuchâtel,
Hans-Peter Herzig

Taiwan

Optical Sciences Center, National Central University,
Jhongli, Taiwan
Wei-Kun Chang

Messebeteiligungen | Fairs Participations

Photonics West 2014

4.–6.2.2014, San Francisco, USA

Analytica München 2014

1.–4.4.2014, Munich, Germany

HANNOVER MESSE 2014

7.–11.4.2014, Hannover, Germany

Control 2014

6.–9.5.2014, Stuttgart, Germany

OPTATEC 2014

20.–22.5.2014, Frankfurt/M., Germany

ILA Berlin 2014

20.–25.5.2014, Berlin, Germany

Eltern+Schülertag für die Berufswahl parentum 2014

2.10.2014, Jena, Germany

Fakuma 2014

14.–18.10.2014, Friedrichshafen, Germany

Firmenkontaktbörse der Ernst-Abbe-Fachhochschule Jena

15.–16.10.2014, Jena, Germany

VISION 2014

4.–6.11.2014, Stuttgart, Germany

Aus- und Weiterbildung |

Education and further training

Die umfangreichen Aktivitäten des Fraunhofer IOF auf dem Gebiet der Aus- und Weiterbildung erstrecken sich von der Ausbildung von Physikalaboranten und Industriemechanikern über die Betreuung von Praktikanten, von Bachelor-, Master- und Diplomarbeiten sowie von Doktoranden, das Halten von Vorlesungen, die Durchführung von Seminaren und Praktika an den Jenaer Hochschulen bis zur Organisation von Workshops und internationalen Konferenzen.

Comprehensive activities of Fraunhofer IOF in the field of education and further training range from professional training of laboratory technicians and industrial mechanics over the supervision of interns, graduates and postgraduates, giving lectures and seminars at the Jena universities up to the organization of workshops and international scientific conferences.

Vorlesungen | Lectures

Dr.-Ing. Erik Beckert

Optikmontage

Ernst-Abbe-Fachhochschule Jena

Prof. Dr. Norbert Kaiser

Beschichtungstechnologie

Nanooptik

Ernst-Abbe-Fachhochschule Jena

Prof. Dr. Gunther Notni

Komponenten und Systemtechniken der Bildverarbeitung, Qualitätsmanagement

Technische Universität Ilmenau

NAMEN, DATEN, EREIGNISSE | NAMES, DATA, ACTIVITIES

Prof. Dr. Andreas Tünnermann/Dr. Olaf Stenzel

Thin Film Optics

Friedrich-Schiller-Universität Jena

Prof. Dr. Andreas Tünnermann

Doktorandenseminar der Abbe-School of Photonics

Prof. Dr. Stefan Nolte

Atom- und Molekülphysik

Prof. Dr. Stefan Nolte/Jun.-Prof. Dr. Jens Limpert

Laser Physics

Dr. Frank Schrepel

Experimentelle Methoden der optischen Spektroskopie

Dr. habil. Uwe Detlef Zeitner

Micro- and Nano-Technology

Introduction to Optical Modelling

Friedrich-Schiller-Universität Jena

Conferences – Workshops – Events

Expertentreff des MNT

»Neue Technologien in der Mikrosystemtechnik«

25. Februar 2014, Fraunhofer IOF Jena

Technologieworkshop »Sensorik für die Luft- und Raumfahrt«, Veranstalter OptoNet e.V und MNT e.V.

14. Mai 2014, Leibnitz-Institut für Photonische Technologien Jena

55. HEIDELBERGER BILDVERARBEITUNGSFORUM - Praxistaugliche Bildverarbeitung: Messen, Modellieren und Lernen

1. Juli 2014, Abbe-Zentrum Beutenberg Campus, Jena

Innovationsallianz 3Dsensation - I³ Ideenworkshop für radikale Innovationen

10. Juli 2014, Fraunhofer IOF

10. Thementage Grenz- und Oberflächentechnik und 4. Kolloquium »Dünne Schichten in der Optik«

2.–4. September, Leipzig

OptoNet-Workshop "Ultra Precision Manufacturing of Aspheres and Freeforms"

8.–9. September 2014, Abbe-Zentrum Beutenberg Campus, Jena

Weiterbildung Optik - Modul Optische Schichten

15.–17. September 2014, Jena, Ernst-Abbe-Hochschule

amos-Workshop »Aufbau und Verbindungstechnik von optischen Mikrosystemen«

17. September 2014, Jena, Fraunhofer IOF

Bi-national Canada-Germany Workshop: Stable Packaging Technologies for high performance Optics and Optomechanics for Space Applications

3. Oktober 2014, Institut national de la recherche scientifique – Centre de recherche Énergie Matériaux Télécommunications (INRS-EMT), Montreal, Kanada

Tutorial "Freeform Metal Optics" auf der ICSO 2014

7.–10. Oktober, Teneriffa, Spanien

7. Fraunhofer Vision-Technologietag

15.–16. Oktober 2014, Fraunhofer-Gesellschaft München

German-Turkish Days at Fraunhofer IIS and Fraunhofer IOF: Digital Life, Internet of Things, Communication, Embedded and Photonics Systems

November 11–13, 2014

Preise | Prizes

Mentor Award der Society of Vacuum Coaters (SVC)

Norbert Kaiser

OSA Adolph Lomb Medal

Alexander Szameit

Rudolf-Kaiser-Preis 2014

Alexander Szameit

ACP Fellow for Teaching of Research

César Jáuregui Misas

Wissenschaftspreis für anwendungsorientierte Abschlussarbeiten der FSU in der Kategorie Doktorarbeiten

Sören Richter

Nachwuchspreis Green Photonics, Kategorie Dissertation

Christiane Präfke

Nachwuchspreis Green Photonics, Kategorie Dissertation/ Sonderpreis Thüringen

Luisa Coriand

**Nachwuchspreis Green Photonics, Kategorie Bachelor/
Sonderpreis Thüringen**

Marina Merker

**Best Student Talk Award, OSA Confernce "Advanced
Solid State Lasers", Paris**

Sven Breitkopf

Student Award ICUIL Conference 2014, Goa, Indien

Sven Breitkopf

**Best Student Paper (1. Platz), Photonics West 2014, "Fiber
Lasers XI: Technology, Systems, and Applications"**

Arno Klenke

**Best Student Talk (1. Platz), Photonics West 2014, "Fiber
Lasers XI: Technology, Systems, and Applications"**

Christian Gaida

Bachelorarbeiten I Bachelor Theses

Stefan Beck

**Entwicklung und Charakterisierung einer motorischen
Antriebseinheit mit vorgelagerter Positionserhaltung für
optische Fasern**

Ernst-Abbe-Fachhochschule Jena, 08/2014

Alexej Dmitriev

**Strukturierung optischer Oberflächen - Herstellung und
Messung von Strukturen auf planen Oberflächen**

Ernst-Abbe-Fachhochschule Jena, 10/2014

Thorsten Albert Goebel

**Femtosekundenpuls-Laser geschriebene Faser-Bragg-
Gitter**

Friedrich-Schiller-Universität Jena, 2014

Simon Grosche

**Goos-Hänchen and Imbert-Fedorov shifts in photonic
graphene**

Friedrich-Schiller-Universität Jena, 2014

Robert Hecht

**Untersuchung der Temperaturverteilung in Festkörpern
bei Bestrahlung mit Femtosekunden-Laserpulsen**

Friedrich-Schiller-Universität Jena, 2014

Tobias Heuermann

Aufbau eines Experiments zur kohärenten Anti-Stokes-

Raman-Spektroskopie mittels ultrakurzer Pulse

Friedrich-Schiller-Universität Jena, 2014

Friedrich Horschig

**Untersuchung zur Optimierung des optischen Durch-
bruchs in Wasser mittels zeitlicher Formung ultrakurzer
Laserpulse**

Friedrich-Schiller-Universität Jena, 2014

Martin Hubold

Erzeugung von Tiefenkarten mit plenoptischen Kameras

Ernst-Abbe-Fachhochschule Jena, 08/2014

Reinhard Jäckel

**Stabilitätsanalyse eines CO₂-Lasers zur Optimierung von
Prozessen der Glasfaserbearbeitung**

Ernst-Abbe-Fachhochschule Jena, 08/2014

Jan-Philipp Koester

**Charakterisierung von gepulst angesteuerten Hochleis-
tungsdioden, betrieben an den Grenzen ihrer zulässigen
Betriebsparameter**

Ernst-Abbe-Fachhochschule Jena, 09/2014

Mark Kremer

Topological Bound States in Non-Hermitian Systems

Friedrich-Schiller-Universität Jena, 2014

Sebastian Merx

**Kanteneffekte in der Bildgebung mit Terahertz-
Zeitbereichsspektroskopie-Systemen**

Ernst-Abbe-Fachhochschule Jena, 08/2014

Heike Müller

**Bewertung der Beschlageigenschaften von Antifog-
Beschichtungen auf Brillengläsern und Visieren**

Ernst-Abbe-Fachhochschule Jena, 03/2014

Lisa Pohle

**Präparation und Charakterisierung von porösen
SiO₂-Schichten für die Lösungsdotierung laseraktiver
Preformen**

Ernst-Abbe-Fachhochschule Jena, 08/2014

Maximilian Reif

**Untersuchungen zu inkjet-gedruckten, transparenten
piezoelektrischen Polymeraktoren**

Ernst-Abbe-Fachhochschule Jena, 10/2014

Sylvelin Reinhard

Untersuchung der Defektausbildung auf Polycarbonatoberflächen und deren Auswirkung auf das Plasmaätzen von Nanostrukturen

Ernst-Abbe-Fachhochschule Jena, 08/2014

Annika Tamara Schmitt

Ramanspektroskopie von ultrakurzpuls-induzierten Nanostrukturen in transparenten Materialien

Friedrich-Schiller-Universität Jena, 2014

Claudia Schneider

Verfahren zur Bestimmung der Barrierewirkung von dünnen Schichten auf der Basis von Reflexionsmessungen im NIR

Ernst-Abbe-Fachhochschule Jena, 04/2014

Stephan Schuhmann

Spektrale Verbreitung und zeitliche Kompression ultrakurzer Pulse hoher Leistung

Friedrich-Schiller-Universität, 2014

Kevin Srokos

Aufbau und Charakterisierung eines 3D-Triangulationsensors unter Verwendung von Zeilenkameras

Ernst-Abbe-Fachhochschule Jena, 06/2014

Eugen Stein

Alternative Verfahren für schnelle Bildgenerierung basierend auf Laser-Speckle-Projektion

Ernst-Abbe-Fachhochschule Jena, 09/2014

Diplomarbeiten | Diploma Theses

Soheil Mehrabkhani

Solving Transport of Intensity Equation using Fourier Method

Friedrich-Schiller-Universität Jena, 09/2014

Benjamin Fuchs

Schattenfotographische Untersuchung an Doppelpuls-Laserinduzierten optischen Durchbrüchen in Wasser

Friedrich-Schiller-Universität Jena, 10/2014

Masterarbeiten | Master Theses

Stefanie Böttcher

Entwicklung einer Experimentierreihe zum Thema Optik in der Sekundarstufe I

Friedrich-Schiller-Universität Jena, 2014

Shan Du

Optical Properties of alumina/aluminum fluoride mixture coatings prepared by evaporation

Friedrich-Schiller-Universität Jena, 03/2014

Rui Fan

The AC-method for finding initial system setups

Friedrich-Schiller-Universität Jena, 09/2014

Gashaw Fente

Optimization of segmented components in illumination systems

Friedrich-Schiller-Universität Jena, 06/2014

Martin Gebhardt

Peak power scaling of ultrafast, thulium-doped fiber lasers

Friedrich-Schiller-Universität Jena, 12/2014

Marcel Gerold

Ion beam correction of lithography substrates for high precision optical components

Friedrich-Schiller-Universität Jena, 01/2014

Kevin Grabowski

Untersuchungen der thermischen Formstabilität von übereutektischen AlSi-Substratmaterialien für athermale Metalloptiken

Ernst-Abbe-Fachhochschule Jena, 01/2014

Lorenz von Grafenstein

Stacking of Chirped Femtosecond Pulses with an Ultra-long Enhancement Cavity

Friedrich-Schiller-Universität Jena, 03/2014

Martin Heilemann

Siliziumoberflächenmodifikation durch Laserstrukturierung zur Realisierung hochempfindlicher Photodetektoren

Friedrich-Schiller-Universität Jena, 11/2014

Egor Khaidarov

Narrowband plasmonic resonances and their applications

Friedrich-Schiller-Universität Jena, 12/2014

- Eric Ofosu Kissi
Characterization of femtosecond laser induced nanogratings
Friedrich-Schiller-Universität Jena, 05/2014
- Sumera Kousar
Highly precise soldering of end mirrors of a miniature Diode-Pumped Solid-State laser for European Space Agency ExoMars mission
Friedrich-Schiller-Universität Jena, 05/2014
- Matthias Lorenz
Konzeption und Charakterisierung eines mehrkanaligen Near-To-Eye Displays mit Lichtleiter
Ernst-Abbe-Fachhochschule Jena, 08/2014
- Norbert Modsching
Wavelength dependence of Mode Instabilities in Ytterbium-doped High-power Fiber Amplifier
Friedrich-Schiller-Universität Jena, 07/2014
- Andrea Morales
Untersuchung einer Temperaturregelung für miniaturisierte Heizelemente in deformierbaren Spiegeln
Ernst-Abbe-Fachhochschule Jena, 05/2014
- Sergii Morozov
Relaxation dynamics of quantum systems in the vicinity of plasmonic structures
Friedrich-Schiller-Universität Jena, 2014
- Eric Müller
Dreidimensionale Objektvermessung aus Streifenbildern eines Zeitpunktes basierend auf Verstetigung mithilfe von Segmentvergleichen
Ernst-Abbe-Fachhochschule Jena, 09/2014
- Michael Müller
Multidimensional coherent pulse addition of ultrashort laser pulses
Friedrich-Schiller-Universität Jena, 12/2014
- Robert Müller
Entwicklung und Realisierung reaktiver Multischichtsysteme für laserinduzierte Bondverfahren
Friedrich-Schiller-Universität Jena, 12/2014
- Mateusz Oleszko
Simulation of the Stress induced birefringence in mounted optical elements
Friedrich-Schiller-Universität Jena, 05/2014
- Matthias Opel
Kamera-basierte winkelaufgelöste Streulichtmessung an optischen Komponenten
Ernst-Abbe-Fachhochschule Jena, 01/2014
- Kristin Pfeiffer
Atomlagenabscheidung von Vanadiumdioxid mit thermochromem optischem Effekt
Friedrich-Schiller-Universität Jena, 03/2014
- Ivan Fernandez de Jauregui Ruiz
DSP based mitigation of fiber non-linearity in fiber optic coherent communication systems
Friedrich-Schiller-Universität Jena, 09/2014
- Ilia Thiele
Investigation of nonlinear effects in plasmonic nanostructures by finite difference time domain simulations
Friedrich-Schiller-Universität Jena, 09/2014
- Sebastian Thomas
Charakterisierung eines linear-logarithmischen CMOS-Sensorsystems für die Erfassung von Musterprojektion unter hochdynamischen Belichtungsverhältnissen
Ernst-Abbe-Fachhochschule Jena, 10/2014
- David Unglaub
Hochsensitives multispektrales Detektionssystem für OPO-basierte Streulichtmessungen
Ernst-Abbe-Fachhochschule Jena, 01/2014
- María Johana Pachón Valencia
Ermittlung der Wellenfrontdeformation in einem Shack-Hartmann Wellenfrontsensor mittels Bestimmung der Position von Zentroiden und der Berechnung der lokalen Wellenfrontneigung in einer FPGA-Implementierung
Ernst-Abbe-Fachhochschule Jena, 12/2014
- Tobias Weihs
Aufbau und Charakterisierung eines Head-Up Displays mit Arrayprojektionsoptik
HAWK Göttingen, 12/2014
- Annika Wilms
Mehrkanal Terahertz Time-Domain Spektroskopie System bei 1030 nm
Ernst-Abbe-Fachhochschule Jena, 03/2014

Qian Xu
Characterization of magnetron-sputtered amorphous silicon layers
Friedrich-Schiller-Universität Jena, 12/2014

Yi Zhong
Imaging with Scheimpflug setup
Friedrich-Schiller-Universität Jena, 05/2014

Dissertationen | Dissertations

Dr. rer. nat. Dominik Bartl
Indirekte Ablationsprozesse mit ultrakurzen Laserpulsen am Beispiel des Dünnschichtsystems Glas-Molybdän
Friedrich-Schiller-Universität Jena, 04/2014

Dr.-Ing. Lars Dick
Spritzgießen hochpräziser freiformoptischer Komponenten
Friedrich-Schiller-Universität Jena, 12/2014

Dr. rer. nat. Sven Döring
Untersuchungen zur Bohrlochentwicklung beim Ultrakurzpuls laserbohren
Friedrich-Schiller-Universität Jena, 08/2014

Dr. rer. nat. Hans-Christoph Eckstein
Modenkontrolle in mikrostrukturierten Breistreifenlasern
Friedrich-Schiller-Universität Jena, 10/2014

Dr. rer. nat. Falk Eilenberger
Spatiotemporal, Nonlinear Optics and the Quest for the Observation of Discrete Light Bullets
Friedrich-Schiller-Universität Jena, 07/2014

Dr.-Ing. Alexander von Finck
Table top system for angle resolved light scattering measurement
Technische Universität Ilmenau, 05/2014

Dr. rer. nat. Florian Jansen
Very-Large-Mode-Area Fibers for High-Power Laser Operation
Friedrich-Schiller-Universität Jena, 01/2014

Dr. rer. nat. Stefanie Kroker
Siliziumbasierte resonante Wellenleitergitter für rausch- arme Resonatorkomponenten
Friedrich-Schiller-Universität Jena, 05/2014

Dr. rer. nat. Miroslaw Rekas
High power scaling of optical amplifiers on the basis of the Stimulated Raman Scattering in optical fibers
Friedrich-Schiller-Universität Jena, 05/2014

Dr. rer. nat. Sören Richter
Direct laser bonding of transparent materials using ultrashort laser pulses at high repetition rates
Friedrich-Schiller-Universität Jena, 03/2014

Dr.-Ing. Sebastian Scheiding
Vereinfachung der Systemmontage von metalloptischen IR-Spiegelteleskopen
Technische Universität Berlin, 01/2014

Dr.-Ing. Marcel Schulze
Stochastische Antireflexstrukturen in Kieselglas
Friedrich-Schiller-Universität Jena, 05/2014

Dr.-Ing. Maria Oliva
High efficiency blazed gratings in resonance domain
Friedrich-Schiller-Universität Jena, 12/2014

Dr.-Ing. Oliver Pabst
All Inkjet Printed Piezoelectric Polymer Actuators for Microfluidic Lab-on-a-Chip Systems
Friedrich-Schiller-Universität Jena, 12/2014

Dr.-Ing. Thomas Weber
Drahtgitterpolarisatoren für Anwendungen im UV-Spektralbereich
Friedrich-Schiller-Universität Jena, 04/2014

Schutzrechte | Intellectual Property

Patentoffenlegungen | Patent First Publications 2014

Beier, M.; Gebhardt, A.; Schmidt, E.; Litschel, R.
Verfahren zur zielgerichteten Justierung von optischen Bauelementen zu einer Bezugsachse
DE 10 2013 004 738 A1

Bräuer-Burchardt, C.; Notni, G.; Kühmstedt, P.
Verfahren und Vorrichtung zum berührungslosen Erfassen einer dreidimensionalen Kontur
DE 10 2012 013 079 A1

Bräuer-Burchardt, C.; Kühmstedt, P.; Notni, G.
Vorrichtung und Verfahren zum berührungslosen Messen

von Oberflächenkonturen

DE 10 2013 208 466 A1

Eckstein, C.; Zeitner, U.

Elektromagnetische Strahlung streuendes Element

DE 10 2013 003 441 A1

Kühmstedt, P.; Notni, G.; Breitbarth, A.

Verfahren und System zum berührungslosen Erfassen einer dreidimensionalen Oberfläche eines Objekts

DE 10 2012 022 952 A1

Lange, N.; Wippermann, F.

Elektrostatistischer Aktor und Verfahren zum Herstellen desselben

DE 10 2013 209 804 A1

Munkelt, C.; Schmidt, I.; Kühmstedt, P.; Notni, G.

Verfahren zum Zusammensetzen von Teilaufnahmen einer Oberfläche eines Objektes zu einer Gesamtaufnahme des Objektes und System zum Erstellen einer Gesamtaufnahme eines Objektes

DE 10 2012 023 623 A1

Nolte, S.; Gabor, M. (IAP); Bergner, K. (IAP)

Verfahren und System zum Bearbeiten eines Objekts mit einem Laserstrahl

DE 10 2013 204 222 A1

Oberdörster, A.; Brückner, A.; Wippermann, F.; Neubauer, H. (IIS); Schweiger, T. (IIS)

Abbildungsvorrichtung und Verfahren für eine Abbildungsvorrichtung

DE 10 2012 218 834 A1

Oberdörster, A.; Brückner, A.

Vorrichtung zur Aufnahme eines von einer Linse einer plenoptischen Kamera erzeugten Zwischenbilds und Plenoptische Kamera

DE 10 2013 200 059 A1

Oberdörster, A.; Brückner, A.; Wippermann, F.; Neubauer, H. (IIS); Schweiger, T. (IIS)

Abbildungsvorrichtung und Verfahren für eine Abbildungsvorrichtung

DE 10 2012 218 835 A1

Schulz, U.; Kaiser, N.; Munzert, P.; Ludwig, H. (IAP)

Verfahren zur Herstellung einer Entspiegelungsschicht auf einem Substrat und Substrat mit einer

Entspiegelungsschicht

DE 10 2013 103 075 A1

Sieler, M.; Schreiber, P.

Projektionsdisplay zur Erzeugung virtueller Bilder mittels Multiaperturanordnung

DE 10 2013 206 614 A1

Sieler, M.; Schreiber, P.; Riedel, A.;

Multiaperturprojektionsdisplay zur Anordnung und Verfahren zur distanzabhängigen Darstellung unterschiedlicher Bildinhalte

DE 10 2013 208 625 A1

Steglich, M. (IAP), Tünnermann, A. Kley, E.-B. Zilk, M. (IAP) Füchsel, K.

Strahlungsdetektierendes Halbleiterbauelement

DE 10 2012 109 243 A1

Wippermann, F., Lange, N.; Reimann, A.; Bräuer, A.

Polymere optische Komponenten mit integrierten mechanischen Strukturen mit thermisch induzierter, axialer Positionsänderung

DE 10 2013 209 814 A1

Wippermann, F., Reimann, A.; Bräuer, A.

Optische Struktur mit daran angeordneten Stegen und Verfahren zur Herstellung derselben

DE 10 2013 209 819 A1

Wippermann, F.; Brückner, A.; Lange, N.; Bräuer, A.

Verfahren zur Herstellung einer falschlichtunterdrückenden Struktur und Vorrichtung derselben

DE 10 2013 209 246 A1

Wippermann, F.; Reimann, A.; Dunkel, J.; Bräuer, A.

Vorrichtung und Verfahren zur Herstellung einer Struktur aus aushärtbarem Material durch Abformung

DE 10 2013 207 243 A1

Wippermann, F.; Reimann, A.; Lange, N.; Bräuer, A.

Optische Struktur mit daran angeordneten Stegen und Verfahren zur Herstellung derselben

DE 10 2013 209 829 A1

Wippermann, F.; Reimann, A.; Lange, N.; Bräuer, A.

Optische Struktur mit daran angeordneten Stegen und Verfahren zur Herstellung derselben

DE 10 2013 209 823 A1

Patenterteilungen | Patent Assignations 2014

- Böhme, S.; Peschel, T.; Eberhardt, R.; Tünnermann, A.; Limpert, J.
Vorrichtung zum Bearbeiten von zylindrischen Werkstücken
JP-5596021
- Bruchmann, C.; Beckert, E.; Peschel, T.; Damm, C.
Adaptiver deformierbarer Spiegel zur Kompensation von Fehlern einer Wellenfront
US 8,708,508 B2
- Brückner, A.; Berlich, R.; Bräuer, A.
Optikanordnung und Verfahren zur optischen Abtastung einer Objektebene mit einem Mehrkanalabbildungssystem
US 8,922,866
- Duparré, J.; Olivier, S.
Lens and Method for Manufacturing the same
US 8,792,190 B2
JP 5587991
- Eckstein, C.; Zeitner, U.; Schmid, W. (Osram OS)
Kantenemittierender Halbleiterlaser
JP 5529151
- Fuchs, F.; Zeitner, U.
Reflexionsbeugungsgitter und Verfahren zu dessen Herstellung
DE 10 2012 103 443 B4
- Kley, E.-B.; Kämpfe, T.; Tünnermann, A.
Ortsfrequenzfiltervorrichtung und Verfahren zur Ortsfrequenzfilterung von Laserstrahlen
DE 10 2004 058 044 B4
- Kley, E.-B.; Brückner, F.; Clausnitzer, T. (IAP)
Monolithischer dielektrischer Spiegel
DE 10 2007 047 681 B4
- Kühmstedt, P.; Bräuer-Burhardt, C.; Zwick, S.; Gebhardt, A.; Beier, M.
Verfahren und Vorrichtung zur Messung der Position und Justage eines asphärischen Körpers
DE 10 2012 023 377 B3
- Limpert, J.; Tünnermann, A.; Schimpf, D. (IAP)
Vorrichtung zum Verstärken von Lichtimpulsen
EP 2 324 543 B1
US 8,659,821B2
- Limpert, J.; Tünnermann, A.; Schimpf, D. (IAP); Seise, E. (IAP); Röser, F. (IAP)
Vorrichtung und Verfahren zum Verstärken von Lichtimpulsen
US 8,760,753 B2
- Michaelis, D.; Wächter, C.; Danz, N.; Flämmich, M.
Strahlformer zur effizienten Erzeugung von beliebigen, flächenhaften Abstrahlprofilen von Flächenlichtquellen oder Lichtquellen in reflektierenden Hausungen
DE 10 2009 016 234 B4
JP 5531090
- Munkelt, C.; Schmidt, I.; Kühmstedt, P.; Notni, G.
Vorrichtung und Verfahren zum berührungslosen Erfassen räumlicher Koordinaten einer Oberfläche
US 8,791,997 B2
- Munkelt, C.; Schmidt, I.; Kühmstedt, P.; Notni, G.
Verfahren zum Zusammensetzen von Teilaufnahmen einer Oberfläche eines Objektes zu einer Gesamtaufnahme des Objektes und System zum Erstellen einer Gesamtaufnahme eines Objektes
DE 10 2012 023 623 B4
- Munzert, P.; Scheler, M.; Kaiser, N.; Schulz, U.
Verfahren zur Herstellung einer Nanostruktur an einer Kuntoberfläche
KR 10-1430561
- Nodop, D.; Limpert, J.; Tünnermann, A.
Faserverstärkersystem
US 2014/0002893 A1
- Oberdörster, A.; Brückner, A.; Wippermann, F.
Bildaufnahmevorrichtung und Verfahren zum Aufnehmen eines Bildes
US 8,717,485 B2
JP 536723
- Präfer, C.; Schulz, U.; Kaiser, N.
Antireflexschichtsystem und Verfahren zu dessen Herstellung
DE 10 2010 006 133 B4
- Schenk, C.; Risse, S.; Harnisch, G.; Peschel, T.; Bauer, R.
Aerostatische Lageranordnung mit zugeordneter elektrostatischer Vorspanneinheit, insbesondere für die Vakuumanwendung
DE 10 2008 046 636 B4

Schenk, C.; Risse, S.; Harnisch, G.; Peschel, T.; Bauer, R.
Aerostatisch geführtes Tischsystem für die Vakuumanwendung
EP 2 187 434 B1

Schmälzle, P.; Duparré, J.; Dannberg, P.; Bräuer, A.; Punke, M.
(Universität Karlsruhe); Völkel, R. (Suss MicroOptics)
Mikrolinsen-Array mit integrierter Beleuchtung
US 8,792,174 B2

Schulz, U.; Kaiser, N.; Munzert, P.; Bollwahn, N.; Rose, Klaus (ISC)
Verfahren zur Herstellung einer reflexionsmindernden Schicht und optisches Element mit einer reflexionsmindernden Schicht
DE 10 2007 059 886 B4

Schulz, U.; Kaiser, N.
Verfahren zur Bestimmung der Feuchtebarriere von dünnen Schichten
DE 10 2013 104 846 B3

Sieler, M.; Förster, E.; Schreiber, P.
Projektionsdisplay und dessen Verwendung
US 8,777,424 B2

Sieler, M.; Schreiber, P.; Förster, E.
Projektionsdisplay und Verfahren zum Anzeigen eines Gesamtbilds
US 8,794,770 B2
TW 1454826

Tünnermann, A.; Kämpfe, T.; Kley, E.B.
Dielektrische Pinhole zur Ortsfrequenzfilterung von Laserstrahlen
DE 10 2004 058 044 B4

Tünnermann, A.; Kalkowski, G.; Eberhardt, R.; Nolte, S. (IAP)
Verfahren zum Lasergestützten Bonden, derart gebundene Substrate und deren Verwendung
US 8,778,121 B2

Weber, T. (IAP); Kley, E.B.
Polarisator und Verfahren zur Herstellung eines Polarisators
DE 10 2011 079 030 B4

Wippermann, F.; Duparré, J.; Bräuer, A.; Brückner, A.
Vorrichtung, Bildverarbeitungsvorrichtung und Verfahren zur optischen Abbildung (elektronisches Clusterauge)
EP 2 429 176 A2
US 8,629,930 B2

Wippermann, F.; Duparré, J.; Dannberg, P.; Bräuer, A.
Verfahren und Vorrichtung zum Herstellen einer Struktur, Abformwerkzeug
US 13/314,904

Wippermann, F.; Duparré, J.; Dannberg, P.; Bräuer, A.
Optischer Schichtstapel und Verfahren zu dessen Herstellung
KR 10-1354478

Wippermann, F.; Duparré, J.; Dannberg, P.; Bräuer, A.
Verfahren zum Herstellen einer Struktur, optisches Bauteil, optischer Schichtstapel
DE 10 2009 055 088.7 B4
US 8,641,936 B2
KR 10-1375984

Wippermann, F.; Brückner, A.; Bräuer, A.
Multiaperturvorrichtung und Verfahren zur Erfassung eines Objektbereichs (3D Clusterauge)
DE 10 2013 222 780.9 B3

Yulin, S.; Feigl, T.; Benoit, Kaiser, N.
Thermisch stabiler Multilayer-Spiegel für den EUV- Spektralbereich
KR 10-1350325
CH P2006,0126CAN / CH 2,640,511

Wissenschaftliche Publikationen | Scientific Publications

Bücher | Books

Coriand, Luisa
Roughness, wetting, and optical properties of functional surfaces
Hrsg. Fraunhofer IOF, Jena (2014), ISBN 978-3-8396-0649-0

Heinrich, M.; Nolte, S.; Szameit, A.
Nonlinear light propagation in laser-written waveguide arrays
G. Marowski; Planar waveguides and other confined geometries: Theory, Technology, Production and Novel Applications
ISBN 978-1-4939-1179-0

Helgert, C. and Pertsch, T.
Nanogratings in Fused Silica: Structure, Formation and Applications
Sakabe, et al.; Linear and Nonlinear Nanooptics
ISBN 978-3-319-12217-5

Stenzel, Olaf
Optical Coatings, Springer Series in Surface Sciences
ISBN 978-3-642-54062-2

Risse, Stefan
Doppelsphärische Luftlager aus Glas und Glaskeramik
Bartz, Wilfried J. et al., Luftlagerungen und Magnetlager,
Grundlagen und Anwendungen
ISBN978-3-8169-1962-9, (2014) S.169-159

Zeitschriften | Journals

Albooyeh, M.; Kruk, S.; Menzel, C.; Helgert, C.; Kroll, M.;
Krysinski, A.; Decker, M.; Neshev, D.N.; Pertsch, Thomas.;
Etrich, C.; Rockstuhl, C.; Tretyakov, S.A.; Simovski, C.R.; Kivshar,
Y.S.
**Resonant metasurfaces at oblique incidence: Interplay of
order and disorder**
Scientific Reports, 4 (2014) 27 4484, ISSN 2045-2322

Angelini, Angelo; Barakat, Elsie; Munzert, Peter; Boarino,
Luca; Leo, Natascia de; Enrico, Emanuele; Giorgis, Fabrizio;
Herzig, Hans Peter; Pirri, Candido Fabrizio; Descrovi, Emiliano
**Focusing and Extraction of Light mediated by Bloch
Surface Waves**
Scientific Reports 4 (2014) 5428, ISSN 2045-2322

Angelini, Angelo; Lamberti, A.; Ricciardi, Serena; Frascella,
Francesca; Munzert, Peter; De Leo, Natascia; Descrovi,
Emiliano
**In-plane 2D focusing of surface waves by ultrathin
refractive structures**
Optics Letters; 39 (2014) 22 p. 6391-6394, ISSN 0146-9592

Angelini, Angelo; Munzert, Peter; Enrico, Emanuele, De Leo,
Natascia; Scaltrito, Luciano; Boarino, Luca; Giorgis, Fabrizio;
Descrovi, Emiliano
**Surface-Wave-Assisted Beaming of Light Radiation from
Localized Sources**
ACS Photonics 1 (2014) 7 p. 612-617, ISSN 2330-4022

Ballarini, Mirko; Danz, Norbert; Frascella, Francesca; Ricciardi,
Serena; Rivolo, Paola; Mandracci, Pietro; Napione, Lucia;
Dominici, Lorenzo; Sinibaldi, Alberto; Michelotti, Francesco;
Giorgis, Fabrizio; Bussolino, Federico; Descrovi, Emiliano
**Bloch surface waves on dielectric photonic crystals for
biological sensing**
Lecture Notes in Electrical Engineering 162 (2014) p. 107-111,
ISSN 1876-1100

Beier, Franz; Otto, Hans-Jürgen; Jauregui, Cesar; Vries, Oliver
de; Schreiber, Thomas; Limpert, Jens; Eberhardt, Ramona;
Tünnermann, Andreas
**1009 nm continuous-wave ytterbium-doped fiber ampli-
fier emitting 146 W**
Optics Letters 39 (2014) 13 p. 3725-3727, ISSN 0146-9592

Bidinger, Johannes; Ackermann, Roland; Cattaneo, Giorgio;
Kammel, Robert; Nolte, Stefan
A Feasibility Study on Femtosecond Laser Thrombolysis
Photomedicine and Laser Surgery 32 (2014) 1 p. 17-22, ISSN
1557-8550

Bingel, Astrid; Füchsel, Kevin; Kaiser, Norbert; Tünnermann,
Andreas
ZnO:Al films prepared by inline DC magnetron sputtering
Advanced Optical Technologies 3 (2014) 1 p. 103-111, ISSN
2192-8576

Bischoff, Martin; Nowitzki, Tobias; Voß, Oliver; Wilbrandt,
Steffen; Stenzel, Olaf
**Post-deposition treatment of IBS coatings for UV applica-
tions with optimized thin film stress properties**
Applied Optics 53 (2014) 4 p. A212-A220, ISSN 0003-6935

Bleiner, David; Yulin, Sergiy; Martynczuk, Julia; Ruiz-Lopez,
Mabel; Arbelo, Yunieski; Balmer, Jürg E.; Günther, Detlef
**Actinic damage of Y/Mo multilayer optics in a table-top
plasma-driven x-ray laser**
Applied Optics 53 (2014) 22 p.4894-4902, ISSN 1559-128X

Blumröder, U.; M. Steglich, F.Schrempel, P. Hoyer, S. Nolte
THz emission from argon implanted silicon surfaces
PHYSICA STATUS SOLIDI B-BASIC SOLID STATE PHYSICS(2014)
252(1), 105-111

Bourgin, Yannick; Käsebier, Thomas; Zeitner, Uwe Detlef
**250 nm period grating transferred by proximity i-line
mask-aligner lithography**
Optics Letters 39 (2014) 6 p. 1665-1668, ISSN 0146-9592

Brahm, Anika; Döring, Sebastian; Wilms, Annika; Notni;
Gunther; Nolte, Stefan; Tünnermann, Andreas
**Laser-generated Broadband Antireflection Structures for
Freeform Silicon Lenses at Terahertz Frequencies**
Applied Optics 53 (2014) 13 p. 2886-2891, ISSN 0003-6935

Brahm, Anika; Tymoshchuk, Maryna; Wichmann, Felix; Merx,
Sebastian; Notni, Gunther; Tünnermann, Andreas
Wavelet Based Identification of Substances in Terahertz

Tomography Measurements

Journal of Infrared Millimeter and Terahertz Waves 35 (2014) 11 p. 974-986, ISSN 1866-6892

Brahm, Anika; Wilms, Annika; Dietz, Roman J. B.; Göbel, Thorsten; Schell, Martin; Notni, Gunther; Tünnermann, Andreas
Multichannel terahertz time-domain spectroscopy system at 1030 nm excitation wavelength

Optics Express 22 (2014) 11 p. 12982-12993, ISSN 1094-4087

Brahm, Anika; Wilms, Annika; Tymoshchuk, Maryna; Pradarutti, Constanze; Notni, Gunther; Tünnermann, Andreas
Optical Effects at projection measurements for Terahertz tomography

Optics & Laser Technology 62 (2014) p. 49-57, ISSN 0030-3992

Bräuer-Burchardt, Christian; Breitbarth, Andreas; Kühmstedt, Peter; Notni, Gunther

High-speed three-dimensional measurements with a fringe projection-based optical sensor

Optical Engineering 53 (2014) 11 Art.112213, ISSN 0036-1860

Breitkopf, S.; T. Eidam, A. Klenke, L. von Grafenstein, H. Carstens, S. Holzberger, E. Fill, T. Schreiber, F. Krausz, A. Tünnermann, I. Pupeza, J. Limpert
A concept for multiterawatt fibre lasers based on coherent pulse stacking in passive cavities

LIGHT: SCIENCE & APPLICATION (2014) 3, e211

Brocklesby, William; Nilsson, Johan Olof; Schreiber, Thomas; Limpert, Jens; Brignon, Arnaud; Bourderionnet, Jérôme; Lombard, Laurent; Michau, Vincent; Hanna, M.; Zaouter, Yoann; Tajima, T.; Mourou, Gérard A.

ICAN as a new laser paradigm for high energy, high average power femtosecond pulses

European Physical Journal: Special Topics 223 (2014) 6 p. 1189-1195, ISSN 1951-6355

Buschlinger, Robert; Nolte, Stefan; Peschel, Ulf
Self-organized pattern formation in laser-induced multiphoton ionization

Physical Review B 89 (2014) 18 184306, ISSN 1098-0121

Carstens, Henning; Lilienfein, Nikolai; Holzberger, Simon; Jocher, Christoph; Eidam, Tino; Limpert, Jens; Tünnermann, Andreas; Weitenberg, Johannes; Yost, D.C.; Alghamdi, A.; Alahmed, Z.; Azzeer, A.; Apolonski, Alexander; Fill, Ernst
Megawatt-scale average-power ultrashort pulses in an enhancement cavity

Optics Letters 39 (2014) 9 p. 2595-2598, ISSN 0146-9592

Chen, Xiaoying; Zhao, Lili; Fu, Xinji; You, Lijun; Stenzel, Olaf; Kämmer, Helena; Dreisow, Felix; Nolte, Stefan; Song, Lixin
Effect of oxygen vacancies on the laser-induced damage resistance of $Y_{0.26}Hf_{0.74}O_x$ thin films

Optics Letters 39 (2014) 22, p. 6470-6473, ISSN 0146-9592

Dannberg, Peter; Wippermann, Frank; Brückner, Andreas; Matthes, Andre; Schreiber, Peter; Bräuer, Andreas
Wafer-Level Hybrid Integration of Complex Micro-Optical Modules

Micromachines 5 (2014) 2 p. 325-340, ISSN 2072-666X

Descrovi, Emiliano; Morrone, Davide; Angelini, Angelo; Frascella, Francesca; Ricciardi, Serena; Rivolo, Paola; Leo, Natascia de; Boarino, Luca; Munzert, Peter; Michelotti, Francesco; Giorgis, Fabrizio

Fluorescence imaging assisted by surface modes on dielectric multilayers

The European Physical Journal D: Atomic, molecular and optical physics 68 (2014) 3 Art. 53, ISSN 1434-6060

Dietrich, Kay; Menzel, Christoph; Lehr, Dennis; Puffky, Oliver; Hübner, U.; Pertsch, Thomas; Tünnermann, Andreas; Kley, Ernst-Bernhard

Elevating optical activity: Efficient on-edge lithography of three-dimensional starfish metamaterial

Applied Physics Letters 104 (2014) 19 193107, ISSN 0003-6951

Dietz, Roman; Brahm, Anika; Velauthapillai, Ajanth; Wilms, Annika; Lammers, Christian; Globisch, Bernd; Koch, Martin; Notni, Gunther; Tünnermann, Andreas; Göble, Thorsten; Schell, Martin

Low temperature grown photoconductive antennas for pulsed 1060 nm excitation: Influence of excess energy on the electron relaxation

Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves (2014) DOI 10.1007/s10762-014-0119-3, ISSN 1866-6892

Duparré, Angela; Ristau, Detlev
Optical interference coatings measurement problem 2013

Applied Optics 53 (2014) 4 p.A281-A286, ISSN 0003-6935

Eichelkraut, Toni; Weimann, Sonja; Stützer, Simon; Nolte, Stefan; Szameit, Alexander

Radiation-loss management in modulated waveguides

Optics Letters, 39 (2014) 24 p.6831-6834, ISSN 0146-9592

Eilenberger, F.; K. Prater, S. Minardi, R. Geiss, U. Röpke, J. Kobelke, K. Schuster, H. Bartelt, S. Nolte, A. Tünnermann, T. Pertsch

A twister of light bullets

Nature Photonics(2014) 8, 169

Elsmann, Tino; Lorenz, Adrian; Yazd, Nazila Safari; Habisreuther, Tobias; Dellith, Jan; Schwuchow, Anka; Bierlich, Joerg; Schuster, Kay; Rothhardt, Manfred; Kido, Ladislav; Bartelt, Hartmut

High temperature sensing with fiber Bragg gratings in sapphire-derived all-glass optical fibers

Optics Express 22 (2014) 22 p. 26831-26839, ISSN 10944087

Finck, Alexander von; Herffurth, Tobias; Schröder, Sven; Duparré, Angela; Sinzinger, Stefan

Characterization of Optical Coatings using a Multi-Source Table Top Scatterometer

Applied Optics 53 (2014) 4 p. A259-A269, ISSN 0003-6935

Floreano, Dario; Pericet-Camara, Ramon; Viollet, Stephane; Ruffier, Franck; Brückner, Andreas; Leitel, Robert; Buss, Wolfgang; et al.

Miniature curved artificial compound eyes

Proceedings of the National Academy of Sciences 110 (2013) 23 9267-9272

Gaida, Christian; Stutzki, Fabian; Jansen, Florian; Otto, Hans-Jürgen; Eidam, Tino; Jauregui, Cesar; de Vries, Oliver; Limpert, Jens; Tünnermann, Andreas

Triple-clad large-pitch fibers for compact high-power pulsed fiber laser systems

Optics Letters 39 (2014) 2 p. 209-211, ISSN 0146-9592

Geiss, Reinhard; Diziain, Séverine; Steinert, Michael; Schrepel, Frank; Kley, Ernst-Bernhard; Tünnermann, Andreas; Pertsch, Thomas

Photonic crystals in lithium niobate by combining focussed ion beam writing and ion-beam enhanced etching

Physica Status Solidi A 21 (2014) 10 p. 2421-2425, ISSN 1862-6319

Gödeker, Christoph; Schulz, Ulrike; Kaiser, Norbert; Tünnermann, Andreas

Antireflection coating for sapphire with consideration of mechanical properties

Surface and Coatings Technology 241 (2014) 25 p. 59-63, ISSN 0257-8972

Gonzalez-Julian, Jesus ; Cedillos-Barraza, Omar ; Döring, Sven; Nolte, Stefan ; Guillon, Olivier ; Lee, William E.

Enhanced oxidation resistance of ZrB₂/SiC composite through in situ reaction of gadolinium oxide in patterned surface cavities

Journal of the European Ceramic Society 34 (2014) 16 p. 4157–4166, ISSN 0955-2219

Gottschall, Thomas; Meyer, Tobias; Baumgartl, Martin; Dietzek, Benjamin; Popp, Jürgen; Limpert, Jens; Tünnermann, Andreas

Fiber-based optical parametric oscillator for high resolution coherent anti-Stokes Raman scattering (CARS) microscopy

Optics Express 22 (2014) 18 p. 21921-21928, ISSN 1094-4087

Gräfe, Markus; Heilmann, René; Perez-Leija, Armando; Keil, Robert; Dreisow, Felix; Heinrich, Matthias; Moya-Cessa, Hector; Nolte, Stefan; Christodoulides, Demetrios N.; Szameit, Alexander

On-chip generation of high-order single-photon W-states

Nature Photonics 8 (2014) p. 791-795, ISSN 1749-4885

Guzmán-Silva, D.; Mejía-Cortés, C.; Bandres, M.; Rechtsman, M.; Weimann, S.; Nolte, Stefan; Segev, M.; Szameit, A.; Vicencio, R.

Experimental observation of bulk and edge transport in photonic Lieb lattices

New Journal of Physics 16 (2014) June Article number 063061, ISSN 13672630

Hädrich, Steffen; Klenke, Arno; Rothhardt, Jan; Krebs, Manuel; Hoffmann, Armin; Pronin, Oleg; Pervak, Vladimir; Limpert, Jens; Tünnermann, Andreas

High photon flux table-top coherent extreme ultraviolet source

Nature Photonics 8 (2014) 10 p. 779-783, ISSN 1749-4885

Heilmann, René; Gräfe, Markus; Nolte, Stefan; Szameit, Alexander

Arbitrary photonic wave plate operations on chip: Realizing Hadamard, Pauli-X, and rotation gates for polarisation qubits

Scientific Reports 4 (2014) Article No. 4118, ISSN 2045-2322

Heinrich, Matthias; Rechtsman, Mikael C.; Dreisow, Felix; Nolte, Stefan; Segev, Mordechai; Szameit, Alexander

Enhancement of the ensemble-averaged coupling between defects in random environments

Optics Letters 39 (2014) 12 p. 3599-3602, ISSN 15394794

Heinrich, Matthias; Miri, Mohammad-Ali; Stützer, Simon;
Nolte, Stefan; Christodoulides, Demetrios N.;
Szameit, Alexander

Observation of supersymmetric scattering in photonic lattices

Optics Letters 39 (2014) 21 p. 6130-6133, ISSN 0146-9592

Heinrich, M.; M.-A. Miri, D. N. Christodoulides, S. Stützer,
S. Nolte, A. Szameit

Supersymmetric Mode Converters and Transformation Optics

OPTICS AND PHOTONICS NEWS (2014) 25 (12), 40

Heinrich, M.; M.-A. Miri, S. Stutzer, R. El-Ganainy, S. Nolte,
A. Szameit, D. N. Christodoulides

Supersymmetric mode converters

Nature Communications(2014) 5, 3698

Heist, Stefan; Mann, Andreas; Kühmstedt, Peter;
Schreiber, Peter; Notni, Gunther

Array projection of aperiodic sinusoidal fringes for high-speed three-dimensional shape measurement

Optical Engineering 53 (2014) 11 112208, ISSN 0036-1860

Herffurth, Tobias; Trost, Marcus; Schröder, Sven;
Täschner, Kerstin; Bartzsch, Hagen; Frach, Peter;
Duparré, Angela; Tünnermann, Andreas

Roughness and Optical Losses of Rugate Coatings

Applied Optics 53 (2014) 4 p. A351-A359, ISSN 0003-6935

Herzog, Christin; Beckert, Erik; Stefan Nagl

Rapid Isoelectric Point Determination in a Miniaturized Preparative Separation Using Jet-Dispensed Optical pH Sensors and Micro Free-Flow Electrophoresis

Analytical Chemistry 86 (2014) 19 p. 9533–9539, ISSN 0003-2700

Hooker, Simon; Bartolini, Riccardo; Mangles, Stuart;
Tünnermann, Andreas; Corner, Laura; Limpert, Jens;
Seryi, Andrei; Walczak, Roman

Multi-Pulse Laser Wakefield Acceleration: A New Route to Efficient, High-Repetition-Rate Plasma Accelerators and High Flux Radiation Sources

Journal of Physics B: Atomic, Molecular and Optical Physics 47 (2014) 23 Article No.234003, ISSN 0953-4075

Jobst, Paul Johannes; Stenzel, Olaf; Schürmann, Mark;
Modsching, Norbert; Yulin, Sergiy; Willbrandt, Steffen;
Gäbler, Dieter; Kaiser, Norbert; Tünnermann, Andreas
Optical properties of unprotected and protected

sputtered silver films: Surface morphology vs. UV/VIS reflectance

Advanced Optical Technologies 3 (2014) 1 p. 91-102, ISSN 2192-8576

Kammel, Robert; Ackermann, Roland; Thomas, Jens;
Götte, Jörg; Skupin, Stefan; Tünnermann, Andreas;
Nolte, Stefan

Enhancing precision in fs-laser material processing by simultaneous spatial and temporal focusing

Light: Science & Applications 3 (2014) e169, ISSN 2047-7538

Kharitonov, S.; R. Kiselev, A. Kumar, I. F. d. J. Ruiz, X. Shi,
K. Leosson, T. Pertsch, S. Nolte, S. Bozhevolnyi, A. Chipouline
Data transmission in long-range dielectric-loaded surface plasmon polariton waveguides

Optics Express (2014) 22 (22), 26742-26751

Kinast, Jan; Hilpert, Enrico; Rohloff, Ralf-Rainer;
Gebhardt, Andreas; Tünnermann, Andreas

Thermal expansion coefficient analyses of electroless nickel with varying phosphorous concentrations

Surface and Coatings Technology 259 (2014) p. 500-503, ISSN 0257-8972

Kienel, Marco; Klenke, Arno; Eidam, Tino; Hädrich, Steffen;
Limpert, Jens; Tünnermann, Andreas

Energy scaling of femtosecond amplifiers using actively controlled divided-pulse amplification

Optics Letters 39 (2014) 4 p. 1049-1052, ISSN 0146-9592

Kienel, Marco; Müller, Michael; Demmler, Stefan;
Rothhardt, Jan; Klenke, Arno; Eidam, Tino; Limpert, Jens;
Tünnermann, Andreas

Coherent beam combination of Yb:YAG single-crystal rod amplifiers

Optics Letters 39 (2014) 11 p. 3278-3281, ISSN 0146-9592

Klein, Angela E. ; Janunts, Norik; Steinert, Michael;
Tünnermann, Andreas; Pertsch, Thomas

Polarization-Resolved Near-Field Mapping of Plasmonic Aperture Emission by a Dual-SNOM System

Nano Letters 14 (2014) 9 p. 5010-5, ISSN 1530-6984

Klein, Angela; Schmidt, Carsten; Liebsch, Mattes;
Janunts, Norik; Dobynde, Mikhail; Tünnermann, Andreas;
Pertsch, Thomas

Highly sensitive mode mapping of whispering-gallery modes by scanning thermocouple-probe microscopy

Optics Letters 39 (2014) 5 p. 1157-1160, ISSN 0146-9592

Kleiner, Bernhard; Munkelt, Christoph; Thorhallsson, Torfi;
Notni, Gunther; Kühmstedt, Peter; Schneider, Urs

**Handheld 3D Scanning with Automatic Multi-View
Registration Based on Visual-Inertial Navigation**

International Journal of Optomechatronics 8 (2014) 4 p.
313-325, ISSN 1559-9612

Klenke, Arno; Haedrich, Steffen; Eidam, Tino; Rothhardt, Jan;
Kienel, Marco; Demmler, Stefan; Gottschall, Thomas;
Limpert, Jens; Tünnermann, Andreas

**22 GW peak-power fiber chirped-pulse-amplification
system**

Optics Letters 39 (2014) 24 p. 6875-6878, ISSN 0146-9592

Klenke, Arno; Hädrich, Steffen; Kienel, Marco; Eidam, Tino;
Limpert, Jens; Tünnermann, Andreas

**Coherent combination of spectrally broadened femtose-
cond pulses for nonlinear compression**

Optics Letters 39 (2014) 12 p. 3520-3522, ISSN 0146-9592

Kowarschik, Richard; Notni, Gunther

Hochdynamische 3D-Messverfahren

Photonik 5/2014 S.30-33, ISSN 1432-9778

Kretschmer, Florian; Mühlig, Stefan; Hoeppener, Stephanie;
Winter, Andreas; Hager, Martin D.; Rockstuhl, Carsten;
Pertsch, Thomas; Schubert, Ulrich Sigmar

**Survey of plasmonic nanoparticles: From synthesis to
application**

Particle and Particle Systems Characterization 31 (2014) 7 p.
721-744, ISSN 15214117

Kretschmer, F.; M. Fruhnert, R. Geiss, U. Mansfeld,
C. Höppener, S. Hoeppener, C. Rockstuhl, T. Pertsch,
U. S. Schubert

**Plasmonic nanoparticle clusters with tunable plasmonic
resonances in the visible spectral region**

Journal of Materials Chemistry C (2014) 2, 6415-6422

Kühl, Thomas; Bagnoud, Vicent; Stöhlker, T.; Litvinov, Yu A.;
Winters, Danyal F A.; Zielbauer, Bernhard; Backe, Hartmut;
Spielmann, C.; Seres, J.; Tünnermann, Andreas; et al.

**Strong-field physics using lasers and relativistic heavy
ions at the high-energy storage ring hesr at fair**

Journal of Physics: Conference Series 488 (2014) 14 142003,
ISSN 1742-6588

Lange, Nicolas; Wippermann, Frank; Beckert, Erik; Eberhardt,
Ramona; Tünnermann, Andreas

Polymer-Based Pull-In Free Electrostatic Microactuators

Fabricated on Wafer-Level

Journal of Microelectromechanical Systems DOI: 10.1109/
JMEMS.2014.2360993 (2014), ISSN 1057-7157

Lehneis, Reinhold; Jauregui, Cesar; Steinmetz, Alexander;
Limpert, Jens; Tünnermann, Andreas

**Smoothed spectra for enhanced dispersion-free pulse
duration reduction of passively Q-switched microchip
lasers**

Optics Letters 39 (2014) 3 p. 505-508, ISSN 0146-9592

Lehneis, Reinhold; Steinmetz, Alexander; Limpert, Jens;
Tünnermann, Andreas

**All-fiber pulse shortening of passively Q-switched micro-
chip laser pulses down to sub-200 fs**

Optics Letters 39 (2014) 20 p. 5806-5809, ISSN 01469592

Lehr, Dennis; Alaei, Rasoul; Filter, Robert; Dietrich, Kay;
Siefke, Thomas; Rockstuhl, Carsten; Lederer, Falk;
Kley, Ernst-Bernhard, Tünnermann, Andreas

**Plasmonic nanoring fabrication tuned to pitch: Efficient,
deterministic, and large scale realization of ultra-small
gaps for next generation plasmonic devices**

Applied Physics Letters 105 (2014) 14 143110, ISSN 00036951

Li, Likai; Raasch, Thomas; Sieber, Sieber; Beckert, Erik;
Steinkopf, Ralf; Gengenbach, Ulrich; Allen, Y.Yi

**Fabrication of microinjection-molded miniature freeform
Alvarez lenses**

Applied Optics 53 (2014) 19 p. 4248-4255, ISSN 1559-128X

Limpert, Jens; Klenke, Arno; Kienel, Marco; Breitkopf, Sven;
Eidam, Tino; Hädrich, Steffen; Jauregui, Cesar;
Tünnermann, Andreas

**Performance Scaling of Ultrafast Laser Systems by Coher-
ent Addition of Femtosecond Pulses**

IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics 20
(2014) 5 UNSP 0901810, ISSN 1077-260X

Menzel, Christoph; Hebestreit, Eric; Alaei, Rasoul;
Albooyeh, Mohannad; Mühlig, Stefan; Burger, Sven;
Rockstuhl, Carsten; Simovski, Constantin R.;

**Tretyakov, Sergei A.; Lederer, Falk L.; Pertsch, Thomas
Extreme coupling: A route towards local magnetic
metamaterials**

Physical Review B - Condensed Matter and Materials Physics
89 (2014) 15 Article No. 155125, ISSN 1550-235X

Menzel, Christoph; Hebestreit, Eric; Rockstuhl, Carsten;
Burger, Sven; Lederer, Falk.; Pertsch, Thomas

Non-diffracting optical surface waves *Laser & Photonics Reviews*

Optics Express 22 (2014) 8 p.9971-9982, ISSN 1094-4087

Menzel, C.; E. Hebestreit, S. Muehlig, C. Rockstuhl, S. Burger, F. Lederer, T. Pertsch

The spectral shift between near- and far-field resonances of optical nano-antennas

Optics Express(2014) 22 (8), 9971-9982

Minardi, Stefano; Milián, Carles Ricardo; Majus, Donatas; Gopal, Amrutha; Tamošauskas, Gintaras; Pertsch, Thomas; Dubietis, Audrius

Energy deposition dynamics of femtosecond pulses in water

Applied Physics Letters 105 (2014) 22 Article No. 224104, ISSN 224104

Minovich, Alexander E.; Klein, Angela E.; Neshev, Dragomir N.; Pertsch, Thomas.; Kivshar, Yuri S.; Christodoulides, Demetrios N.

Airy plasmons: Non-diffracting optical surface waves

Laser & Photonics Reviews 8 (2014) 2 p. 221-232, ISSN 1863-8880

Mourou, Gérard; Tajima, Toshiki; Quinn, Mark N.; Brocklesby, Bill; Limpert, Jens

Are fiber-based lasers the future of accelerators?

Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment 740 (2014) p. 17-20, ISSN 0168-9002

Otto, Hans-Jürgen; Klenke, Arno; Jauregui, Cesar; Stutzki, Fabian; Limpert, Jens; Tünnermann, Andreas

Scaling the mode instability threshold with multicore fibers

Optics Letters 39 (2014) 9 p. 2680-2683, ISSN 0146-9592

Otto, H.-J.; F. Stutzki, N. Madsch, C. Jauregui, J. Limpert, A. Tünnermann

2 kW average power from a pulsed Yb-doped rod-type fiber amplifier

Optics Letters(2014) 39 (22), 6446-6449

Pabst, Oliver; Hölzer, Stefan; Beckert, Erik; Perelaer, Jolke; Schubert, Ulrich S.; Eberhardt, Ramona; Tünnermann, Andreas

Inkjet printed micropump actuator based on piezoelectric polymers: Device performance and morphology studies

Organic Electronics 14 (2014) 12 p. 3423–3429, ISSN 1566-1199

Paetzold, Ulrich Wilhelm; Smeets, Michael; Meier, Matthias; Bittkau, Karsten; Merdzhanova, T.; Smirnov, Vladimir; Michaelis, Dirk; Wächter, Christoph; Carius, Reinhard; Rau, Uwe

Disorder improves nanophotonic light trapping in thin-film solar cells

Applied Physics Letters 104 (2014) 13 131102, ISSN 0003-6951

Plotnik, Yonatan; Rechtsman, Mikael C.; Song, Daohong; Heinrich, Matthias; Zeuner, Julia M.; Nolte, Stefan; Lumer, Yaakov; Malkova, Natalia; Xu, Jingjun; Szameit, Alexander; Chen, Zhigang; Segev, Mordechai

Observation of unconventional edge states in 'photonic graphene'

Nature Materials 13 (2014) 1 p. 57-62, ISSN 1476-1122

Poulios, K.; Keil, R.; Fry, D.; Meinecke, J.D.A.; Matthews, J.C.F.; Politi, A.; Lobino, M.; Gräfe, M.; Heinrich, M.; Nolte, Stefan; Szameit, A.; O'Brien, J.L.

Quantum walks of correlated photon pairs in two-dimensional waveguide arrays

Physical Review Letters 112 (2014) 14 Article No. 143604, ISSN 1079-7114

Pshenay-Severin, Ekaterina A.; Falkner, Matthias; Helgert, Christian; Pertsch, Thomas

Ultra broadband phase measurements on nanostructured metasurfaces

Applied Physics Letters 104 (2014) 22 Article No. 221906, ISSN 0003-6951

Pupeza, Joachim; Högner, M.; Weitenberg, Johannes; Holzberger, Simon; Esser, Dominik; Eidam, Tino; Limpert, Jens; Tünnermann, Andreas; Fill, Ernst; Yakovlev, V.S.

Cavity-Enhanced High-Harmonic Generation with Spatially Tailored Driving Fields

Physical Review Letters 112 (2014) 103902, ISSN 0031-9007

Qi, Jing; Kaiser, Thomas; Peuker, Ralf; Pertsch, Thomas; Lederer, Falk; Rockstuhl, Carsten

Highly resonant and directional optical nanoantennas

Journal of the Optical Society of America A 31 (2014) 2 p. 388-393, ISSN 0740-3232

Richter, Jessica; Steinbrück, Andrea; Zilk, Matthias; Sergeev, Anton; Pertsch, Thomas; Tünnermann, Andreas; Grange, Rachel

Core-shell potassium niobate nanowires for enhanced nonlinear optical effects

Nanoscale 6 (2014) 105200-7, ISSN 2040-3364

- Riedel, Robert; Rothhardt, Jan; Beil, Kolja; Gronloh, Bastian; Klenke, Arno; Höppner, H.; Schulz, M.; Teubner, Ulrich; Kränkel, Christian; Limpert, Jan; Tünnermann, Andreas et al.
Thermal properties of borate crystals for high power optical parametric chirped-pulse amplification
 Optics Express 22 (2014) 15 p. 17607-1761, ISSN 1094-4087
- Risse, Stefan; Gebhardt, Andreas; Beier, Matthias; Loose, Roman; Schürmann, Mark; Jobst, Johannes; Schwinde, Stefan
Präzision fast ohne Limit für Metallspiegel
 mo Magazin für Oberflächentechnik (2014) 1-2 S. 20-23
- Rizzo, Riccardo; Danz, Norbert; Michelotti, Francesco; Maillart, Emmanuel; Anopchenko, Aleksei; Wächter, Christoph
Optimization of angularly resolved Bloch surface wave biosensors
 Optics Express 22 (2014) 19 p. 23202-2321, ISSN 1094-4087
- Rojas-Rojas, S.; L. Morales-Inostroza, U. Naether, G. B. Xavier, S. Nolte, A. Szameit, R. A. Vicencio, G. Lima, A. Delgado
Analytical model for polarization-dependent light propagation in waveguide arrays and applications
 Physical Review A(2014) 90(6), 063823
- Rothhardt, Carolin; Rothhardt, Jan; Klenke, Arno; Peschel, Thomas; Eberhardt, Ramona; Limpert, Jens; Tünnermann, Andreas
BBO-sapphire sandwich structure for frequency conversion of high power lasers
 Optical Materials Express 4 (2014) 5 p. 1092-1103, ISSN 2159-3930
- Rothhardt, Jan; Hädrich, Steffen; Demmler, Stefan; Krebs, Manuel; Fritzsche, Stephan; Limpert, Jens; Tünnermann, Andreas
Enhancing narrowband high order harmonic generation by Fano resonances
 E-paper of the Cornell University Library, arXiv.org (2014) arXiv:1401.2947
- Rothhardt, Jan; Hädrich, Steffen; Demmler, Stefan; Krebs, Manuel; Fritzsche, Stephan; Limpert, Jens; Tünnermann, Andreas
Enhancing the Macroscopic Yield of Narrow-Band High-Order Harmonic Generation by Fano Resonances
 Physical Review Letters 112 (2014) 233002, ISSN 0031-9007
- Rothhardt, Jan; Hädrich, Steffen; Klenke, Arno; Demmler, Stefan; Hoffmann, Armin; Gotschall, Thomas; Eidam, Tino; Krebs, Manuel; Limpert, Jens; Tünnermann, Andreas
53 W average power few-cycle fiber laser system generating soft x rays up to the water window
 Optics Letters 39 (2014) 17 p. 5224-7, ISSN 0146-9592
- Rothhardt, Jan; Krebs, Manuel; Hädrich, Steffen; Demmler, Stefan; Limpert, Jens; Tünnermann, Andreas
Absorption-limited and phase-matched high harmonic generation in the tight focusing regime
 New Journal of Physics 16 (2014) 033022, ISSN 1367-2630
- Scheeler, S. P.; D. Lehr, E.-B. Kley, C. Pacholski
Top-up fabrication of gold nanorings
 Chemistry - An Asian Journal (2014) 9 (8), 2072-2076
- Schmidt, Tobias D.; Reichardt, Lukas J.; Rausch, Andreas F.; Wehrmeister, Sebastian; Scholz, Bert J. Mayr, Christian; Wehler, Thomas; Ciarnáin, Rossá Mac; Danz, Norbert et al
Extracting the emitter orientation in organic light-emitting diodes from external quantum efficiency measurements
 Applied Physics Letters 105 (2014) 043302, ISSN 0003-6951
- Schröder, Sven; Unglaub, David; Trost, Marcus; Cheng, Xinbin; Zhang, Jinlong; Duparré, Angela
Spectral Angle Resolved Scattering of Thin Film Coatings
 Applied Optics 53 (2014) 4 p. A35-A41, ISSN 0003-6935
- Schulz, Ulrike
Oberflächenfunktionalisierung und Kunststoffoptik Teil 2 : Entspiegelung und weitere funktionelle Schichten
 Vakuum in Forschung und Praxis 26 (2014) 4 p. 34-38, ISSN 0947-076X
- Schulz, Ulrike
Coating processes for plastic optics: A tutorial
 Advanced Optical Technologies 3 (2014) 1 p. 29-39, ISSN 2192-8576
- Schulz, Ulrike
Oberflächenfunktionalisierung und Kunststoffoptik Teil 1: Polymere für die Optik und ihre beschichtungsrelevanten Eigenschaften
 Vakuum in Forschung und Praxis 26 (2014) 3 S. 26-31, ISSN 0947-076X
- Schulz, Ulrike; Munzert, Peter; Rickelt, Friedrich; Kaiser, Norbert
Breakthroughs in Photonics 2013: Organic Nanostructures for Antireflection
 IEEE Photonics Journal 6 (2014) 2 0700505, ISSN 1943-0655

Schulz, Ulrike; Rickelt, Friedrich; Munzert, Peter; Kaiser, Norbert
A double nanostructure for wide-angle antireflection on optical polymers

Optical Materials Express 4 (2014) 3 p. 568-574,
ISSN 2159-3930

Schulz, Ulrike; Anke Niemann; Kaiser, Norbert
Breitbandige Entspiegelung optischer Oberflächen mittels doppelter Nanostrukturen

Photonik 46 (2014) 6 S. 32-34, ISSN 1432-9778

Setzpfandt, F.; A. S. Solntsev, D. N. Neshev, T. Pertsch,
W. Sohler, R. Schiek

Temporal dynamics of spatially localized waves in quadratic nonlinear waveguide arrays

Physical Review A(2014) 89 (3), 033863

Siefke, Thomas; Lehr, Dennis; Weber, Thomas; Voigt, Daniel;
Kley, Ernst-Bernhard; Tünnermann, Andreas

Fabrication influences on deep-ultraviolet tungsten wire grid polarizers manufactured by double patterning

Optics Letters 39 (2014) 22 p. 6434-6437, ISSN 0146-9592

Sinibaldi, Alberto; Fieramosca, Antonio; Rizzo, Riccardo;
Anopchenko, Aleksei; Danz, Norbert; Munzert, Peter;

Magistris, Claudio; Barolo, Claudia; Michelotti, Francesco

Combining label-free and fluorescence operation of Bloch surface wave optical sensors

Optics Letters 39 (2014) 10 p. 2947-2950, ISSN 0146-9592

Solntsev, A. S.; F. Setzpfandt, A. S. Clark, C. Wen Wu,
M. J. Collins, C. Xiong, A. Schreiber, F. Katschmann,
F. Eilenberger, R. Schiek, W. Sohler, A. Mitchell, C. Silberhorn,
B. J. Eggleton, T. Pertsch, A. A. Sukhorukov, D. N. Neshev,
Y. S. Kivshar

Generation of nonclassical biphoton states through cascaded quantum walks on a nonlinear chip

Physical Review X (2014) 4, 031007

Steglich, Martin; Käsebier, Thomas; Zillk, Matthias; Pertsch,
Thomas; Kley, Ernst-Bernhard; Tünnermann, Andreas

The structural and optical properties of black silicon by inductively coupled plasma reactive ion etching

Journal of Applied Physics 116 (2014) 173503,
ISSN 0021-8979

Steglich, Martin; Lehr, Dennis; Ratzsch, Stephan;
Käsebier, Thomas; Schrepel, Frank; Kley, Ernst-Bernhard;
Tünnermann, Andreas

An ultra-black silicon absorber

Laser & Photonics Reviews 8 (2014) 2 p. L13-L17,
ISSN 1863-8880

Steinbrück, A.; J.-W. Choi, S. Fasold, C. Menzel, A. Sergeev,
T. Pertsch, R. Grange

Plasmonic heating with near infrared resonance nanodot arrays for multiplexing optofluidic applications

Rsc Advances (2014) 4 (106), 61898-61906

Stenzel, Olaf

The impact of the mass density on selected optical and non-optical properties of oxide coatings

Advanced Optical Technologies 3 (2014) 1 p. 41-53,
ISSN 2192-8576

Stenzel, Olaf; Wilbrandt, Steffen; Du, Shan ; Franke, Christian;
Kaiser, Norbert; Tünnermann, Andreas; Mende, Mathias;
Ehlers, Henrik; Held, Mario

Optical properties of UV-transparent aluminum oxide / aluminum fluoride mixture films, prepared by plasma-ion assisted evaporation and ion beam sputtering

Optical Materials Express 4 (2014) 8 p. 1696, ISSN 2156-7085

Stenzel, Olaf; Wilbrandt, Steffen; Chen, Xiaoying;
Schlegel, Ralph; Coriand, Luisa; Duparré, Angela; Zeitner, Uwe;
Benkenstein, Tino; Wächter, Christoph

Observation of the waveguide resonance in a periodically patterned high refractive index broadband antireflection coating

Applied Optics 53 (2014) 14 p. 3147-3156, ISSN 0003-6935

Stürzebecher, Lorenz; Fuchs, Frank; Harzendorf, Torsten;
Zeitner, Uwe Detlef

Pulse compression grating fabrication by diffractive proximity photolithography

Optics Letters 39 (2014) 4 p. 1042-1045, ISSN 0146-9592

Stürzebecher, Lorenz; Fuchs, Frank; Zeitner, Uwe Detlef;
Tünnermann, Andreas

High-resolution proximity lithography for nano-optical components

Microelectronic Engineering - Special issue with Review Papers for the 30 year anniversary of MEE (2014) DOI: 10.1016/j.mee.2014.10.010, ISSN 0167-9317

Stutzki, F.; Gaida, C.; G; Limpert, J.; Tünnermann, A.

152 W average power Tm-doped fiber CPA system

Optics Letters 39 (2014) 16 p. 4671-4674,
ISSN 1539-4794

Stutzki, F.; F. Jansen, H.-J. Otto, C. Jauregui, J. Limpert,
A. Tünnermann

**Designing advanced very-large-mode-area fibers for
power scaling of fiber-laser systems**

OPTICA (2014) 1 (4), 233-242

Trost, Marcus; Herffurth, Tobias ; Schröder, Sven; Duparré,
Angela; Beier, Matthias; Risse, Stefan; Tünnermann, Andreas;
Böwering, Norbert

**In situ and ex situ characterization of optical surfaces by
light scattering techniques**

Optical Engineering 53 (2014) 9 092013, ISSN 0091-3286

Trost, Marcus; Herffurth, Tobias; Schröder, Sven;
Duparré, Angela; Tünnermann, Andreas

**Scattering Reduction through oblique Multilayer
Deposition**

Applied Optics 53 (2014) 4 p. A197-A204, ISSN 0003-6935

Tünnermann, Andreas

Tailored Light for Precise Tools

Laser Technik Journal 11 (2014) 1 p. 1, ISSN 1613-7728

Viollet, Stéphane; Godiot, Stéphanie, Leitel, Robert; Buss,
Buss; Breugnon, Patrick; Menouni, Mohsine, Juston, Raphaël,
Expert, Fabien; Colonnier, Fabien, L'Éplattenier, Géraud;
Brückner, Andreas; Kraze, Felix; et. al.

**Hardware Architecture and Cutting-Edge Assembly
Process of a Tiny Curved Compound Eye**

Sensors 14 (2014) 11 p. 21702-21721, ISSN 1424-8220

Wagner, Frank Richard; João, Celso P.; Fils, Jérôme.; Gottschall,
Thomas.; Hein, Joachim; Körner, Jörg; Limpert, Jens et al.

**Temporal contrast control at the PHELIX petawatt laser
facility by means of tunable sub-picosecond optical
parametric amplification**

Applied Physics B: Lasers and Optics 116 (2014) 2 p. 429-435,
ISSN 0946-2171

Weber, Thomas; Kroker, Stefanie; Käsebier, Thomas;
Kley, Ernst-Bernhard; Tünnermann, Andreas

Silicon wire grid polarizer for ultraviolet applications

Applied Optics 53 (2014) 34 p. 8140-8144, ISSN 1559-128X

Weimann, Steffen; Kay, Alastair; Keil, Robert; Nolte, Stefan;
Szameit, Alexander

**Photonic coherent state transfer with Hamiltonian
dynamics**

Optics Letters 39 (2014) 1 p. 123-126, ISSN 0146-9592

Wilbrandt, Steffen; Stenzel, Olaf; Nakamura, H.;
Wulff-Molder, D.; Duparré, Angela; Kaiser, Norbert

Protected and enhanced aluminum mirrors for the VUV

Applied Optics 53 (2014) 4 p. A125-A130, ISSN 0003-6935

Zeuner, Julia M.; Rechtsman, Mikael C.; Nolte, Stefan;
Szameit, Alexander

Edge states in disordered photonic graphene

Optics Letters 39 (2014) 3 p. 602-605, ISSN 0146-9592

Zhang, Site; Asoubar, Daniel; Kammel, Robert; Nolte, Stefan;
Frank, Wyrowski

**Analysis of pulse front tilt in simultaneous spatial and
temporal focusing**

Journal of the Optical Society of America A 31 (2014) 11 p.
2437-2446, ISSN 1084-7529

Zimmermann, Felix; Plech, Anton; Richter, Sören; Döring, Sven;
Tünnermann, Andreas; Nolte, Stefan

**Structural evolution of nanopores and cracks as
fundamental constituents of ultrashort pulse-induced
nanogratings**

Applied Physics A: Materials Science & Processing 114 (2014)
1 p. 75-79, ISSN 0947-8396

Zimmermann, Felix; Plech, Anton; Richter, Sören;
Tünnermann, Andreas; Nolte, Stefan

**Ultrashort laser pulse induced nanogratings in
borosilicate glass**

Applied Physics Letters 104 (2014) 211107, ISSN 0003-6951

Zurch, M.; Rothhardt, J; Hadrich, S; Demmler, S.; Krebs,
M.; Limpert, Jens; Tünnermann, Andreas; Guggenmos, A.;
Kleineberg, U.; Spielmann, C.

**Real-time and Sub-wavelength Ultrafast Coherent
Diffraction Imaging in the Extreme Ultraviolet**

Scientific Reports 4 (2014) 7368, ISSN 2045-2322

IMPRESSUM IMPRINT

Herausgeber | Editor

Fraunhofer-Institut für
Angewandte Optik und Feinmechanik IOF
Albert-Einstein-Straße 7
07745 Jena
Telefon +49 3641 807-0
info@iof.fraunhofer.de
www.iof.fraunhofer.de

Institutsleiter | Director

Prof. Dr. Andreas Tünnermann
Telefon +49 3641 807-201
andreas.tuennermann@iof.fraunhofer.de

Redaktion | Editorial staff

Dr. Kevin Füchsel
Dr. Stefan Riehemann
Sylvia Bathke

Redaktionsschluss | Editorial deadline

02.04.2015

Gestaltung | Graphic design

Walter Oppel
Christian Süß

Druck | Print

SDC Satz+Druck Centrum Saalfeld GmbH
Am Cröstener Weg 4
07318 Saalfeld
www.druckerei-saalfeld.de

ZUSÄTZLICHE INFORMATIONEN ONLINE | ADDITIONAL INFORMATION ONLINE

Im Jahr 2014 haben die Mitarbeiter des Fraunhofer IOF viele Vorträge auf Konferenzen und Workshops gehalten. Die vollständige Liste ist im Internet unter www.iof.fraunhofer.de abrufbar.

In 2014, the employees of the Fraunhofer IOF had given many presentations at conferences and workshops. The full list is available on the internet at www.iof.fraunhofer.de.