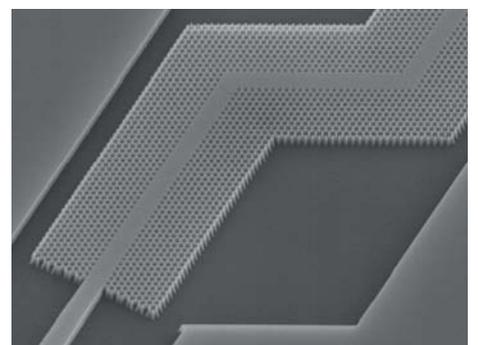
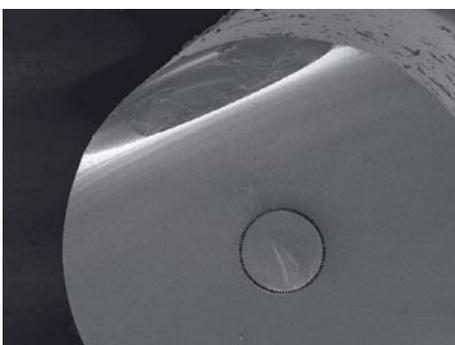
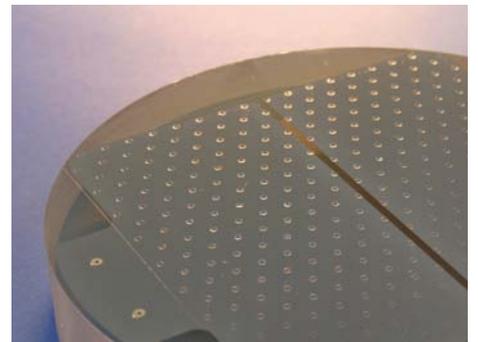
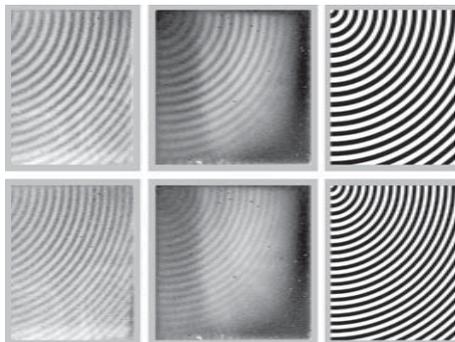




Fraunhofer Institut
Angewandte Optik
und Feinmechanik

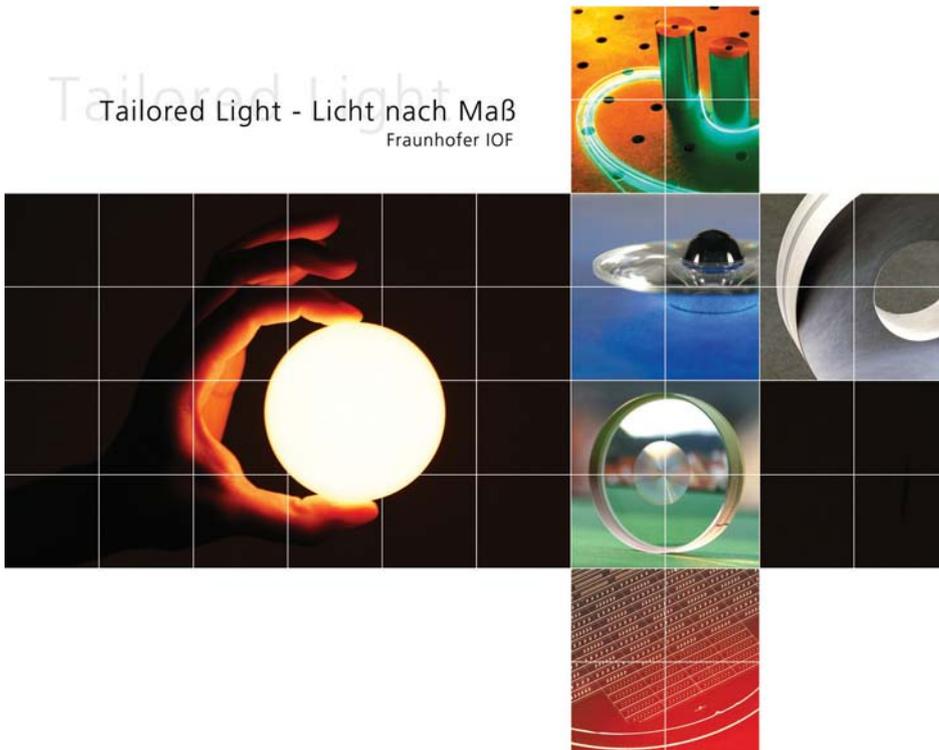
Jahresbericht Annual Report 2005



Jahresbericht 2005
Fraunhofer-Institut
für Angewandte Optik
und Feinmechanik

Annual Report 2005
Fraunhofer Institute
for Applied Optics and
Precision Engineering

Tailored Light
Licht nach Maß
Fraunhofer IOF



Inhalt

Vorwort	4
Wichtige Ereignisse 2005	6
Das Institut im Profil	12
Das Institut in Zahlen	18
Der Fraunhofer-Verbund Oberflächentechnik und Photonik	20
Die Fraunhofer-Gesellschaft	22
Ausgewählte Ergebnisse	23
EUV-Multilayer-Optiken	24
Ultraplanare Elektrostatische Chucks für Next-Generation-Lithographie	30
Erzeugung komplexer Mikrooptiken durch Lithographie und UV-Abformung	36
Herstellung gechirpter Mikrolinsenarrays durch Reflow von Fotoresist	42
Verbesserung der Auflösungshomogenität ultra-dünner Bilderfassungssysteme basierend auf künstlichen Facettenaugen	44
RGB-Hologramme zur Farbbilderzeugung	50
Photonische Kristalle für optische Abbildungselemente	52
Faserlaser – Neue Möglichkeiten durch Mikrostrukturierung	54
Systemtechnische Grundlagen für THz-Imaging-Systeme	60
Anwendung von OLED-Mikrodisplays in visuellen Stimulationssystemen und in der Messtechnik	62
Neue Ansätze für die Behandlung von Presbyopie mit Hilfe ultrakurzer Laserpulse	68
Optiken für ultrakurze Laserpulse – Analyse, Design und Herstellung	70
Schichtsysteme für Ultrakurzzeitoptiken	72
Omnidirektionale Entspiegelungen auf Basis von Gradientenschichten	74
Transparenter Kratzschutz für Kunststoffoptik	76
Streulicht-Messverfahren für Gitter und diamantgedrehte Oberflächen	78
3-D-Zahndigitalisierer »hiScanµ« – Die dritte Gerätegeneration	80
FEM-Simulation des Laserstrahl­lötprozesses zum Fügen optischer Bauteile	82
Optoelektronik für die Analysetechnik	84
Entwicklung von automatischen Vorrichtungen zur innovativen Handhabung von Haaren	86
PCR auf dem Chip – Schnellere Analysen in den Life Sciences mit einem innovativen Ansatz	88
Namen, Daten, Ereignisse	90
Patente	93
Wissenschaftliche Publikationen	95
Der Weg zu uns	103

Contents

Preface	5
Highlights 2005	6
The Institute in Profile	12
The Institute in Figures	19
The Fraunhofer Surface Technology and Photonics Alliance	20
The Fraunhofer-Gesellschaft	22
Selected Results	23
EUV multilayer optics	25
Ultra-planar electrostatic chucks for next generation lithographies	31
Complex micro-optical modules generated by lithography and UV-molding	37
Chirped arrays of micro-lenses by reflow of photoresist	43
Improving the resolution-homogeneity of ultra-thin vision systems based on artificial compound eyes	45
Color picture generation by RGB-holograms	51
Photonic crystal based optical imaging elements	53
Fiber Laser – Microstructures open new possibilities	55
System technical basics for THz imaging systems	61
Application of OLED microdisplays in visual stimulation systems and in metrology	63
New approaches for presbyopia treatment with ultra-short laser pulses	69
Optics for ultra-short laser pulses – analysis, design und fabrication	71
Coatings for ultra-short-time optics	73
Omnidirectional antireflective coatings based on graded-index films	75
Transparent scratch-resistance for polymer optical components	77
Scatter measurement techniques for gratings and diamond turned surfaces	79
3D dental digitizer “hiScan μ ” – the third generation of devices	81
FEM-simulation of the laser beam soldering process for joining optical components	83
Optoelectronics for health care applications	85
Automatic handling of hairs for measuring geometrical and mechanical properties	87
PCR-on-a-chip – An innovative tool to speed up in life sciences	89
Names, Dates, Activities	90
Patents	93
Scientific Publications	95
How to reach us	103



Liebe Leser,

2005 – das Einsteinjahr. Mit dem Einsteinjahr wurden der 100. Geburtstag von Einsteins Relativitätstheorie und der 50. Todestag des weltberühmten Wissenschaftlers gewürdigt. Nach einer repräsentativen Umfrage erklärten fast 75 Prozent der Bundesbürgerinnen und -bürger, dass ihnen Einstein bekannt sei. Einstein war ein »Popstar« der Wissenschaft seiner Zeit und ist es noch heute. Die Öffentlichkeit verbindet mit Einstein die Relativitätstheorie, er ist aber auch der Physiker, dem die exakte Beschreibung der Wechselwirkung zwischen Licht und Materie gelang. Tatsächlich sind es diese Arbeiten zum Photoeffekt, die mit dem Nobelpreis ausgezeichnet wurden.

Einstein erklärte die Absorption und Emission von Licht und legte damit die theoretischen Grundlagen für die Lichtverstärkung und letztendlich für den Laser, ein unverzichtbares Werkzeug auch in unseren Laboren am Fraunhofer-Institut für Angewandte Optik und Feinmechanik IOF und am IAP, dem Institut für Angewandte Physik der Friedrich-Schiller-Universität Jena.

Heute setzen wir den Laser ein zur Informationsaufnahme und -wiedergabe, zur Prozesssteuerung und -kontrolle und nicht zuletzt zur präzisen Strukturierung und Verbindung von Materialien und Komponenten. Prominente Beispiele für die Anwendung des Lasers in unserem Haus sind aktuelle Entwicklungen zu laserbasierten Projektionssystemen, optischen Sensoren und klebstofffreien Füge-techniken – Highlights auf nationalen und internationalen Messen.

Aber auch der Laser selbst ist noch Gegenstand der Forschung an IOF und IAP. So gelang in unseren Laboren die Entwicklung des derzeit weltweit leistungsstärksten UltrakurzpulsLasers mit Ausgangsleistungen von mehr als 100 W. Mit diesem FaserLasersystem steht erstmals ein UltrakurzpulsLaser für so genannte real-world applications zur Verfügung. Mit unseren Partnern aus Wissenschaft und Wirtschaft wird aktuell der Einsatz dieses Lasers in der industriellen Fertigung und der Medizin vorbereitet.

Gerade in Entwicklungsprojekten wie diesen dokumentiert sich die besondere Stärke der engen Verbindung zwischen dem Fraunhofer-Institut und der Universität. Nur durch die Beherrschung der fundamentalen Grundlagen der Laser-Materie-Wechselwirkung einerseits und der optischen Systemkompetenz andererseits wird sich das IOF/IAP nachhaltig als kompetenter Partner auf dem Gebiet der Optik/Photonik für Wissenschaft und Wirtschaft etablieren können.

Ganz besonders hat mich daher die Auszeichnung mit dem höchstdotierten deutschen Wissenschaftspreis, dem Gottfried Wilhelm Leibniz-Preis 2005 gefreut, er dokumentiert, dass wir auf dem richtigen Weg sind.

Schlüsselkomponenten in modernen optischen Systemen bilden – wie auch unsere Arbeiten zeigen – in zunehmendem Maße Mikro- und Nano-optiken vollständiger Funktionalität. Mit der Einrichtung des Zentrums für Innovationskompetenz ultra optics® und der Zusammenführung der Kompetenzen zur Herstellung von mikro- und nano-skaligen Optiken sowie Mess- und Prüfwerkzeugen im Center for Advanced Micro- and Nano-optics (CMN-Optics) am IOF wurden die Möglichkeiten auch für unsere Partner in Wissenschaft und Industrie entscheidend verbessert. Technologische Basis des CMN-Optics bilden eine moderne Elektronenstrahlbelichtungsanlage, dessen Aufstellung 2005 vorbereitet wurde, Laser-Lithographie, Ultra-präzisionsbearbeitung und Replikationstechniken neuester Generation.

Mein Dank gilt unseren Partnern in Industrie und Wissenschaft für die gute Zusammenarbeit und dem Bundesministerium für Bildung und Forschung, dem Freistaat Thüringen sowie der Deutschen Forschungsgemeinschaft für ihre stetige Unterstützung.

Mein besonderer Respekt, meine Anerkennung und mein Dank gelten meinen Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern für ihre hervorragenden Leistungen und ihr Engagement. Ihre Arbeiten bilden die Grundlage für die stetige Weiterentwicklung des IOF und des IAP.

Prof. Dr. Andreas Tünnermann
Institutsleiter

Dear reader,

2005 – the Einstein year. In 2005 the 100th anniversary of Einstein's theory of relativity and the 50th anniversary of this world-famous scientist's death were celebrated. According to a representative survey, Einstein is known to nearly 75 percent of the German population. Einstein was a "pop star" of science in his era and remains so today. The public associates Einstein with the theory of relativity, but he is also the physicist who was able to develop a precise description of the interaction between light and matter. In fact, it was his work on the photo-electric effect which was awarded the Nobel Prize.

Einstein's description of the absorption and emission of light was the theoretical foundation for the amplification of light and ultimately the laser which is an indispensable tool in our laboratories at the Fraunhofer Institute for Applied Optics and Precision Engineering IOF and the Institute of Applied Physics (IAP) at the Friedrich Schiller University of Jena.

Today we use the laser for the recording and rendering of information, process control and inspection and, not least, for the precise structuring and joining of materials and components. Currently at the IOF, prominent examples regarding the application of lasers include developments in the fields of laser based projection systems, optical sensors and adhesive-free joining technologies; high-lights at national and international fairs.

However, the laser itself is still a research topic at the IOF and the IAP. Our laboratories were able to develop today's most powerful ultra short pulse laser with output powers of more than 100 W. This fiber laser system represents the first ultra short pulse laser for so-called real-world applications. Together with our partners in science and industry we are currently preparing these lasers for applications in industrial manufacture and medicine.

Development projects such as these illustrate particularly well the advantages of the close collaboration between the Fraunhofer Institute and the university. Only through the mastery of the fundamental principles of laser-matter-interaction on the one hand, and the competence regarding optical systems on the other hand, will the IOF/IAP be able to continually reinforce their position as a competent partner for science and industry in the area of optics/photonics. In this context, I was particularly pleased about the award of the Gottfried Wilhelm Leibniz-Preis 2005, the highest award for science in Germany, as it confirms that both our approach and direction are sound.

Key components in modern optical systems are increasingly based on micro and nano-optics with complete functionality and this is also reflected in our work. The establishment of the Center for Innovation Competence ultra optics® and the merging of expertise in the manufacture of micro and nano-scale optics, together with measurement and testing devices at the Center for Advanced Micro- and Nanooptics (CMN-Optics) at the IOF, have broadened the development potential for our partners in science and industry.

The technological foundations of the CMN-Optics are the electron beam exposure system, laser-lithography, ultra precision diamond turning, and state-of-the-art replication technologies.

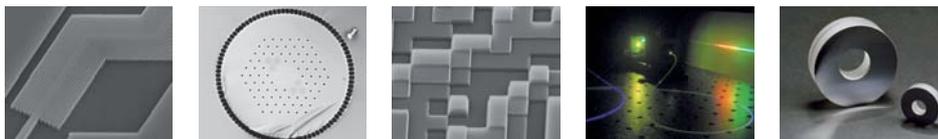
I would like to thank our partners in industry and science for their excellent cooperation and the Federal Ministry of Education and Research, the Free State of Thuringia and the Deutsche Forschungsgemeinschaft for their continued support.

My particular respect, my acknowledgements and my thanks go to my co-workers for their excellent work and their commitment. Their work is the foundation for the continuous, further development of the IOF and the IAP.



Prof. Dr. Andreas Tünnermann
Director

Highlights 2005



Wissenschaft Mikro- und Nano-Technologie

Mikro- und Nanooptik

Lithographische Strukturierung und UV-Abformung dünner Polymerfilme auf beliebigen Substraten sind Plattform für die Erzeugung mikrooptischer Module im Wafermaßstab und die Integration mehrerer optischer Funktionen.

Mikrostrukturierte Fasern

Die Funktionsvielfalt einer Faser kann durch Mikrostrukturierung erhöht werden. So wurde eine photonische Kristallfaser designed mit den Außen-dimensionen eines Stablasers und den Funktionseigenschaften einer Faser. Damit wird eine signifikante Leistungs-skalierung möglich.

EUV-Multilayer-Optik

Schwarzschild-Objektive für Anwendungen im EUV-Spektralbereich bestehen aus einem konkaven und einem konvexen Mo/Si-Multilayer-spiegel. Je nach Richtung des Strahlen-gangs ist ein Einsatz in der Mikroskopie oder der Lithographie möglich. Durch Integration in eine Laserplasma-Quelle konnte die Direktstrukturierung ausge-wählter Materialien realisiert werden.

Chucks für EUVL

Für Anwendungen in der Elektronen-strahl- und EUV-Lithographie wurden hochgenaue elektrostatische Wafer- und Masken-Chucks entwickelt, die höchsten Anforderungen an Ebenheit und Steifigkeit genügen.

Science Micro- and nanotechnology

Micro- and nanooptics

Lithographic structuring and UV moulding of thin polymer films on arbitrary substrates are the platform for the creation of micro-optical components at wafer dimensions and the integration of multiple optical functions.

Microstructured fibers

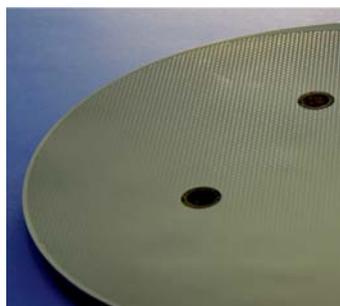
The functional diversity of fibers can be increased by micro structuring. A photonic crystal fiber with the dimensions of a rod laser and the functionality of a fiber was designed. This results in a significantly increased power.

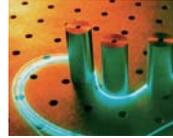
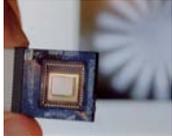
EUV multilayer optics

Schwarzschild objectives for applica-tions in the EUV spectral range consist of a convex and a concave Mo/Si multilayer mirror. Depending on the optical path applications in microscopy or lithography can be realized. The integration of a laser plasma source allowed for the direct structuring of selected materials.

Chucks for EUVL

High-precision electrostatic wafer and mask chucks were developed for applications in electron beam and EUV lithography. These chucks satisfy the highest demands regarding flatness and stiffness.





Auszeichnungen

Leibniz-Preis 2005

Am 2. März wurde Prof. Andreas Tünnermann für seine »bahnbrechenden Arbeiten zur Entwicklung von Hochleistungs-Faserlasern« mit dem Gottfried Wilhelm Leibniz-Preis ausgezeichnet. Er gehört damit zu den zehn Preisträgern des mit 1,55 Millionen Euro höchstdotierten deutschen Forschungspreises.

WLT-Preis 2004

Dr. Uwe Detlef Zeitner wurde von der Wissenschaftlichen Gesellschaft für Lasertechnik e. V. für seine herausragenden Leistungen geehrt, die er seit Abschluss seiner Promotion 1999 bei der Bearbeitung von Aufgaben aus der Industrie und der Erschließung neuer, eigenständiger Forschungsfelder gezeigt hat.

Thüringer Forschungspreis für Angewandte Forschung

Dr. Peter Schreiber, Dr. Jacques Duparré, Dr. Peter Dannberg und Dr. Andreas Bräuer wurden für die Entwicklung eines neuartigen ultra-dünnen Bild-erfassungssystems nach dem Vorbild des Facettenauges der Insekten ausgezeichnet.

Fakultätspreis für die beste Diplomarbeit

Für ihre Diplomarbeit »Theoretische und experimentelle Untersuchungen zur Propagation ultrakurzer Laserpulse durch Fokussierungsoptiken« erhielt Ulrike Fuchs den Fakultätspreis für die beste Diplomarbeit der Physikalisch-Astronomischen Fakultät der FSU Jena.

Awards

Leibniz-Prize 2005

On March 2nd Prof. Andreas Tünnermann was awarded the Gottfried Wilhelm Leibniz-Prize for his "pioneering work on the development of high power fiber lasers". He is one of 10 prizewinners of this award which is the highest award for science in Germany and in total is worth 1.55 Million Euro.

WLT Prize 2004

Dr. Uwe Detlef Zeitner was honoured by the Scientific Society for Laser Technology e.V. for his outstanding achievements since his graduation in 1999 regarding his work on industry projects and the opening up of novel, independent areas of research.

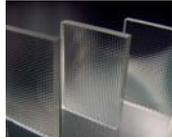
Thuringia Research Prize for Applied Research

Dr. Peter Schreiber, Dr. Jacques Duparré, Dr. Peter Dannberg and Dr. Andreas Bräuer were honored for the development of a novel, ultra-thin imaging system modeled after the facet eyes of insects.

Faculty Prize for the best Diploma Theses

Ulrike Fuchs was awarded the faculty prize for the best diploma thesis at the faculty for physics and astronomy at the FSU Jena for her work "Theoretical and experimental studies on the propagation of ultra-short laser pulses through focusing optics".





Das Fraunhofer IOF in der Region

Lange Nacht der Wissenschaften

Großen Anklang fand die erste Lange Nacht der Wissenschaften in Jena. Highlights am Fraunhofer IOF waren u. a. der 3-D-Scanner, mit dem man sein Gesicht vermessen lassen konnte, die ultra-dünne Kamera, das optische Mikrophon, ein Herzklappenstent oder auch Vorträge wie »Einstein und das Laserlicht« oder »Die Auswirkungen der kambrischen Revolution auf das Fraunhofer IOF«.

Innovationscluster JOIN

Im Rahmen des Pakts für Forschung und Innovation wurde der Jenaer Innovationscluster JOIN (Jena Optical INnovations) als eine Plattform für Akteure aus Wissenschaft und Wirtschaft zur nachhaltigen Förderung von Innovationen im Bereich der Optischen Technologien von der Fraunhofer-Gesellschaft initiiert. Thematischer Fokus sind »Optische Systeme zur digitalen Informationsaufnahme und -wiedergabe für Volumenmärkte«.

ultra optics®

Im Rahmen der BMBF-Initiative »Unternehmen Region« wird das Zentrum für Innovationskompetenz ultra optics® gefördert. Institute der FSU Jena arbeiten gemeinsam mit dem Fraunhofer IOF an der fundamentalen Klärung der physikalischen und technischen Möglichkeiten des Einsatzes von Licht und der Kontrolle seiner Eigenschaften.

Fraunhofer IOF in the Region

Long night of sciences

The first Long Night of Sciences in Jena was well received. Highlights at the Fraunhofer IOF were, among other things, the 3D-scanner, which allowed the audience to have their face measured, the ultra-thin camera, the optical microphone, a heart valve stent and lectures such as "Einstein and the laser light" or "The effects of the Cambrian revolution on the Fraunhofer IOF".

Innovation cluster JOIN

In the context of the pact for research and innovation, the Fraunhofer-Gesellschaft initiated the Innovation Cluster JOIN (Jena Optical INnovations) as a platform for science and industry for the lasting stimulation and support of innovations in the area of optical technologies with a focus on "Optical systems for the digital information recording and rendering for volume markets".

ultra optics®

The center for innovation competency ultra optics® is supported by the BMBF initiative "Entrepreneurial Regions". Institutes of the FSU Jena work together with the Fraunhofer IOF to elucidate the physical and technical potential for the use of light and the control of its properties.





Konferenzen – Workshops

OSD 05

Das 5. SPIE Symposium Optical Systems Design 2005 fand erstmals in Jena statt und wurde von mehr als 400 Experten aus der ganzen Welt besucht. Veranstalter waren die Internationale Gesellschaft für Optik (SPIE), die Friedrich-Schiller-Universität Jena und das Fraunhofer IOF.

Workshops

Mit sehr gutem Erfolg wurden vom Fraunhofer IOF 2005 zwei Workshops in Kooperation mit Ostasiatischen Instituten und Firmen veranstaltet. Zum Thema »Advanced Organic Photonics« reisten Experten aus Japan nach Jena. Der Workshop »Optische Beschichtungen«, der in Shanghai stattfand, ermöglichte neben dem Austausch von Know-how auch Einblicke in die Potentiale der chinesischen Industrie auf dem Gebiet der optischen Beschichtung.

»Lithography for Photonics« war das Thema eines Workshops, der gemeinsam mit Leica Microsystems Lithography Jena organisiert wurde. Er informierte zu aktuellen Trends auf dem Gebiet der Lithographie und wurde von über 90 Teilnehmern besucht.

Studenten zu Gast

Studentengruppen der Universität Twente in Holland und von der Fachhochschule Giessen besuchten das Fraunhofer IOF und erhielten in Vorträgen und bei Laborrundgängen Einblicke in aktuelle Forschungsarbeiten des Instituts.

Conferences – Workshops

OSD 05

For the first time the 5th SPIE symposium Optical Systems Design 2005 took place in Jena and was attended by more than 400 experts from all over the world. Organizers were the International Society for Optical Engineering (SPIE) the Friedrich Schiller University Jena and the Fraunhofer IOF.

Workshops

In 2005 the Fraunhofer IOF successfully organized two workshops in cooperation with East-Asian institutes and companies. Japanese experts came to Jena in connection with the topic "Advanced Organic Photonics". The workshop "Optical Coatings", which took place in Shanghai, allowed, besides the exchange of know-how, insights into the potentials of the Chinese industry in the field of optical coatings.

"Lithography for Photonics" was the topic of a workshop organized in cooperation with Leica Microsystems Lithography Jena, which informed about current trends in the field of lithography and was attended by more than 90 participants.

Students as guests

Groups of students from the University of Twente, The Netherlands, and the College of Giessen visited the Fraunhofer IOF and got insights into current research activities of the institute through lectures and laboratory visits.





Messe-Highlights

Laser 2005

Das Fraunhofer IOF präsentierte seine Forschungsergebnisse auf der LASER 2005 in München, der weltweit führenden Messe auf dem Gebiet der Photonik. Gezeigt wurden Prototypen und technologische Entwicklungen für innovative optische Systeme. Besonderes Interesse fanden die Optiken zur LED-Strahlformung und für einen laserbasierten Miniprojektor. In sieben Vorträgen auf dem Photonics Forum stellten unsere Wissenschaftler Neuentwicklungen und Trends auf den Forschungsfeldern des Fraunhofer IOF vor.

Messen im Ausland

Neben Messebeteiligungen in Deutschland stellte das Fraunhofer IOF seine Forschungsergebnisse erstmals auf Messen in den USA vor. Auf der **Photonics West** im kalifornischen San José lockten die ultra-dünne Kamera und der LED-Scheinwerfer zahlreiche Besucher auf den Gemeinschaftsstand der Kompetenznetze Optische Technologien, auf dem das Fraunhofer IOF als einziges Thüringer Forschungsinstitut vertreten war.

In Boston wurden im Rahmen der Jahrestagung und Messe der **Society for Information Display (SID)** optische Beschichtungen und mikrooptische Komponenten vorgestellt. Highlight war ein Projektionssystem mit einem OLED-Display als selbstleuchtendes bildgebendes Element, das miniaturisierte Projektoren für die Kleinflächenprojektion ermöglicht. Die SID ist mit über 500 Ausstellern die größte nordamerikanische Messe der Display-Industrie.

Fair Highlights

Laser 2005

The Fraunhofer IOF presented its research results at LASER 2005 in Munich, the world-wide leading exhibition in the field of photonics. Prototypes and technological developments for innovative optical systems were presented. Of particular interest were optical systems for LED beam shaping and laser based miniaturized projection systems. In seven talks our scientists presented novel developments and trends in the research fields of the Fraunhofer IOF.

Fairs abroad

Besides participation in German fairs the Fraunhofer IOF presented its research results at fairs in the USA for the first time. At the **Photonics West** in San José, California, the ultra-thin camera and the LED-floodlights received particular attention at the combined stand of the Competency Networks for Optical Technologies, with the Fraunhofer IOF as the only Thuringian research institute.

At the annual conference and exhibition of the **Society for Information Display (SID)** in Boston optical coatings and micro-optical components were presented. The highlight was a projection system with an OLED display as a self-illuminating imaging element which allows for the realization of miniaturized projectors for small-scale projections. With more than 500 exhibitors, SID is the biggest North-American fair of the display industry.





Institut intern

Wechsel in Leitungsbereichen

2005 wurden Mitarbeiter in den Ruhestand verabschiedet, die das Institut seit seinen Anfängen maßgeblich geprägt haben. Dr. Volker Guyenot hat die Abteilung Feinwerktechnik aufgebaut und seit der Gründung des Instituts im Jahr 1992 erfolgreich geleitet. Dr. Hartwig Treff hat als Technischer Leiter den sicheren Betrieb des gesamten Instituts gewährleistet und hatte wesentlichen Anteil am Institutsneubau. Frau Ursula Kaschlik leitete von Beginn an mit Umsicht das Sekretariat des Institutsleiters.

Alumni-Treffen

Das zweite Alumni-Treffen am Fraunhofer IOF wurde am 8. Juli erstmals gemeinsam mit dem Institut für Angewandte Physik, dem IAP, durchgeführt. Thematischer Schwerpunkt waren neue Entwicklungen auf dem Gebiet mikro- und nanooptischer Systeme und das erfolgreiche 5-jährige Bestehen der im Jahr 2000 aus dem IOF ausgegründeten unique m.o.d.e. AG. Den Abschluss bildete ein gelungenes Sommerfest.

Jahresabschluss

Ein erfolgreiches Jahr 2005 ging zu Ende. Schon zu einer guten Tradition geworden, bedankte sich Institutsleiter Prof. Andreas Tünnermann mit Stollen und Glühwein bei den Mitarbeitern des Fraunhofer IOF und des IAP für ihr Engagement und die geleistete Arbeit.

Institute internals

Changes in Management

In 2005 several employees who shaped the institute considerably from the start retired. Dr. Volker Guyenot successfully setup and headed the precision mechanics department since the institute's foundation in 1992. Dr. Hartwig Treff, in his role as the technical head guaranteed the smooth running of the entire institute and played a significant role in the construction of the new institute. Ursula Kaschlik headed up the office of the institute's director with prudence from the beginning.

Alumni meeting

The second alumni meeting at the Fraunhofer IOF on the 8th of July took place in cooperation with the Institute of Applied Physics (IAP) for the first time. Topics discussed were new developments in the area of micro- and nanooptical systems and the successful 5th anniversary of the unique m.o.d.e. AG, an IOF spin-off founded in 2000. A well received summer party concluded the meeting.

Year end

A successful year, 2005, ended. Prof. Andreas Tünnermann, in an already traditional fashion, thanked the employees of the Fraunhofer IOF and the IAP for their commitment and achievements with mulled wine and Stollen.



The Institute in Profile

Kurzporträt

Hauptgegenstand der Forschungs- und Entwicklungstätigkeit am Fraunhofer IOF ist die optische Systemtechnik mit dem Ziel der immer besseren Kontrolle von Licht.

Schwerpunkte der anwendungsorientierten Forschungsarbeit sind:

- multifunktionale optische Schichtsysteme
- mikrostrukturierte Oberflächen
- Schicht- und Oberflächencharakterisierung
- mikrooptische Systeme, Wellenleiteroptik
- Faserlaser und ihre Anwendung
- optische Messsysteme und Sensoren
- Systeme zur Optik-Charakterisierung
- feinmechanische Präzisionssysteme
- Verfahren der Optikmontage.

Zentrale Kompetenz ist das Optik- und Mechanik-Design. Eine Besonderheit des Fraunhofer IOF ist die Kombination von Kompetenzen auf den Gebieten Optik und Präzisionsmechanik.

Anbindung an die FSU Jena

Die Anbindung des Fraunhofer IOF an das Institut für Angewandte Physik (IAP) der FSU regelt seit 2003 ein Kooperationsvertrag.

Forschungsschwerpunkte am IAP sind:

- Mikrooptik, Integrierte Optik
- Ultraschnelle Optik
- Faser- und Wellenleiterlaser
- Optische Kommunikationssysteme.

Vorteile der engen Kooperation sind:

- praxisnahe Studentenausbildung
- bessere Umsetzung von Forschungsergebnissen in die Praxis
- gemeinsame Nutzung der hochwertigen Geräteausstattung und Infrastruktur.

Short portrait

The main focus of research and development at the Fraunhofer IOF is optical system technologies with a view to continually improving the control of light.

The focus of the application-oriented research is in the following fields:

- multi-functional optical multilayers
- micro-structured surfaces
- characterizing of surfaces and coatings
- micro-optical systems, waveguide optics
- fiber lasers and their application
- optical measurement systems and sensors
- systems for optics characterization
- fine mechanical precision systems
- procedures of optics assembly.

The central components of IOF expertise are optics and mechanics design. A unique feature of the Fraunhofer IOF is the combination of expertise in optics and precision mechanics.

Connection to the FSU Jena

Since 2003 the connection of the IOF to the Institute of Applied Physics (IAP) of the FSU has been regulated by a formal contract of cooperation.

The main research topics at IAP are:

- micro-optics, integrated optics
- ultra fast optics
- fiber- and waveguide lasers
- optical communication systems

Advantages of the close cooperation are:

- practical education of students
- better implementation of scientific results in practice
- shared use of the high-value equipment and infrastructure.

Besondere technische Ausstattung

Design-Werkzeuge

Mechanik
Optik

Beschichtungstechnik

Schichtsysteme für EUV bis NIR
Funktionalisierung von
Kunststoffoberflächen

Mikro- und Nanostrukturierung

Photo- und Laserlithographie
Elektronenstrahlolithographie

Replikationstechniken

UV-Abformung
Reaktives Ionenätzen

Ultrapräzisionsbearbeitung

Oberflächen in optischer Qualität
Freiformflächen

Prägetechnik

Kunststoff und Glas
Werkzeugherstellung

Integrationstechniken

Mikromontage
Präzisionsfügen

Lasermikrobearbeitung

Mikrostrukturierung
Laserlöten

Oberflächen- und Schichtcharakterisierung

Scatterometrie
Spektralphotometrie
Atomkraftmikroskopie
Elektroenenmikroskopie
Profilometrie

Optische und mechanische Mess- und Prüftechnik

Special technical equipment

Design-Tools

Mechanics
Optics

Coating technology

Multilayers for EUV to IR
Functioning of plastic surfaces

Micro- and nano-structuring

Photo- and laser lithography
Electron beam lithography

Replication techniques

UV-molding
Reactive ion etching

Ultra precision machining

Surfaces in optical quality
Free form faces

Embossing

Plastics and glass
Manufacturing of tools

Integration techniques

Micro assembly
Precision joining

Laser micro-machining

Micro structuring
Laser soldering

Surface- and layer characterization

Scatterometry
Spectral photometry
Atom force microscopy
Electron microscopy
Profilometry

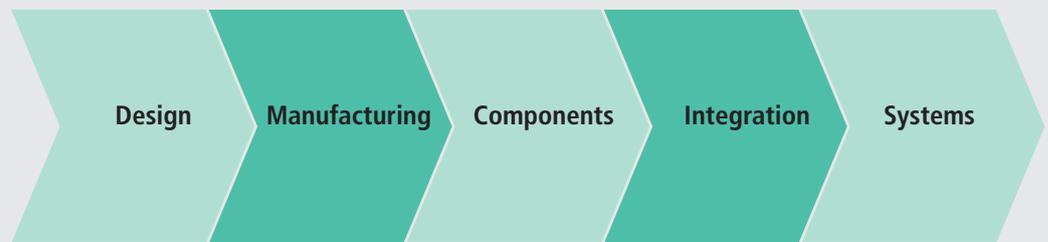
Optical and mechanical measurement and testing techniques



Kompetenzen
Märkte
Produkte

Competences
Markets
Products

Optical System Technology



Markets

Manufacturing

Automotive

Lighting

Aviation and Space
Technology

Astronomy

Security

Information
Technology

Communication
Technology

Electronics

Medical
Technology

Life Sciences

Research

Product Highlights 2005

RGB-Hologramme

Computergenerierte RGB-Hologramme ermöglichen die Realisierung von Projektionssystemen mit großer Tiefenschärfe und hohem Kontrast. Die Projektionseinheit am Ort der Bildprojektion ist bei entsprechender Laserleistung sehr klein.

EUV-Kollektorspiegel

Für die EUV-Lithographie unter Nutzung von Laserplasma-Quellen wurden Technologien zur definierten Abscheidung hochreflektierender Gradientenschichtsysteme zur Herstellung von Kollektorspiegeln entwickelt. Die Reflexion im Zentrum des Spiegels beträgt 67,7 % bei 13,5 nm.

EUV-Masken-Chuck

Der aus LTEM (Low Thermal Expansion Material) entwickelte Masken-Chuck erfüllt hinsichtlich der elektrostatischen Kraft und der Steifigkeit bereits die Anforderungen der SEMATECH-Roadmap.

LED-Scheinwerfer

Hochleistungs-LEDs mit einer chipnahen Primäroptik, die das Licht sammelt und einer strahlformenden Sekundäroptik mit Tandem-Mikrolinsenarrays bilden die Grundlage für die homogene Ausleuchtung von runden oder rechteckigen Flächen.

hiScan μ

Basierend auf dem Prinzip der Phasogrammetrie wurde der Zahndigitalisierer »hiScan μ « gemeinsam mit den Firmen Hint-ElS[®] GmbH und IVB Jena GmbH entwickelt.

RGB holograms

Computer generated RGB holograms allow for the realization of projection systems with a high depth of sharpness and high contrast. At adequate laser powers the projection unit at the image-site is very small.

EUV collector mirror

Different technologies for the precise deposition of high-reflective and laterally graded multilayers on curved collector mirror substrates for EUV lithography applications have been developed. The reflection in the mirror center is 67.7 % at 13.5 nm.

EUV mask chuck

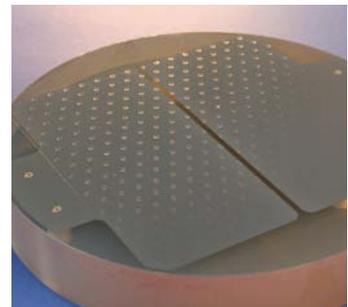
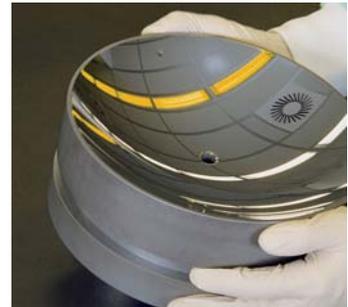
The mask chuck which was developed using LTEM (Low Thermal Expansion Material) already meets the requirements of the SEMATECH roadmap regarding electrostatic force and stiffness.

LED spot lights

High-performance LEDs with a chip near primary optics, which collects the light and a beam shaping secondary optics with tandem micro-lens arrays are the basis of the homogeneous illumination of round and rectangular areas.

hiScan μ

Based on the principle of phasogrammetry, the tooth digitizer "hiScan μ " was developed together with the companies Hint-ElS[®] GmbH and IVB Jena GmbH.



Organisational Structure



Director Prof. Dr. Andreas Tünnermann

Deputy Director Dr. Norbert Kaiser

Assistant Adlin Bruns

Optical Coatings



Dr. Norbert Kaiser

Optical Systems



Dr. Gunther Notni

Microoptical Systems



Dr. Andreas Bräuer

Precision Engineering



Dr. Ramona Eberhardt

Infrastructure

Strategy, Marketing, Coordination



Dr. Brigitte Weber

NIR- and VIS-Coatings



Dr. Olaf Stenzel

Characterization of Surfaces and Coatings



Dr. Angela Duparré

Design



Dr. Peter Schreiber

Microassembly



Dr. Erik Beckert

Administration



Dipl.-Kauffr. Astrid Deppe

Optical Coatings on Plastics



Dr. Ulrike Schulz

3D Measurement



Dr. Peter Kühmstedt

Technology



Dr. Peter Dannberg

Precision Systems



Dr. Stefan Risse

VUV-, EUV- and X-Ray Coatings



Dr. Torsten Feigl

Optics System Design



Dr. Stefan Riehemann

Integration



Dipl.-Ing. (FH) Bernd Höfer

Simulation and Mechanical Design



Dr. Thomas Peschel

Technical Services



Dipl.-Phys. Kersten Fonfara

Fundamentals



Dr. Uwe Detlef Zeitner

CMN-Optics Center for Advanced Micro- und Nano-Optics

Dr. Uwe Detlef Zeitner



ultra-optics® Center of Innovation Competence

Prof. Dr. Thomas Pertsch



AMT Application Center for Microtechnology

Dr. Claudia Gärtner



Institute of Applied Physics
FSU Jena

Laser Shaping



Prof. Dr. Stefan Nolte

Micro Structuring



Dr. Ernst-Bernhard Kley

Fiber Laser



Dr. Jens Limpert

Nano-Optics



Prof. Dr. Thomas Pertsch

Kuratorium

Fraunhofer-Institute und Vorstand der Fraunhofer-Gesellschaft werden durch Kuratorien beraten.

Dem Kuratorium des Fraunhofer IOF gehörten im Berichtszeitraum an:

Advisory Committee

Advisory committees support the Fraunhofer Institutes as well as the Board of the Fraunhofer-Gesellschaft. Members of the advisory committee of the Fraunhofer IOF have been in the report period:

- **Dr. Franz-Ferdinand von Falkenhausen**, Vorsitzender/Chair
Carl Zeiss Jena GmbH, Jena
- **Dr.-Ing. Rolf-Jürgen Ahlers**
ASG Luftfahrttechnik und Sensorik GmbH, Weinheim
- **Dr. Klaus Bartholmé**
Thüringer Kultusministerium, Erfurt
- **Dr. Ralf Bergmann**
Robert Bosch GmbH, Gerlingen
- **Wilfried Kraus**
Bundesministerium für Bildung und Forschung, Bonn
- **Dipl.-Ing. Peter Leibinger**
TRUMPF Laser GmbH + Co. KG, Ditzingen
- **Prof. Dr. Gerhard Linß**
Technische Universität Ilmenau,
Fakultät für Maschinenbau, Ilmenau
- **Dr. Ludwig Roß**
IOTech GmbH, Waghäusel-Kirrlach
- **Prof. Dr. Roland Sauerbrey**
Friedrich-Schiller-Universität,
Physikalisch-Astronomische Fakultät, Jena
- **Dr. Norbert Stath**
Osram – Opto Semiconductors, Regensburg
- **Dipl.-Phys. Norbert Thiel**
Jenoptik AG, Jena
- **Dr. Bärbel Voigtsberger**
Hermsdorfer Institut für Technische Keramik e. V., Hermsdorf
- **Prof. Dr. Bernd Wilhelmi**
Jenoptik AG, Jena
- **Dr. Werner Wilke**
VDI/VDE Innovation und Technik GmbH, Berlin

Im Jahr 2003 hat die Fraunhofer-Gesellschaft einen Kooperationsvertrag mit der Friedrich-Schiller-Universität Jena abgeschlossen. Er ist Basis für eine effektive Zusammenarbeit zwischen den Mitarbeitern des Fraunhofer IOF und den Mitarbeitern des Instituts für Angewandte Physik der FSU.

Investitionen

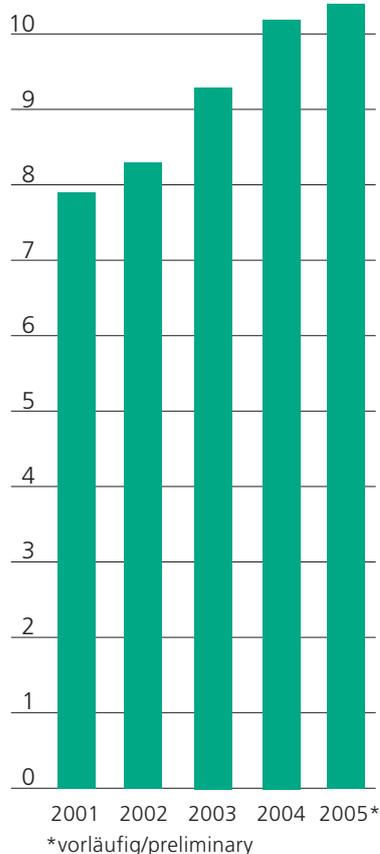
Aus Mitteln der EU, des Freistaats Thüringen und der FhG wurden für die Jahre 2004, 2005 und 2006 12 Millionen Euro zur Beschaffung einer Elektronenstrahlolithographieanlage bewilligt. Darauf aufbauend wird Mitte des Jahres 2006 das Center for Advanced Micro- and Nano-optics – CMN-Optics eröffnet.

Mitarbeiter 2005	IOF	IAP
Wissenschaftler	45	33
Doktoranden	13	15
Techniker	49	17
wiss. Hilfskräfte	34	39
Auszubildende	7	—

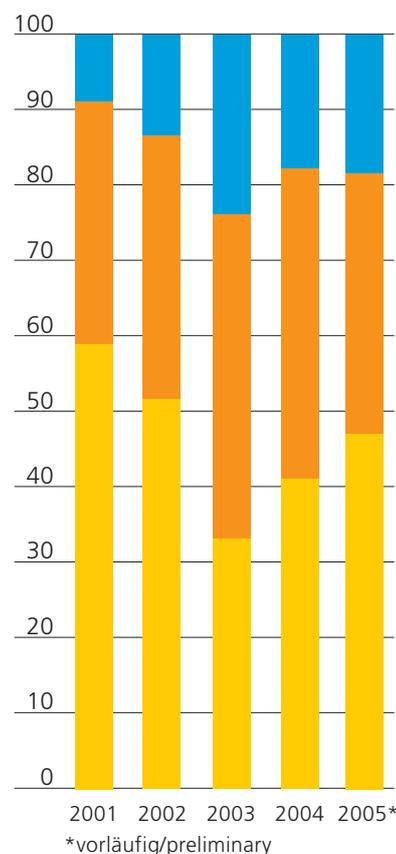
Aufwendungen 2005 in Mio. €	IOF	IAP
Personalaufwand	5,6	3,2
Sachaufwand	4,7	0,5
Investitionen	7,6	1,2

Labor- und Büroflächen	
Fraunhofer IOF	5 000 m ²
IAP	1 200 m ²

Budget (Mio. Euro)

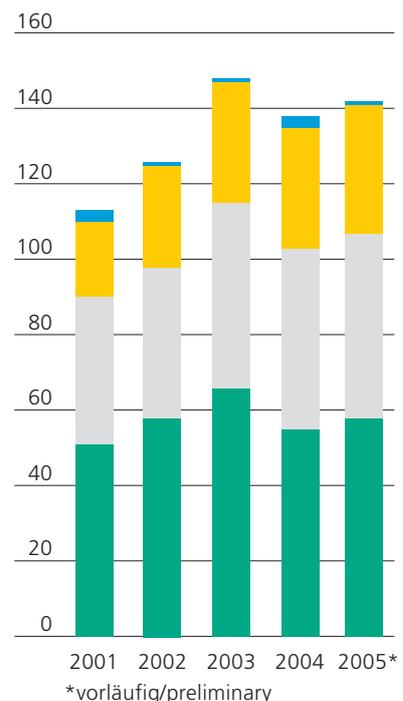


Budget (%)



- Industrie/Contracts (Industry)
- öffentliche Aufträge/Contracts (Government)
- Grundfinanzierung/Federal funding

Mitarbeiter/Staff



- Wissenschaftler/Scientists
- Techniker/Technicians
- Schüler und Studenten/Students
- Sonstige/Temporary contracts

In 2003 the Fraunhofer-Gesellschaft and the Friedrich Schiller University of Jena signed a cooperation contract. It is the foundation for an effective collaboration between the employees of Fraunhofer IOF and of the Institute for Applied Physics of the FSU.

Investments

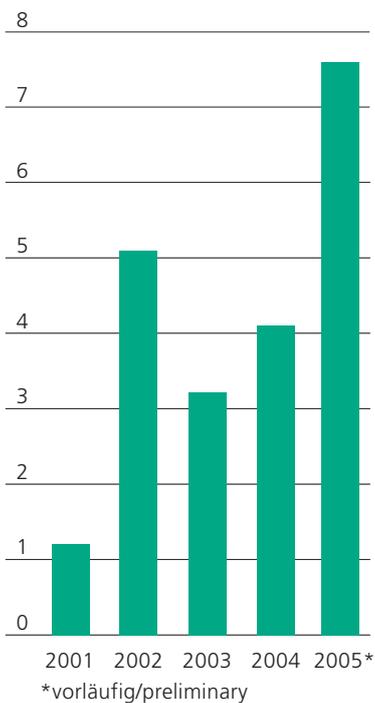
Funds of 12 million euros et all are granted by the EU, the Free State of Thuringia and the Fraunhofer-Gesellschaft for the years 2004, 2005 and 2006 for new Electron Beam Lithography Equipment. Based on it the Center for Advanced Micro- and Nanooptics – CMN-Optics will open in the middle of 2006.

Employees 2005	IOF	IAP
Scientists	45	33
PhD students	13	15
Technicians	49	17
graduate assistants	34	39
trainees	7	—

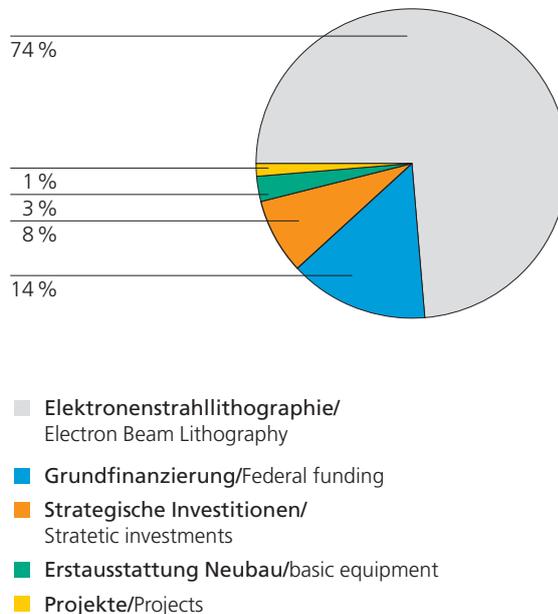
Expenses 2005 mio €	IOF	IAP
personnel	5.6	3.2
material	4.7	0.5
Investments	7.6	1.2

Laboratories and offices	
Fraunhofer IOF	5 000 m ²
IAP	1 200 m ²

Investitionen/Investments (Mio. Euro)



Investitionen/Investments 2005



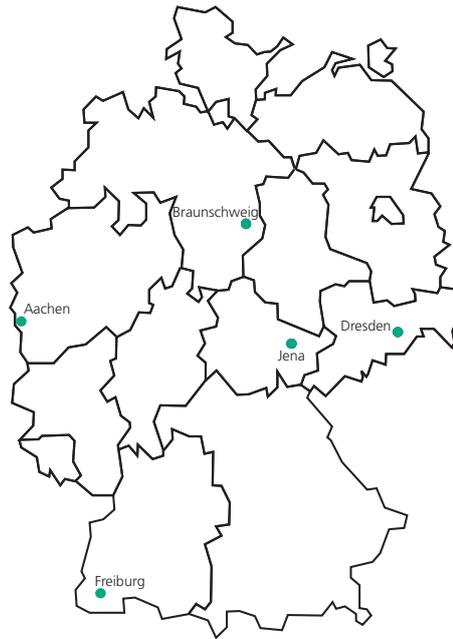


Fraunhofer Verbund
Oberflächentechnik
und Photonik

Kontakt/Koordination
Contact/Coordination

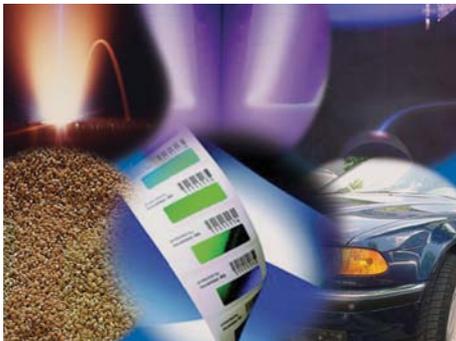
Verbundvorsitzender/Presider
Prof. Dr. Eckard Beyer

Koordination/Coordination
Udo Klotzbach
Phone: 03 51/25 83-2 52



Kompetenz durch Vernetzung

Sechs Fraunhofer-Institute kooperieren im Verbund Oberflächentechnik und Photonik. Aufeinander abgestimmte Kompetenzen gewährleisten eine permanente, schnelle und flexible Anpassung der Forschungsarbeiten an den raschen technologischen Fortschritt in allen industriellen Anwendungsbereichen. Koordinierte, auf die aktuellen Bedürfnisse des Marktes ausgerichtete Strategien führen zu Synergieeffekten zum Nutzen des Kunden.



Fraunhofer-Institut für Elektronenstrahl- und Plasmatechnik FEP
Ziel des FEP ist die Erforschung und Entwicklung innovativer Verfahren zur Nutzung von Elektronenstrahlen hoher Leistung und dichter Plasmen in Produktionsprozessen für die Oberflächentechnik. Dabei stehen praktische Fragestellungen wie Prozessmonitoring, Qualitätskontrolle, Reproduzierbarkeit, Aufskalierung und Wirtschaftlichkeit im Vordergrund.

Fraunhofer Institute for Electron Beam and Plasma Technology FEP
The ambition of FEP is the research and development of innovative processes for the utilisation of high performance electron beams and vacuum sealed plasmas for surface technology. Priority is given to problems like process monitoring, quality control, reproducibility, scaling, and profitability.

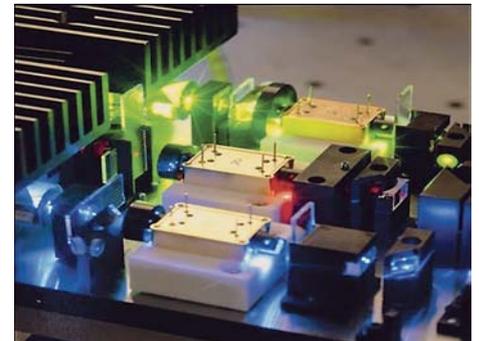
Fraunhofer FEP, Dresden
www.fep.fraunhofer.de



Fraunhofer-Institut für Lasertechnik ILT
Im Bereich der Lasertechnik ist das Zusammenspiel zwischen Laserentwicklung und Laseranwendung von herausragender Bedeutung. Neue Laser erlauben neue Anwendungen und neue Anwendungen geben Anregungen für neue Lasersysteme. Deshalb erweitert das Fraunhofer ILT durch die enge Kooperation mit führenden Laserherstellern und innovativen Laseranwendern ständig seine Kernkompetenzen.

Fraunhofer Institute for Laser Technology ILT
In the area of laser technology, the interactive relationship between laser development and laser applications is of prime importance. New lasers allow new applications, and new applications set the stage for new laser systems. This is why the Fraunhofer ILT is continually expanding its core competencies through close cooperation with leading laser manufacturers and innovative laser consumers.

Fraunhofer ILT, Aachen
www.ilt.fraunhofer.de



Fraunhofer-Institut für Angewandte Optik und Feinmechanik IOF
Hauptgegenstand der Forschungstätigkeit des Fraunhofer IOF ist die optische Systemtechnik mit dem Ziel der immer besseren Kontrolle von Licht. Schwerpunkte sind multi-funktionale optische Schichtsysteme, mikro-optische Systeme, optische Messsysteme und Systeme zur Optik-Charakterisierung, feinmechanische Präzisionssysteme sowie die Mikromontage.

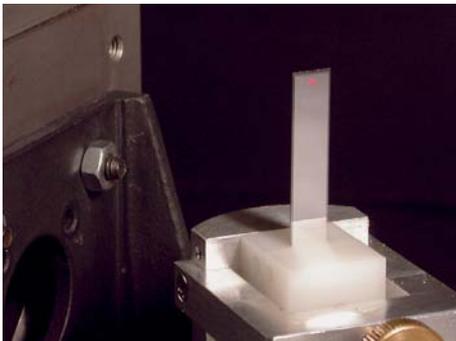
Fraunhofer Institute for Applied Optics and Precision Engineering IOF
The core of the research activity of Fraunhofer IOF is optical systems engineering aimed at a steady improvement of light control. The institute's focus is on multifunctional optical coatings, optical measurement systems, micro-optical systems, systems for the characterization of optics and components for precision mechanics systems and assemblies.

Fraunhofer IOF, Jena
www.iof.fraunhofer.de

Competence by Networking

Six Fraunhofer Institutes cooperate in the Fraunhofer Surface Technology and Photonics Alliance. Co-ordinated competences allow for a permanent, quick and flexible alignment of research work on the rapid technological progress in all industrial fields of application. This market-oriented approach ensures an even wider range of services and creates synergetic effects for the benefit of our customers.

Kernkompetenzen Core Competences	FEP Dresden	ILT Aachen	IOF Jena	IPM Freiburg	IST Braunschweig	IWS Dresden
Schicht- u. Oberflächentechnologie/ Coating and Surface Engineering	●	●	●	●	●	●
Strahlquellen/ Beam Sources	●	●	●	●		
Mikro- und Nanotechnologie/ Micro- and Nanotechnology	●	●	●	●	●	●
Materialbearbeitung/ Materials Treatment	●	●			●	●
Optische Messtechnik/ Optical Measurement Technique		●	●	●	●	●



Fraunhofer-Institut für Physikalische Messtechnik IPM
Das Fraunhofer IPM entwickelt optische Systeme für die Spektroskopie und Laserbelichtungstechnik. Ein besonderer Schwerpunkt liegt dabei auf der Verwirklichung hochdynamischer Systeme. Neben der schnellen Laseransteuerung sind dafür besondere Kompetenzen bei der Signalverarbeitung gefragt. So wurden für die Infrastrukturüberwachung von Hochgeschwindigkeitsstrecken robuste, wartungsarme Messgeräte realisiert.

Fraunhofer Institute for Physical Measurement Techniques IPM
The Fraunhofer IPM develops optical systems for applications in spectroscopy and light exposure technology. A major focus is the realization of highly dynamical systems. Besides a rapid activation, they require special competencies in signal processing as realized through robust and low maintenance measurement systems for the infrastructure monitoring of high speed railway roads.

Fraunhofer IPM, Freiburg
www.ipm.fraunhofer.de



Fraunhofer-Institut für Schicht und Oberflächentechnik IST
Das Fraunhofer IST bündelt als industrienahes FuE-Dienstleistungszentrum Kompetenzen auf den Gebieten Schichtherstellung, Schichtanwendung und Schichtcharakterisierung. Zurzeit ist das Institut in folgenden Geschäftsfeldern tätig: Maschinenbau und Fahrzeugtechnik; Werkzeuge; Energie; Glas und Fassade; Optik; Information und Kommunikation; Mensch und Umwelt.

Fraunhofer Institute for Surface Engineering and Thin Films IST
As an industry oriented R&D service center, the Fraunhofer Institute for Surface Engineering and Thin Films IST is pooling competencies in the areas film deposition, coating application and film characterization. Presently, the institute is operating in the following business fields: mechanical and automotive engineering; tools; energy; glass and facade; optics; information and communication; life science and ecology.

Fraunhofer IST, Braunschweig
www.ist.fraunhofer.de



Fraunhofer-Institut für Werkstoff- und Strahltechnik IWS
Das Fraunhofer IWS forscht auf den Gebieten der Lasertechnik (z. B. Laserschweißen, Laserschneiden, Laserhärten), der Oberflächentechnik (z.B. Auftragschweißen), der Mikrobearbeitung sowie der Dünnschicht- und Nanotechnologie. Die in die Forschung und Entwicklung integrierte Werkstoffprüfung und -charakterisierung fundiert und erweitert das Spektrum des IWS.

Fraunhofer Institute for Material and Beam Technology IWS
The Fraunhofer IWS is conducting research in the areas of laser technology (e.g. laser beam welding, cutting, hardening), surface technology (e.g. build-up welding), micro machining as well as thin film and nano technology. The integration of material testing and characterization into research and development constitutes and upgrades the IWS spectrum.

Fraunhofer IWS, Dresden
www.iws.fraunhofer.de

The Fraunhofer-Gesellschaft

Die Fraunhofer-Gesellschaft

Die Fraunhofer-Gesellschaft betreibt anwendungsorientierte Forschung zum direkten Nutzen für Unternehmen und zum Vorteil der Gesellschaft. Vertragspartner und Auftraggeber sind Industrie- und Dienstleistungsunternehmen sowie die öffentliche Hand. Im Auftrag und mit Förderung durch Ministerien und Behörden des Bundes und der Länder werden zukunftsrelevante Forschungsprojekte durchgeführt, die zu Innovationen im öffentlichen Nachfragebereich und in der Wirtschaft beitragen.

Mit technologie- und systemorientierten Innovationen für ihre Kunden tragen die Fraunhofer-Institute zur Wettbewerbsfähigkeit der Region, Deutschlands und Europas bei. Dabei zielen sie auf eine wirtschaftlich erfolgreiche, sozial gerechte und umweltverträgliche Entwicklung der Gesellschaft.

Ihren Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern bietet die Fraunhofer-Gesellschaft die Möglichkeit zur fachlichen und persönlichen Entwicklung für anspruchsvolle Positionen in ihren Instituten, in anderen Bereichen der Wissenschaft, in Wirtschaft und Gesellschaft.

Die Fraunhofer-Gesellschaft betreibt derzeit rund 80 Forschungseinrichtungen, davon 58 Institute, an über 40 Standorten in ganz Deutschland. Rund 12 500 Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter, überwiegend mit natur- oder ingenieurwissenschaftlicher Ausbildung, bearbeiten das jährliche Forschungsvolumen von über 1 Milliarde Euro. Davon fallen mehr als 900 Millionen Euro auf den Leistungsbereich Vertragsforschung. Rund zwei Drittel dieses Leistungsbereichs erwirtschaftet die Fraunhofer-Gesellschaft mit Aufträgen aus der Industrie und mit öffentlich finanzierten Forschungs-

projekten. Ein Drittel wird von Bund und Ländern beigesteuert, auch um damit den Instituten die Möglichkeit zu geben, Problemlösungen vorzubereiten, die in fünf oder zehn Jahren für Wirtschaft und Gesellschaft aktuell werden. Niederlassungen in Europa, in den USA und in Asien sorgen für Kontakt zu den wichtigsten gegenwärtigen und zukünftigen Wissenschafts- und Wirtschaftsräumen.

Mitglieder der 1949 gegründeten und als gemeinnützig anerkannten Fraunhofer-Gesellschaft sind namhafte Unternehmen und private Förderer. Von ihnen wird die bedarfsorientierte Entwicklung der Fraunhofer-Gesellschaft mitgestaltet. Namensgeber der Gesellschaft ist der als Forscher, Erfinder und Unternehmer gleichermaßen erfolgreiche Münchner Gelehrte Joseph von Fraunhofer (1787–1826).

The Fraunhofer-Gesellschaft

The Fraunhofer-Gesellschaft undertakes applied research of direct utility to private and public enterprise and of wide benefit to society. Its services are solicited by customers and contractual partners in industry, the service sector and public administration. The organization also accepts commissions and funding from German federal and Länder ministries and government departments to participate in future-oriented research projects with the aim of finding innovative solutions to issues concerning the industrial economy and society in general.

By developing technological innovations and novel systems solutions for their customers, the Fraunhofer Institutes help to reinforce the competitive strength of the economy in their local region, and throughout Germany and Europe. Through their work, they aim to promote the successful economic

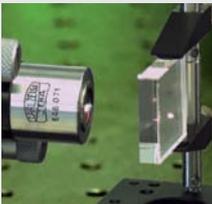
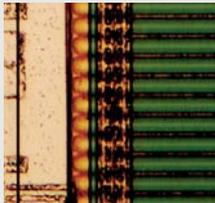
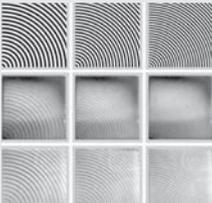
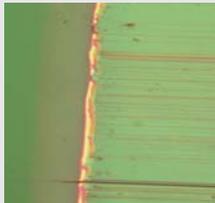
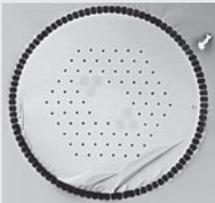
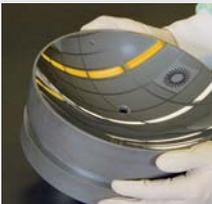
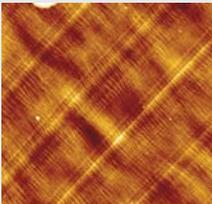
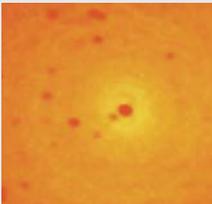
development of our industrial society, with particular regard for social welfare and environmental compatibility.

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, in other scientific domains, in industry and in society.

At present, the Fraunhofer-Gesellschaft maintains some 80 research units, including 58 Fraunhofer Institutes, at over 40 different locations in Germany. The majority of the roughly 12,500 staff are qualified scientists and engineers, who work with an annual research budget of over 1 billion euros. Of this sum, more than € 900 million is generated through contract research. Roughly two thirds of the Fraunhofer-Gesellschaft's contract research revenue is derived from contracts with industry and from publicly financed research projects. The remaining one third is contributed by the German federal and Länder governments, partly as a means of enabling the institutes to pursue more fundamental research in areas that are likely to become relevant to industry and society in five or ten years' time. Affiliated research centers and representative offices in Europe, the USA and Asia provide contact with the regions of greatest importance to present and future scientific progress and economic development.

The Fraunhofer-Gesellschaft was founded in 1949 and is a recognized non-profit organization. Its members include well-known companies and private patrons who help to shape the Fraunhofer-Gesellschaft's research policy and strategic development. The organization takes its name from Joseph von Fraunhofer (1787–1826), the illustrious Munich researcher, inventor and entrepreneur.

2005





Torsten Feigl



Sergiy Yulin



Nicolas Benoit



Uwe Detlev Zeitner



Tino Benkenstein



Thomas Peschel



Christoph Damm



Norbert Kaiser

Einleitung

Der Anspruch zur Erhöhung der Auflösung optischer Systeme sowie der Bedarf nach Strukturierung und Visualisierung immer kleinerer Details der uns umgebenden Welt hat die Optikentwicklung in den letzten Jahren nachhaltig beeinflusst.

So ist – hervorgerufen vor allem durch Bestrebungen der Halbleiterindustrie, immer kurzwelligere Strahlung zur Lithographie integrierter Schaltkreise zu nutzen – das globale Interesse an Optikkomponenten für extrem ultraviolette (EUV) Strahlung sprunghaft angestiegen.

Da die absorptionsbedingte Eindringtiefe von EUV-Strahlung in Materie nur wenige hundert Nanometer beträgt, erfolgt die Strahlformung in diesem Wellenlängenbereich mit Hilfe reflektiver Optiken. Verwendung finden vor allem aus alternierenden Schichtmaterialien unterschiedlicher Brechzahlen bestehende EUV-Multilayerspiegel /1/. Die zugrunde liegende Idee besteht, vergleichbar mit den aus der klassischen Optik bekannten $\lambda/4$ -Systemen, in der konstruktiven Interferenz aller an den einzelnen Schichtgrenzflächen reflektierten Teilwellen /2/ (Abb. 1).

Neben der Entwicklung hochreflektierender und thermisch sowie strahlungsstabiler Schichtsysteme wurden am Fraunhofer IOF Jena Kollektor- und Abbildungsoptiken für verschiedene Anwendungen realisiert. Mit der Beschichtung eines EUV-Kollektorspiegels für Hochleistungslaserplasma-Quellen sowie der Realisierung eines modifizierten 10x EUV-Schwarzschild-Objektivs werden im Folgenden ausgewählte Ergebnisse laufender FuE-Aktivitäten vorgestellt.

Kollektorspiegel für Laserplasma-Quellen

Die nutzbare Leistung einer Hochleistungs-EUV-Quelle bei 13,5 nm und 2% Bandbreite sowie die Lebenszeit von Quelle und Kollektroptik stellen gegenwärtig eine der größten Herausforderungen beim Übergang der EUV-Lithographie vom Entwicklungsstatus in die Produktion dar. Die derzeit verfolgten Kollektorkonzepte werden vor allem von der Quellgeometrie vorgegeben. Während Gasentladungsquellen hauptsächlich Wolterkollektoren unter streifendem Einfall nutzen, finden bei Laserplasma-Quellen Multilayer-Kollektorspiegel Verwendung. Am Fraunhofer IOF Jena wurden verschiedene Technologien zur definierten Abscheidung hochreflektierender lateraler Gradientenschichtsysteme auf stark gekrümmten Kollektorsubstraten entwickelt.

Introduction

The demand to enhance the optical resolution, to structure and observe ever smaller details, has pushed optics development in recent years. Mainly induced by the production of more powerful electronic circuits with the aid of projection lithography, an increasing interest is directed towards optical components for the extreme ultraviolet (EUV) spectral region.

The penetration depth of EUV radiation into matter is only a few nanometers due to absorption. Hence, reflective optics must be used for imaging and light collection such as EUV multilayer mirrors which consist of alternating thin films with different refractive indices n_1/n_2 . This basic idea can be compared to the classic high reflective $\lambda/4$ systems: the constructive interference of all beams reflected at the film interfaces n_1/n_2 (Fig. 1).

Beside the development of high-reflective multilayers with enhanced thermal and radiation stability, the Fraunhofer IOF Jena realized EUV collector and imaging optics for diverse applications. This paper covers recent results of our current R&D work in the field of EUV multilayer optics. The deposition of an EUV collector mirror for high-power laser produced plasma (LPP) sources as well as the realization and testing of a modified 10x EUV Schwarzschild objective are discussed.

LPP source collector mirror

The output power of a high-power EUV source at 13.5 nm and 2 % bandwidth and the source and collector lifetime can be regarded as one of the major challenges of EUV lithography development today. Current collector mirror concepts are mainly based on the source geometry. Grazing incidence Wolter collectors are commonly used for discharge produced plasma (DPP) sources while multilayer collector mirrors are finding applications for LPP sources. At the Fraunhofer IOF Jena, different technologies for the precise deposition of high-reflective and laterally graded multilayers on curved collector substrates have been developed in the past.

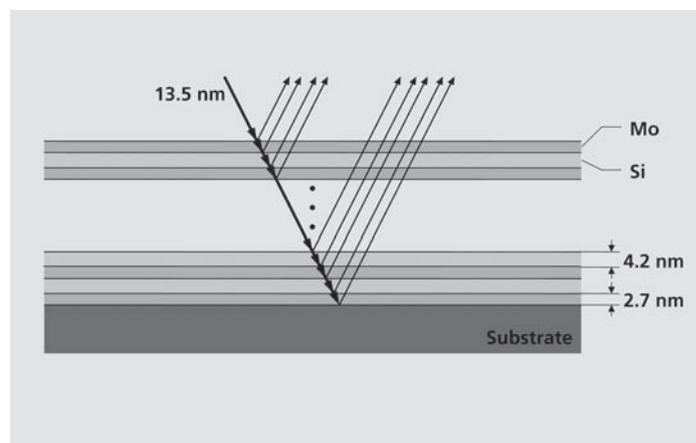


Abb. 1:
EUV-Multilayer-Optik –
Prinzip der konstruktiven Interferenz.

Fig. 1:
EUV multilayer optics –
principle of constructive interference.

Abbildung 2 zeigt einen beschichteten π sr Kollektorspiegel für Hochleistungslaserplasma-Quellen. Das elliptisch geformte Substrat wurde aus einkristallinem Silizium gefertigt, hat einen Durchmesser von 250 mm und eine Pfeilhöhe von ca. 40 mm (Substratherstellung: Jenoptik L.O.S. GmbH). Die Mo/Si-Multilayer-Beschichtung wurde mit der EUV-Spezialsputteranlage NESSY realisiert [3]. Die Einfallswinkel auf der Spiegeloberfläche variieren von Normaleinfall im Spiegelzentrum bis ca. 22° am Rand des Kollektors, so dass die Erfüllung der Bragg-Bedingung an jedem Punkt der Spiegeloberfläche die Realisierung eines lateral eindimensionalen Schichtdickgradienten erfordert.

Bei einer Abweichung von 0,05 nm von der Designwellenlänge 13,5 nm ergibt sich ein maximaler Fehler der Periodendicke im Multilayer von $\Delta d/d = 0,37\%$. Der zulässige absolute Fehler der Periodendicke beträgt somit $\Delta d = 0,025$ nm. Abbildung 3 verdeutlicht die Situation in der Darstellung der idealen und experimentell realisierten Periodendicke in Abhängigkeit des Kollektorradius. Die gemessene Peakreflexion des Kollektorspiegels beträgt $R = 67,7\%$ bei 13,5 nm im Zentrum des Spiegels und fällt zum Rand auf $R = 64,7\%$ ab (Abb. 4).

Abb. 2:
Beschichteter EUV-Kollektorspiegel
für Laserplasma-Quelle
(Substrat: Jenoptik L.O.S. GmbH).

Fig. 2:
Mo/Si coated EUV collector mirror
for high-power LPP sources
(substrate: Jenoptik L.O.S. GmbH).

Schwarzschild-Objektiv

Schwarzschild-Objektive werden wegen ihrer großen Apertur, der Freiheit von chromatischen Aberrationen und ihrer hohen mechanischen Stabilität zunehmend als Abbildungsoptiken im EUV-Spektralbereich genutzt. Die Einsatzmöglichkeiten derartiger Objektive sind vielfältig und reichen von Anwendungen für die EUV-Lithographie über die Grundlagenforschung mit Synchrotronstrahlung bis zu Abbildungsoptiken für Röntgenlaser. Je nach Richtung des Strahlenganges können die aus einem konvexen und einem konkaven Multilayerspiegel bestehenden Objektivbaugruppen zur Vergrößerung (z.B. Mikroskopie) oder Verkleinerung (z.B. Lithographie) von Objekten eingesetzt werden (Abb. 5).

Extreme Anforderungen an die Komponenten eines Schwarzschild-Objektives entstehen bei der Realisierung beugungsbegrenzter Abbildungen bei $\lambda = 13,5$ nm. Wegen der maximal zulässigen Deformation der optisch wirksamen Flächen im Subnanometer-Bereich ist die Verformung der Spiegelsubstrate durch Gravitation, intrinsische Spannungen der Beschichtung sowie die mechanische Objektivhalterung zu berücksichtigen und gegebenenfalls zu korrigieren. Die spannungsarme mechanische Halterung der Multilayerspiegel muss sich auf wenige Mikrometer genau positionieren und zentrieren lassen.



Figure 2 shows a coated π sr collector mirror for high-power LPP sources. The ellipsoidal substrate with an outer diameter of 250 mm and a lens sag of 40 mm was made of single crystalline silicon (manufacturer: Jenoptik L.O.S. GmbH). The Mo/Si multilayer coating was deposited with the EUV sputtering system NESSY [3]. The angles of incidence vary from normal incidence at the mirror center to about 22 degrees at the mirror edge. In order to meet the Bragg condition at every position of the mirror surface a one-dimensional lateral film thickness gradient had to be realized.

A deviation of 0.05 nm from the design wavelength of 13.5 nm represents a maximum period thickness error of $\Delta d/d = 0.37\%$. Thus, the absolute period thickness error that can be

tolerated within the multilayer stack is $\Delta d = 0.025$ nm. Figure 3 shows the ideal and measured period thickness as a function of the collector mirror radius. The measured peak reflectivity of the collector mirror varies from $R = 67.7\%$ at 13.5 nm in the center to $R = 64.7\%$ at the edge of the mirror (Fig. 4).

Schwarzschild objective

Schwarzschild objectives are increasingly used as imaging optics in the EUV spectral region because of their large aperture, high mechanical stability and they are free of chromatic aberrations. The use of such objectives is manifold starting from applications for EUV lithography, fundamental research using Synchrotron radiation to imaging optics for X-ray lasers.

A Schwarzschild objective consists of a convex and a concave multilayer coated mirror. Depending on the optical path of the objective it can be used for the magnification (e.g. microscopy) or demagnification (e.g. lithography) of objects and structures (Fig. 5).

Extreme component requirements of a Schwarzschild objective must be met in order to realize diffraction-limited imaging at $\lambda = 13.5$ nm. The tolerable maximum surface figure error is in the sub-nanometer range. Hence, substrate surface deformation by gravitation, intrinsic mechanical stresses of the coating and the mechanical holder has to be taken into account and – if necessary – corrected properly. The optical components have to be positioned and centered within their low-stress mechanical holder with an accuracy of a few microns.

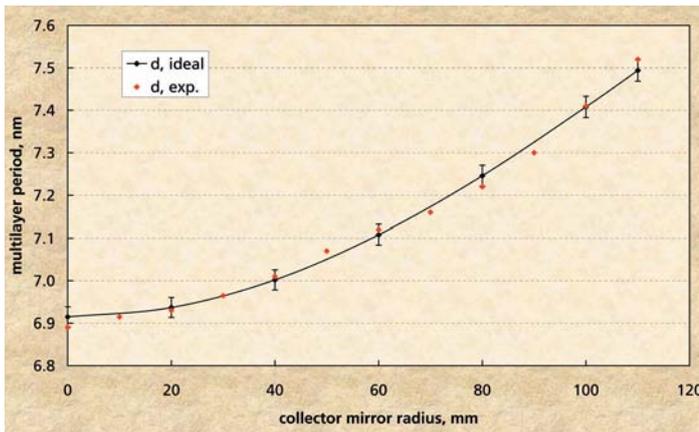


Abb. 3: Lateral Schichtdickegradient auf EUV-Kollektorspiegel. Fehlerbalken: $\Delta d/d = 0.37\%$, entsprechend $\lambda = (13,50 \pm 0,05)$ nm.

Fig. 3: Lateral thickness gradient on EUV collector mirror. Error bar: $\Delta d/d = 0.37\%$, corresponding to $\lambda = (13.50 \pm 0.05)$ nm.

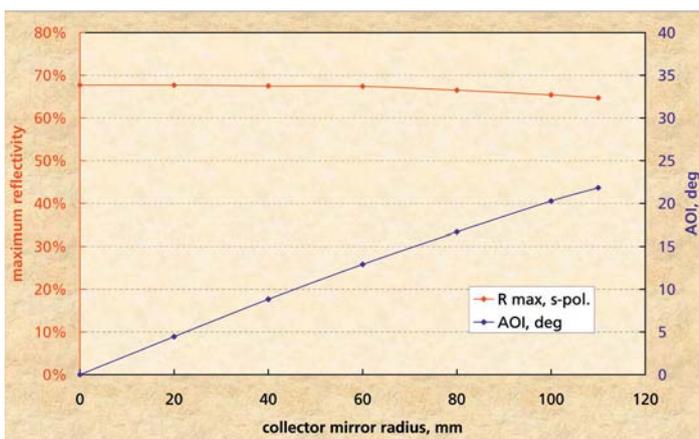


Abb. 4: Gemessene EUV-Reflexion und Verlauf des Einfallswinkels auf EUV-Kollektorspiegel (R-Messung: PTB Berlin).

Fig. 4: Measured EUV reflection and angle of incidence on EUV collector mirror (R-measurement: PTB Berlin).

Zur Minimierung von Kontamination und Degradation der optischen Flächen erfolgt eine kohlenwasserstofffreie Auslegung der Fassung.

Neben EUV Schwarzschild-Objektiven zur Realisierung beugungsbegrenzter Abbildungen wurden am Fraunhofer IOF in der Vergangenheit auch Objektive für alternative Anwendungen im EUV-Spektralbereich entwickelt und realisiert. Abbildung 6 zeigt ein modifiziertes 10 x Schwarzschild-Objektiv für 13,5 nm zur Erzeugung einer hohen Energiedichte im Fokus für Grundlagenuntersuchungen von Photonen-Materie-Wechselwirkungsprozessen.

Die numerische Apertur des realisierten Schwarzschild-Objektivs beträgt 0,44. Die sphärischen Substrate wurden aus ULE gefertigt und mit einem hochreflektierenden Mo/Si-Schichtsystem beschichtet. Auf der optisch wirksamen Spiegelfläche wurde eine Reflektivität von $R > 65\%$ bei $\lambda = 13,5$ nm gemessen. Die mechanische Halterung von Primär- und Sekundärspiegel ist für ein horizontales Strahlführungssystem ausgelegt, wobei beide Spiegel durch eine 120° Dreipunktauflage in den Nuten ihrer Mantelflächen senkrecht stehend gelagert werden.

Durch Integration des Schwarzschild-Objektivs an die Laserplasma-Quelle des Laser-Laboratoriums Göttingen erfolgte durch die 10fach verkleinerte Abbildung eines 50 μm Pinholes hinter der Plasmaquelle die Erzeugung eines EUV-Spots hoher Intensität. Bei 5 μm Durchmesser wurden Energiedichten von einigen mJ/cm^2 nachgewiesen. Damit gelangen bereits erste Direktstrukturierungen ausgewählter Materialien: Abbildung 7 zeigt die Bildung von Farbzentren in LiF-Kristallen durch direkt schreibende Bearbeitung mit 13,5 nm /4/.

Zusammenfassung

Am Fraunhofer IOF Jena wurden Kollektor- und Abbildungsoptiken für verschiedene Anwendungen im EUV-Spektralbereich realisiert. Schwerpunkt laufender FuE-Aktivitäten sind gegenwärtig EUV-Multilayer-Optiken für die EUV-Lithographiewellenlänge von 13,5 nm. Zukünftige Arbeiten auf dem Gebiet der Schichtentwicklung konzentrieren sich auf die Optimierung von Diffusionsbarrierschichten mit dem Ziel einer deutlich verbesserten Reflexion sowie thermischen und Strahlungsstabilität von EUV-Multilayer-Optiken.

Danksagung

Wir danken Jenoptik L.O.S. GmbH und XTREME technologies GmbH für die finanzielle Unterstützung der Entwicklungsarbeiten zum EUV-Kollektorspiegel.

Die Entwicklung des Schwarzschild-Objektivs erfolgte im Rahmen des BMBF-Verbundprojektes KOMPASS »Kompakte Strahlquelle hoher Brillanz für den weichen Röntgen-Spektralbereich« (FKZ: 13N8405) in Zusammenarbeit mit den Projektpartnern Laserlaboratorium Göttingen e.V. und Laserzentrum Hannover e.V.

Literatur:

- /1/ Spiller, E.: "Low-loss reflection coatings using absorbing materials", Appl. Phys. Lett. 20, 1972, pp. 365–367.
- /2/ Yulin, S.: "Multilayer Coatings for EUV/Soft X-ray Mirrors", Optical Interference Coatings (Eds. N. Kaiser and H. Pulker), Springer Series in Photonics, 2003, pp. 281–307.
- /3/ Feigl, T.; Yulin, S.; Benoit, N.; Kaiser, N.: "Multilayer optics for the EUV and soft X-rays", Optics and Precision Engineering Vol. 13, No. 4, 2005, pp. 421–429.
- /4/ Barkusky, F.; Peth, C.; Mann, K.; Feigl, T.; Kaiser, N.: "Formation and direct writing of color centers in LiF using a laser-induced extreme ultraviolet plasma in combination with a Schwarzschild objective", Rev. Sci. Instr. 76, 2005.

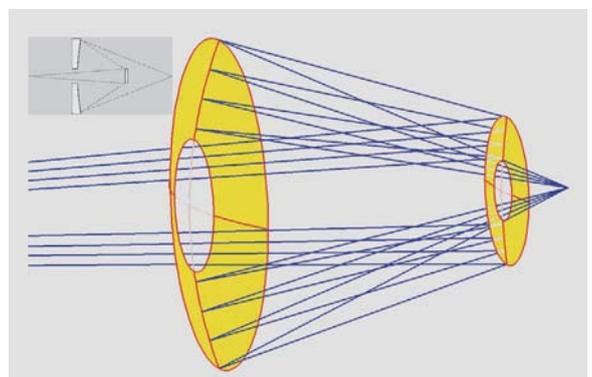


Abb. 5:
Strahlengang in einem modifizierten Schwarzschild-Objektiv für 13,5 nm (oben: klassisches Schwarzschild-Objektiv).

Fig. 5:
Optical path of a modified Schwarzschild objective for 13.5 nm (top: classical Schwarzschild objective).

A hydrocarbon-free mounting design is essential to minimize the contamination and degradation of the optical surfaces.

Beside the realization of EUV Schwarzschild objectives for diffraction limited imaging, the Fraunhofer IOF developed and realized various objectives for different applications in the EUV spectral range. Figure 6 shows a modified 10x Schwarzschild objective for 13.5 nm to generate high focus intensities for fundamental investigations of photon-matter interactions.

The numerical aperture of the realized Schwarzschild objective is 0.44. The spherical substrates are made of ULE and were coated with a high-reflective Mo/Si multilayer. A reflectivity of $R > 65\%$ at $\lambda = 13.5\text{ nm}$ were measured at the clear aperture. The mechanical holder of the primary and secondary mirror was optimized for a horizontal optical path. Both mirrors are vertically mounted using a 120° three-point support.



Abb. 6:
10x Schwarzschild-Objektiv für 13,5 nm.

Fig. 6:
10x Schwarzschild objective for 13.5 nm.

The EUV Schwarzschild objective was adapted at the laser produced plasma source of the Laser-Laboratorium Göttingen. An EUV spot was generated by tenfold demagnification of a $50\ \mu\text{m}$ pinhole that was positioned close to the plasma source. Focus intensities of some mJ/cm^2 were demonstrated at a focus diameter of $5\ \mu\text{m}$. The EUV spot was used for direct structuring of selected materials. Figure 7 shows the creation of color centers in LiF crystals by direct writing with $13.5\ \text{nm}$ /4/.

Summary

Diverse collector and imaging optics for various applications in the EUV spectral range were realized at the Fraunhofer IOF Jena. EUV multilayer optics for EUV lithography applications at a wavelength of $13.5\ \text{nm}$ are the main focus of current R & D activities. Future works on multilayer development will concentrate on diffusion barrier layer optimization to enhance both the reflectivity and the thermal as well as the radiation stability of EUV multilayer optics.

Acknowledgements

We would like to thank Jenoptik L.O.S. GmbH and XTREME technologies GmbH for the financial support of the EUV collector mirror development. The Schwarzschild objective was realized within the frame of the BMBF joint project KOMPASS (FKZ: 13N8405). We thank our project partners Laser-Laboratorium Göttingen e.V. and Laserzentrum Hannover e.V. for their collaboration.

References:

- /1/ Spiller, E.: "Low-loss reflection coatings using absorbing materials", *Appl. Phys. Lett.* 20, 1972, pp. 365–367.
- /2/ Yulin, S.: "Multilayer Coatings for EUV/Soft X-ray Mirrors", *Optical Interference Coatings* (Eds. N. Kaiser and H. Pulker), Springer Series in Photonics, 2003, pp. 281–307.
- /3/ Feigl, T.; Yulin, S.; Benoit, N.; Kaiser, N.: "Multilayer optics for the EUV and soft X-rays", *Optics and Precision Engineering* Vol. 13, No. 4, 2005, pp. 421–429.
- /4/ Barkusky, F.; Peth, C.; Mann, K.; Feigl, T.; Kaiser, N.: "Formation and direct writing of color centers in LiF using a laser-induced extreme ultraviolet plasma in combination with a Schwarzschild objective", *Rev. Sci. Instr.* 76, 2005.

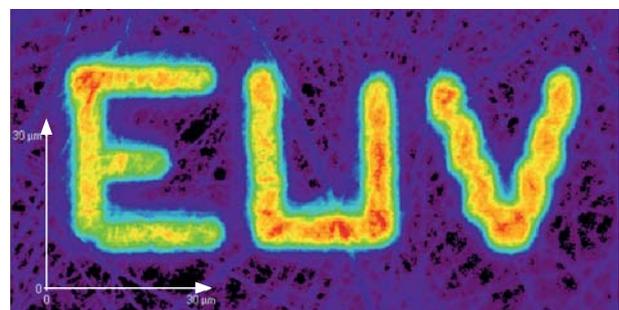


Abb. 7:
Erzeugung von Farbzentren in LiF-Kristallen durch Bearbeitung mit $13,5\ \text{nm}$ -Spot (Laser-Laboratorium Göttingen).

Fig. 7:
Color centers in LiF crystals by structuring with $13.5\ \text{nm}$ spot (Laser-Laboratorium Göttingen).

Ultraplanare Elektrostatische Chucks für Next-Generation-Lithographie



Gerhard Kalkowski



Stefan Risse



Sandra Müller



Gerd Harnisch

Einleitung

Im Wettlauf um immer kürzere Rechenzeiten und kleinere Strukturen bei mikroelektronischen Schaltkreisen setzt der Lithographieprozess die Grenzen. Die Wellenlänge hat in der optischen Lithographie in den letzten Jahren kontinuierlich abgenommen und mittlerweile 193 nm erreicht. Mittels Flüssig-Immersion (Wasser) werden inzwischen Strukturbreiten von 65 nm (half pitch) erzielt und sogar 45 nm wurden demonstriert. Für Strukturen von 32 nm und darunter wird dies jedoch nicht ausreichen und es werden neue Lithographie-Verfahren wie z. B. die Extrem Ultraviolett Lithographie (EUVL) (mit einer Wellenlänge von 13 nm), die direkt-schreibende Elektronenstrahl-Belichtung oder sogar Nano-Druck-Techniken für die kritischen Strukturen zum Einsatz kommen /1/. Im Hinblick auf große Stückzahlen ist die EUVL ein besonders aussichtsreicher Kandidat.

Die Vakuumverhältnisse von zukünftigen EUVL-Steppern sind weitgehend identisch mit jenen in heutigen Elektronenstrahl-Lithographie-Anlagen, so dass das hochstabile Halten der Maske und des Wafers mittels elektrostatischer Haltevorrichtungen erfolgen kann. Die Prozesseigenschaften sind dabei vergleichbar mit dem bekannten Halten durch Unterdruckkräfte an Luft: die elektrostatische Anziehung sorgt für eine gleichmäßige Verteilung der Haltekräfte über die gesamte Fläche, einen guten Wärmeaustausch und reduzierten Abrieb, bzw. Partikelanfall, gegenüber klassischen 3-Punkt-Auflagen mit hohen Belastungen und Deformationen im Berührungspunkt.

Durch einen elektrostatischen Chuck (ESC) kann ein durchgebogener Wafer oder eine Maske »glattgezogen« werden, sofern die Kräfte groß genug sind und der Chuck eben und steif ist. Tatsächlich stellt die Ebenheit für die EUVL die größte Herausforderung dar, da sich Höhenfehler (out-of-plane distortions, OPD) empfindlich als Strukturfehler (in-plane distortions, IPD) niederschlagen und durch nicht-telezentrische Beleuchtungsverhältnisse verschärft werden.

Das Arbeitsprinzip des ESC

Das Prinzip des elektrostatischen Chuckens ist schematisch in Abb. 1 dargestellt. Die Anordnung ist vergleichbar mit einem Plattenkondensator, wobei eine Elektrode und das Dielektrikum durch den Chuck geliefert werden, während die andere Elektrode durch das zu haltende Werkstück (Wafer oder Maske) gebildet wird. Das Werkstück muss elektrisch leitend sein (die intrinsische Leitfähigkeit von Silizium genügt) oder mit einem dünnen Metallfilm beschichtet werden. Wird das Werkstück auf den Chuck gelegt und eine elektrische Spannung U an die beiden Platten angelegt, so ziehen Coulomb-Kräfte das Werkstück mit einer Kraft proportional zum elektrischen Feld, bzw. $(U/d)^2$, auf die Chuck-Oberfläche, wenn d der Plattenabstand ist. Die Materialeigenschaften des Dielektrikums gehen über die relative Dielektrizitätskonstante ϵ ein und es gilt für ein ideales Dielektrikum (bei verschwindendem Auflagespalt) $F/A = \frac{1}{2} \epsilon_0 \epsilon^2 (U/d)^2 / 2$. Größenordnungsmäßig kann mit einer Spannung von 1 kV und einer Dielektrikumsdicke von 100 μm leicht ein elektrostatischer Auflagedruck von etwa 10 kPa erzielt werden.

Ultra-planar electrostatic chucks for next generation lithographies

Introduction

In the race for faster computing speed and shorter paths in micro-electronic circuits, the lithographic structuring process sets the limits. The wavelength in optical lithography has continuously decreased in recent years and has now reached 193 nm. Using liquid immersion techniques, structures of 65 nm (half pitch) are current state of the art, and even 45 nm have been demonstrated. For future manufacturing at the 32 nm node and beyond, however, even immersion based optical technologies come to an end and Extreme Ultraviolet Lithography (EUVL) (at a wavelength of about 13 nm), besides Electron-Beam Direct-Write (e-beam) and Nano-Imprint, are considered as possible alternatives [1]. In particular, as far as high volume production is concerned, EUVL is one of the most promising candidates for next-generation lithography technologies.

Vacuum conditions in future EUVL steppers will be similar to current e-beam lithography tools, and clamping of the mask, as well as the wafers to be exposed, proceeds via electrostatic chucking. This is in many respects comparable to the well established vacuum chucking process under ambient conditions: it ensures a homogeneous distribution of clamping forces over the whole clamping area, good heat transfer and greatly reduced wear and particle generation as compared to 3-point mounts with very high loads and deformations at the points of contact.

Using an electrostatic chuck (ESC), flattening of a bended wafer or mask is possible if chucking forces are sufficiently high and the chuck is flat and stiff. In fact, flatness is the most demanding parameter in EUV lithography, since out-of-plane distortions (OPD) very readily translate into in-plane distortions (IPD) and the non-telecentric illumination conditions accentuate this sensitivity.

ESC principle

The basic principle of an ESC is schematically illustrated in Fig. 1. The geometry is similar to a parallel plate capacitor, with the chuck providing one electrode plus the dielectric, while the substrate (wafer or mask) to be chucked, constitutes the second electrode. Note, that the substrate must be electrically conductive (intrinsic conductivity of Silicon is sufficient) or coated with a thin metallic layer.

When the substrate is laid onto the chuck and a voltage U is applied between the two plates, Coulomb forces build up and attract the substrate to the chuck with a force proportional to the electric field, respectively $(U/d)^2$, where d is the distance between the two plates. Material properties of the dielectric enter into the electrostatic forces via the relative electrical permittivity ϵ . For an ideal dielectric, the force F per area A amounts to $F/A = \frac{1}{2} \epsilon_0 \epsilon^2 (U/d)^2$ in the limit of a vanishing vacuum gap [2]. As an order of magnitude, an electrostatic pressure of about 10 kPa may easily be obtained with a voltage of about 1 kV and a dielectric thickness of about 100 μm .

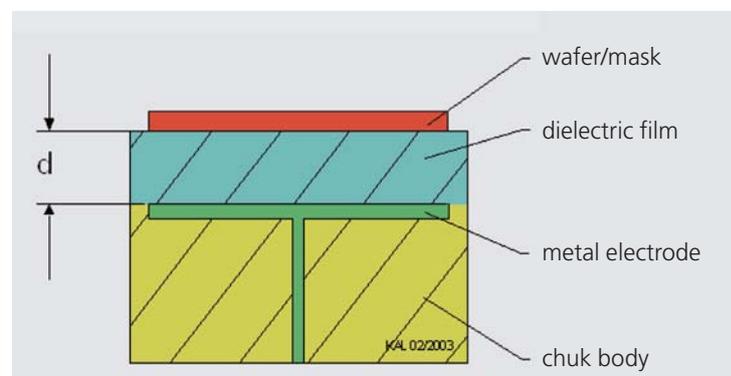


Abb. 1:
Schema des elektrostatischen Chucks.

Fig. 1:
Electrostatic chuck principle (schematic).

Für die Lithographie sind Anlagen-Genauigkeit und Stabilität entscheidende Kriterien. Eine Längenänderung durch Temperaturgang ist kaum zu beherrschen und Materialien mit sehr geringer thermischer Ausdehnung (LTEM, low thermal expansion material) sind gefragt. Am IOF werden Bearbeitungsprozesse und Klebetechniken entwickelt, um ESC aus Glas und Glas-Keramik mit »Null-Ausdehnung«, bzw. einem Ausdehnungskoeffizienten $< 2 \cdot 10^{-8} \text{ K}^{-1}$ nahe Zimmertemperatur (etwa zwei Größenordnungen weniger als bei gewöhnlichen Materialien) herzustellen.

Si-Wafer-Chuck

Für die Elektronenstrahl-Lithographie ebenso wie für die EUVL werden große elektrostatische Wafer-Halter benötigt. Abbildung 2 zeigt einen am IOF gefertigten Wafer-Chuck mit 12 Zoll Durchmesser aus LTEM. Es handelt sich um eine Leichtgewicht-Ausführung, in der durch Bohrungen im Chuck-Körper eine Gewichtsreduzierung um fast 50 % erzielt wurde.

Drei große Durchgangsbohrungen auf etwa halbem Chuck-Radius dienen zum Ausheben des Wafers und seine Übergabe an einen Transportroboter.

Bedeutsamer, aber nicht unmittelbar erkennbar in der Abbildung, ist die hohe Ebenheit der Wafer-Auflagefläche. Tatsächlich liegt die globale Ebenheit (gesamter Durchmesser) für diese Fläche unter $1 \mu\text{m}$ und die lokale Ebenheit über jeden $20 \text{ mm} \times 20 \text{ mm}$ großen Ausschnitt ist noch über eine Größenordnung besser. Ein Blick auf Abb. 2 zeigt, dass die Chuck-Oberfläche strukturiert ist: Es liegt eine Auflagefläche aus lauter kleinen Stiften (Pins) vor. Dies erleichtert den Entchuck-Vorgang und reduziert drastisch das Risiko von Ebenheitsabweichungen auf Grund von Partikeln an der Grenzfläche von Chuck und Wafer. Erfahrungsgemäß ist die Partikel-Problematik unter Produktionsbedingungen immer ein Thema und kann verheerende Folgen haben, da Höhenabweichungen (OPD) beim Lithographie-Prozess unmittelbar in laterale Verzerrungen (IPD) umgesetzt werden und die Überdeckungsgenauigkeit beeinträchtigen.

Auf Basis der elastischen Plattentheorie /3/ wurden die Auswirkungen eines Partikels auf laterale Verzerrungen für einen 12 Zoll-Silizium-Wafer mit einer Dicke von $775 \mu\text{m}$ für verschiedene elektrostatische Drücke analytisch berechnet.

Abbildung 3 zeigt das Ergebnis für ein Partikel mit effektivem Durchmesser von $0,5 \mu\text{m}$ (d. h. der lokale Höhenunterschied nach Berücksichtigung der Hertz'schen Flächenpressung beträgt $0,5 \mu\text{m}$). Die Reichweite der Störung beträgt etwa 10 mm und die laterale Verzerrung (IPD) erreicht etwa 30 nm unter realistischen Bedingungen. Dies ist nicht mehr tolerabel für Strukturen von 65 nm und darunter. Obwohl der analytische Ansatz eine Vereinfachung darstellt und durch Finite-Element-Rechnungen (FEM) verbessert werden kann, illustriert dieses Ergebnis die Ebenheitsanforderungen und die Partikel-Empfindlichkeit kommender Lithographiegenerationen.

EUV-Masken-Chuck

Die zukünftige EUVL sieht vor, Strukturen von einer quadratischen Maske auf den Si-Wafer abzubilden, wobei reflektive Optiken mit alternierenden Mo-Si-Vielfachschichten zum Einsatz kommen. Als Substrate für Spiegel und Masken sind lediglich »Null-Ausdehnungs«-Materialien (LTEM) zugelassen. Die Maske erhält eine dünne Rückseiten-Metallisierung, um sie elektrostatisch halten zu können. Die Chuck-Eigenschaften und die zulässigen Materialien sind kürzlich in einem SEMATECH-Standard festgelegt worden /4/, wobei extreme Ebenheitsanforderungen auftreten: Lediglich Abweichungen von 6 nm sind zulässig innerhalb von Feldern der Größe $(20 \text{ mm})^2$ und weniger als 50 nm über die gesamte Maskenfläche von $(152 \text{ mm})^2$. Um eine Einebnung der $6,35 \text{ mm}$ dicken EUV-Maske zu erzielen, werden Haltekräfte von $15 \text{ kPa} \pm 10 \%$ und eine hohe Biegesteifigkeit ($> 30 \text{ kNm}$) gefordert.



Abb. 2: Elektrostatischer Wafer-Chuck mit Pins (12 Zoll).

Fig. 2: 12-inch electrostatic pin chuck.

For lithography, precision and stability of all tools and processes is of the utmost importance. Dimensional variation according to temperature is difficult to control and materials with low thermal expansion (LTEM) are needed. At IOF, processes have been developed for manufacturing ESC out of "zero-expansion" glass and glass-ceramics, using optical machining and adhesive bonding technologies. "Zero-expansion" refers to a coefficient of thermal expansion of $< 2 \cdot 10^{-8} \text{ K}^{-1}$ at room temperature, which is about two orders of magnitude smaller than that of common materials.

Si-Wafer chuck

For applications in e-beam lithography as well as future EUVL, large electrostatic wafer chucks are required. Figure 2 shows a 12-inch wafer chuck as developed at IOF and manufactured from "zero-expansion" glass and glass-ceramics. A light-weight design was realized by applying bore holes to the chuck body and thus reducing mass by nearly 50 %. There are three large holes visible at about half the wafer radius. These are apertures for a lifting mechanism to transfer the wafer to a handling unit.

More important – but not visible from the figure – is the extreme flatness of the area that supports the wafer. In fact, flatness is better than $1 \mu\text{m}$ across the whole area and more than an order of magnitude better on any local field of $20 \text{ mm} \times 20 \text{ mm}$. A glance at Fig. 2 shows, that there is a fine patterning of the chuck surface, due to the wafer supporting area being made of a large number of small pins. This is beneficial for the de-chucking process and drastically reduces the risk of flatness distortions from particle contamination at the chuck to wafer interface.

In our experience, particle contamination is always an issue under production conditions and can have severe consequences, out-of-plane distortions (OPD) directly translating into in-plane-distortions (IPD) during the lithography process and affecting overlay accuracy.

Sensitivity to particle distortions has been calculated on the basis of simple plate bending theory [3] and is shown in Fig. 3. For a Silicon wafer thickness of $775 \mu\text{m}$, a particle of effective (compressed) height $0.5 \mu\text{m}$ produces height distortions with a radial extent of about 10 mm . The height gradient locally induces an IPD (pattern distortion) of about 30 nm at reasonable chucking pressures. This is intolerable for structures of 65 nm or less. Although the analytic approach is a simplification and can be improved upon by Finite Element Modelling (FEM), these results illustrate the particle sensitivity and the tight constraints regarding flatness for future generations of lithography.

EUV-Mask Chuck

In up-coming EUVL, circuit patterns from a square mask will be projected onto the wafer using reflective mirrors made from Mo-Si multilayer coatings. Only LTEM materials are acceptable for the mask and optics substrates. For the clamping of the EUV-mask, the reverse side of the mask has to be coated with a metallic film in order that an electrostatic chuck can be used. Basic chuck parameters and admissible materials are specified in a recent standard proposed by SEMATECH [4].

In particular, chuck flatness is absolutely critical since deviations are limited to $< 6 \text{ nm}$ for any square area of $(20 \text{ mm})^2$ and to $< 50 \text{ nm}$ for the whole mask size of $(152 \text{ mm})^2$. To ensure flattening of a standard EUV mask made from 6.35 mm thick LTEM, a chuck with bending stiffness $> 30 \text{ kNm}$ and a clamping pressure of $15 \text{ kPa} \pm 10 \%$ is demanded.

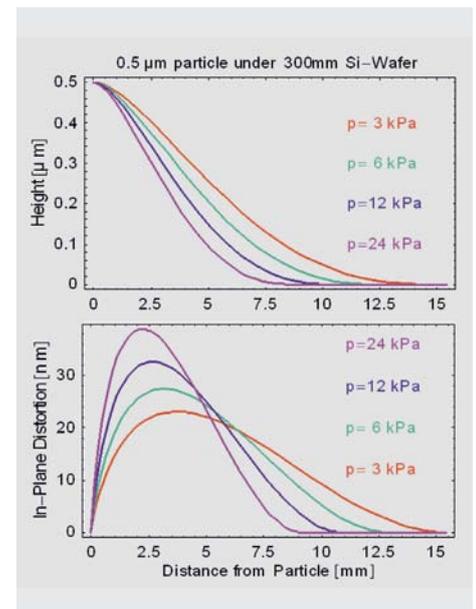


Abb. 3: Verzerrungen In-der-Ebene (IPD) und Aus-der-Ebene (OPD) durch ein $0,5 \mu\text{m}$ Partikel.

Fig. 3: In-plane (IPD) and out-of-plane (OPD) distortions from a $0.5 \mu\text{m}$ particle.

Am IOF wurde damit begonnen, geeignete Fertigungstechnologien für derartige EUV-Masken-Chucks zu sondieren. Abbildung 4 zeigt einen ersten Prototyp aus LTEM /5/. Aus Fertigungsgründen wurden eine runde Chuckform und ein Durchmesser kleiner als die Maskendiagonale gewählt. Hierdurch kann die Maske außerhalb des Chuckbereichs an ihren Ecken gegriffen und zum Transport gehandhabt werden. Es liegen keine Öffnungen im Innern des Chucks vor, um einerseits das Partikelrisiko zu senken und andererseits im Fertigungsprozess sehr hohe Ebenheiten zu erzielen.

Auffällig ist die Chuck-Höhe (ca. 5-fache Masken-Dicke), die sicherstellt, dass der Chuck die Maske einebnet und nicht umgekehrt. Angemerkt sei, dass in die Biegesteifigkeit das E-Modul nur linear eingeht, während die Dicke zur Steifigkeit in dritter Potenz beiträgt. Theoretische Abschätzungen ergeben eine Biegesteifigkeit von knapp 300 kNm, also eine Größenordnung mehr als nach SEMATECH gefordert.

Da die Materialien für den Chuck-Körper und das Dielektrikum transparent sind, kommen die metallischen Chuck-Elektroden in Abb. 4 deutlich zum Vorschein. Es wurden zwei Elektroden in symmetrischer, bipolarer Konfiguration gewählt. Damit kann die Maske geschuckt werden, ohne eine direkte elektrische Verbindung zwischen Maske und Chuck-Elektrode herstellen zu müssen. Dies reduziert das Partikel-Risiko.

Wie Abb. 4 zu entnehmen ist, liegt ein hexagonales Pin-Muster auf der quadratischen Chuck-Fläche vor, die den direkten mechanischen Kontakt von Chuck und Maske auf wenige Prozent der Masken-Rückseite begrenzt.

Die Pin-Höhen bewegen sich im μm -Bereich, während Durchmesser und Abstände im mm-Bereich liegen. Wie beim Wafer-Chuck wird damit das Entchucken erleichtert und das Partikel-Risiko reduziert, ohne Zugeständnisse in der Ebenheit zu machen. Während die elektrostatische Kraft und Steifigkeit dieses EUV-Chucks die strengen SEMATECH Anforderungen bereits erfüllen, ist die geforderte Ebenheit der Pin-strukturierten Fläche fast, aber noch nicht vollständig erreicht /5/. Entsprechende Maßnahmen zur Verbesserung sind eingeleitet.

Zusammenfassung

Am Fraunhofer IOF werden hochgenaue elektrostatische Haltevorrichtungen für Anwendungen in der Elektronenstrahl- und EUV-Lithographie entwickelt. Dies reicht von der Konstruktion und Modellierung bis hin zur Optimierung von Fertigungsprozessen bei externen Partnern. Aus »Null-Ausdehnungs«-Gläsern und Glas-Keramiken wurden Si-Wafer-Chucks mit Durchmessern bis zu 12 Zoll und ein erster Prototyp für einen EUV-Masken-Chuck mit sehr hoher Ebenheit und Steifigkeit gefertigt und charakterisiert. Aktivitäten sind im Gange, um die außerordentlichen Ebenheitsanforderungen der EUV-Lithographie bald voll zu erfüllen.

Danksagung

Wir freuen uns über eine seit langem geführte, anregende Diskussion zu Fragen des Chuckens von Si-Wafern mit Peter Hahmann, Bernd Brendel, Matthias Slodowski, Karl-Heinz Kliem, Ulf Kirschstein und Thomas Händel von Leica Microsystems Lithography GmbH (Jena).

Außerdem danken wir Roxann Engestad und ihren Mitarbeitern an der Universität von Wisconsin (Madison, USA) für wertvolle Debatten und einen regen Meinungsaustausch zum Chucken von EUV-Masken und geeignete FEM-Simulation.

Literatur:

- /1/ International Technology Roadmap for Semiconductors, 2004 update, <http://public.itrs.net>
- /2/ D. R. Wright et al., Manufacturing Issues of Electrostatic Chucks, Journal of Vacuum Science and Technology B 13, no. 4 (1995) 1910–1916
- /3/ Landau, L.; Lifschitz, E.: Theoretische Physik, Vol. 7, Paragraph 12: Elastizitätstheorie, Akademie-Verlag Berlin (1989)
- /4/ SEMI P40-1103 Specification for EUV Mask Substrate Chucking, issue 2003, <http://www.semiatech.org>
- /5/ Kalkowski, G.; Risse, S.; Müller, S.; Harnisch, G.: Electrostatic chuck for EUV masks, Proc. of the 31st Conference on Micro- and Nano-Engineering, 19–22 September 2005, Vienna, Austria (to be published)

At IOF, a technology analysis has started to identify suitable manufacturing processes for EUV mask chucks made from “zero-expansion” materials. Figure 4 shows the first resulting prototype /5/. Chuck shape is circular for ease of precision manufacturing, with a diameter slightly less than the mask diagonal to allow for mask gripping outside of the chuck surface upon loading/de-loading. The chuck surface has no apertures to avoid particle contamination of the inner surface area. Note, that optical manufacturing technologies work well on a circular plate with a closed surface and much higher flatness values can be obtained than with a rectangular shape or with openings/holes in the surface.

Also, chuck height is quite notable (about 5 times mask thickness), to ensure mask flattening by the chuck and not vice versa. Chuck bending stiffness is highly dependent on height, since it scales essentially linearly with the elastic modulus but to the power of three with height. In fact, from theoretical estimates we expect a bending stiffness of nearly 300 kNm, i.e. about an order of magnitude larger than required by SEMATECH.

Since the materials used for the chuck dielectric and the chuck body are transparent, the metallic chuck electrodes are visible as rectangular areas in Fig. 4. Two electrodes are used in a symmetric bipolar configuration. This allows for chucking without establishing any direct electrical contact between mask and chuck electrode and minimizes particle generation in the chucking process.

As can be seen from Fig. 4, there is a hexagonal pattern of pins within the quadratic chucking area. Pin height is in the μm -range, and size and distances are chosen in the mm-range so as to reduce direct mechanical contact between mask and chuck to only a

few percent of the mask reverse side without compromising mask flatness. Again, this simplifies de-chucking and significantly reduces the risk of pattern distortions from inevitable particle contamination of the mask reverse side. While force and stiffness objectives have been met, flatness of the pin surface is close to but not fully within the stringent requirements of SEMATECH /5/. Activities are underway to further improve upon flatness and finally meet the EUVL specification.

Summary

At Fraunhofer IOF, high precision electrostatic chucks for use in e-beam and EUV lithography are developed. This comprises chuck design and modeling, as well as optimization of manufacturing technologies with external partners. From “zero-expansion” glass and glass-ceramic materials, Si-Wafer chucks up to 12-inch diameter and an EUV-mask chuck prototype of high flatness and extreme stiffness have been manufactured and characterized. Activities for meeting the stringent EUVL flatness requirements are underway.

Acknowledgement

We greatly appreciate long-standing and stimulating discussions on Si-wafer chucking with Peter Hahmann, Bernd Brendel, Matthias Slodowski, Karl-Heinz Kliem, Ulf Kirschstein and Thomas Händel from Leica Microsystems Lithography GmbH (Jena). Further, we would like to thank Roxann Engelstad and her co-workers from the University of Wisconsin (Madison, USA) for fruitful debates and an intense exchange of ideas on EUV-mask chucking and appropriate FEM modeling.

References:

- /1/ International Technology Roadmap for Semiconductors, 2004 update, <http://public.itrs.net>
- /2/ D. R. Wright et al., Manufacturing Issues of Electrostatic Chucks, *Journal of Vacuum Science and Technology B* 13, no. 4 (1995) 1910–1916
- /3/ Landau, L.; Lifschitz, E.: *Theoretische Physik*, Vol. 7, Paragraph 12: Elastizitätstheorie, Akademie-Verlag Berlin (1989)
- /4/ SEMI P40-1103 Specification for EUV Mask Substrate Chucking, issue 2003, <http://www.semiatech.org>
- /5/ Kalkowski, G.; Risse, S.; Müller, S.; Harnisch, G.: Electrostatic chuck for EUV masks, Proc. of the 31st Conference on Micro- and Nano-Engineering, 19–22 September 2005, Vienna, Austria (to be published)

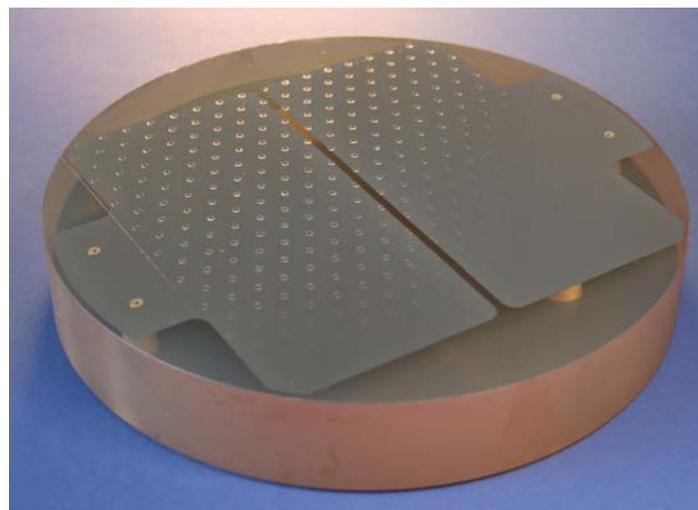


Abb. 4: EUV-Masken-Chuck.

Fig. 4: EUV-mask chuck prototype.

Erzeugung komplexer Mikrooptiken durch Lithographie und UV-Abformung



Peter Dannberg



Uwe Detlef Zeitner



Peter Schreiber



Sylke Kleinle



Wieland Stöckl

Einleitung

In vielen Anwendungsbereichen wächst der Einsatz mikro-optischer Elemente, aktuell z. B. bei LED-Beleuchtung und Strahlformung, Displays oder Datenspeicherung. Vermehrt ergibt sich dabei die Forderung nach Integration mehrerer Elemente zu Subsystemen, d. h. neben der lateralen Anordnung in Arrays zusätzlich eine axiale Stapelung. Ein bereits vielfach angewendetes derartiges Subsystem sind CCD- oder CMOS-Kamerachips integriert mit Farbfilterstrukturen und mit Mikrolinsenarrays zur Verbesserung des Füllfaktors. Der hohe Herstellungs- und Justageaufwand solcher Module lässt sich dabei durch die Fertigung im Wafermaßstab in Grenzen halten. Die Kombination mikro-optischer Technologien zur Verschmelzung mehrerer optischer Funktionen in einem Element mit entsprechend komplexer Oberfläche wurde bereits gezeigt /1/; oftmals sind in der Optik aber Systeme gefordert, bei denen zwischen zwei optischen Funktionsflächen eine Ausbreitungslänge L liegt (Abb. 1), so für mikrooptische Kondensoren oder Teleskope. Im vorliegenden Beitrag sollen Voraussetzungen für eine derartige Systemintegration erläutert und der erreichte technologische Stand unter Verweis auf bereits realisierte Anwendungsbeispiele vorgestellt werden.

Technologiekonzept für gestapelte mikro-optische Module

Kern der hier vorgestellten Integrations-technik ist die schon seit einigen Jahren am IOF betriebene UV-Abformung /2/. Ihr Potenzial liegt einerseits in den moderaten Kosten, andererseits in der hohen Präzision der erzeugten Oberflächen, der hohen Stabilität der verwendeten UV-härtbaren organisch-anorganischen Hybridpolymere /3/, der geringen Belastung für die Substrate und der Kompatibilität mit weiteren technologischen Schritten.

Entscheidend für das Übereinanderstapeln mehrerer Waferebenen sind die hohe laterale Präzision der UV-Abformung sowie die lithographische Herstellung der Masterstrukturen. Folgerichtig wird für die Abformung ein modifizierter Mask-Aligner (SUSS MA6) verwendet. Dessen Rückseitenmikroskope erlauben eine laterale Justage von zwei Waferebenen (Abstand bis 6 mm) auf $\pm 1 \mu\text{m}$ genau. Die axiale Präzision wird durch spezielle Chucks und mechanische Versteifungen erreicht. Die Steuerung der z-Achsenbewegung erlaubt die Kontrolle der abgeformten Polymerschichtdicke und damit die korrekte Fokussierung der Module.

Eine große Vielfalt denkbarer Systeme auf dieser Plattform ergibt sich nun, wenn die verschiedenen abgeformten optischen Oberflächen mit bereits im Substrat vorhandenen Strukturen oder zusätzlichen großflächigen oder lithographisch strukturierten Beschichtungen kombiniert werden (Abb. 2).

Complex micro-optical modules generated by lithography and UV-molding

Introduction

Recently, more and more micro-optical elements have come into operation especially in fields like LED illumination or beam forming, displays, and optical data storage. Furthermore, there is a trend to integrate several of these elements into modules which is equivalent to an axial stacking. Prominent examples of these modules are CCD or CMOS camera chips integrated with colour filters and lens arrays for fill-factor enhancement. The labour-intensive work involved in patterning and alignment can be reduced by parallel fabrication of a large number of systems on a wafer scale. The combination of micro-optics technologies for the generation of "merged" multi-purpose optical elements with correspondingly complex surfaces has been shown recently /1/. However, there is often a demand for systems where 2 optically functional surfaces are separated by a certain propagation distance L (Fig. 1), i. e. for micro-optical telescopes or condensers. In this paper we would like to discuss the requirements for such kinds of integration, present the state of the art at Fraunhofer IOF and present already realized application demonstrators.

Technical concept for stacked micro-optical modules

The basis of our integration approach is a process which has been studied at the IOF for several years; the UV replication of thin polymer films onto arbitrary substrates /2/. Its advantages are: moderate fabrication costs together with high precision of the replicated functional surfaces, high stability of the utilized organic-inorganic hybrid polymers /3/, operability at room temperature and under ambient pressure and its compatibility with

further process steps. A high level of lateral precision and the master generation by lithography are crucial for the stacking of several wafer levels so the UV-molding is carried out in a modified mask-aligner (SUSS MA6). The back side microscopes of the MA6 allow for the precise lateral alignment ($\pm 1 \mu\text{m}$) of two wafer planes with an axial distance of up to 6 mm. Special chucks and mechanical reinforcement assure high

axial accuracy. The replicated polymer thickness can be controlled by the z-axis of the machine, which in turn allows the focussing of the modules .

A large variety of modules can be generated by combining different functional optical surfaces as well as large-area or lithographically patterned coatings on the substrate (see Fig. 2).

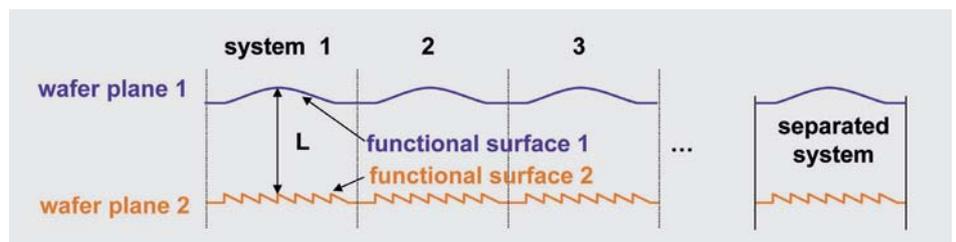


Abb. 1: Allgemeines Schema mikro-optischer Module im Waferverbund, jeweils bestehend aus zwei komplexen Funktionsflächen, getrennt durch eine Ausbreitungslänge L .

Fig. 1: General scheme of micro-optical modules on a wafer scale; each system consisting of two complex functional surfaces separated by a propagation length L .

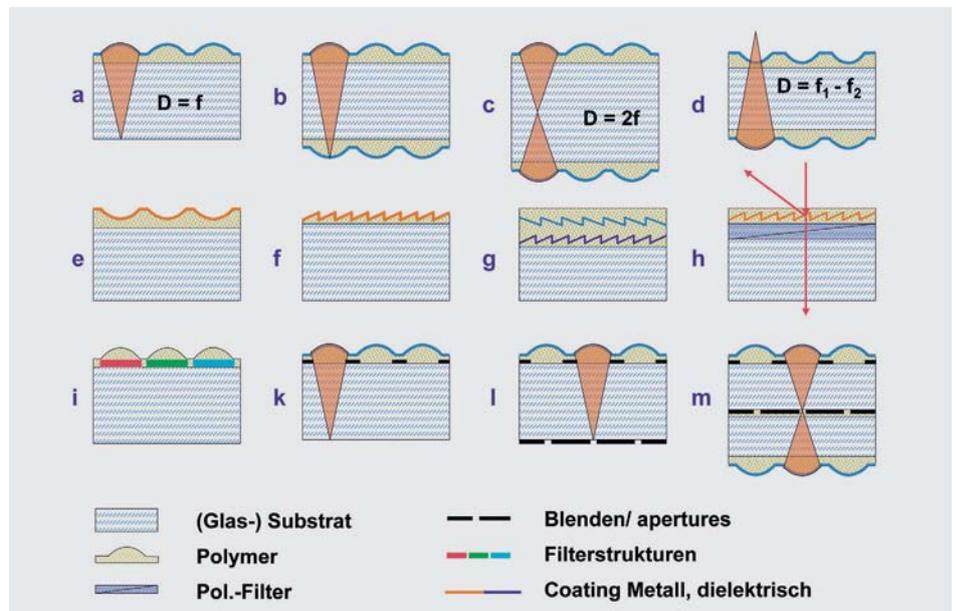


Abb. 2: Beispiele für realisierte mikro-optische Module (schematisch).

Fig. 2: Examples of realized micro-optical modules.

Abformung auf Optoelektronikwafer

Die direkte Erzeugung mikro-optischer Elemente z. B. auf CMOS-Wafern mit Topologie wurde realisiert (Abb. 3). Durch selektive Belichtung konnten polymerfreie Bereiche für elektrische Kontaktierung etc. erzeugt werden. Die Polymerhaftung auf üblichen Passivierungsschichten (SiO_2 , Si_3N_4) ist durch Silanisierung erreichbar.

Beidseitige UV-Abformung

Beidseitige UV-Abformung auf Glaswafer geschieht derzeit nacheinander; im 2. Schritt wird lateral justiert. Keilfehlerausgleich und z-Achse können so gesteuert werden, dass der vorgesehene Scheitelabstand der Elemente auf Vorder- und Rückseite auch bei schwankenden Substratdicken eingehalten wird. Zur Beurteilung der erreichbaren Präzision wurde an verschiedenen Positionen auf einem 4" Wafer mit Zylinderlinsenteleskopen (Abb. 2c) der Defokus durch eine Wellenfrontmessung bestimmt (Abb. 4).

In den hierbei gemessenen sehr geringen Fehlern von $\sim 0,1\lambda$ rms (entspricht einem Defokus von $20\ \mu\text{m}$) sind neben Durchbiegung und Dickenschwankungen außerdem die Radienschwankungen enthalten. Die realisierten Module (Abb. 2b–d, m) werden in LED-Beleuchtungssystemen /4/ bzw. zur Faserkopplung von Hochleistungs-Laserdiodenbarren /5/ eingesetzt.

Dielektrische Beschichtung

Abgeformte Polymeroberflächen können mit einer speziellen APS Bedampfungstechnologie und angepasstem Schichtdesign mit großflächigen dielektrischen Schichtsystemen versehen werden /6/. Für komplexe Module ist eine Entspiegelung der

Oberflächen oft unerlässlich. Daneben wurden auch aufwändige Filtersysteme erfolgreich realisiert. Es wurde gezeigt, dass Stapel aus Polymerabformungen und dielektrischen Beschichtungen im Wechsel aufgebaut werden können (Abb. 2g).

Metallbeschichtung

Zur Erzeugung reflektiver Systeme wurden gesputterte Metallschichten auf refraktive und diffraktive mikro-optische Elemente aufgebracht. Optimierte Gold-Reflektoren für Diodenlasermodule /5/ zeigten geringe Oberflächenrauheit, gute Stabilität und hohe Reflektivität (98 % bei $\lambda = 940\ \text{nm}$). Wenige 10 nm dünne Goldschichten wurden auf diffraktive Elemente gesputtert und mit Polymermaterial eingeebnet, um die diffraktive Wirkung (z. B. Strahlteiler) nur im reflektierten Anteil, nicht aber in Transmission zu erhalten (Abb. 2h). Darüber hinaus wurden Metallschichten (Cr, Ti) durch Lithographie und nasschemisches Ätzen strukturiert, um Reflektorstrukturen, Blenden oder Pinholes zu erzeugen.

Schwarze Blendenstrukturen

Das Einfügen absorbierender Schichten in komplexere Systeme zur Unterdrückung von Streulicht und Reflexen ist bei mikro-optischen Arrays oft entscheidend. Fotostrukturierbares Black Matrix Polymer (PSK 2000, Brewer Science) wurde zur Erzeugung von Blendenstrukturen, Pinholes, Beleuchtungsspalten usw. auf Glas und Siliziumwafern verwendet und anschließend mit UV-abgeformten refraktiven sowie diffraktiven Mikrolinsen überschichtet.

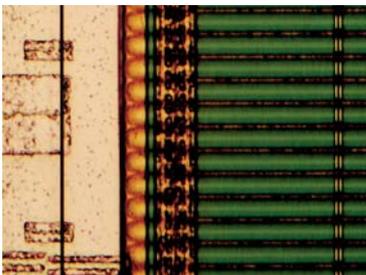


Abb. 3: Zylinderlinsenarrays zur Füllfaktor-erhöhung von CMOS-Sensoren (grün) mit polymerfreien Bond-Bereichen (links).

Fig. 3: Cylindrical lens arrays for fill factor improvement of CMOS sensors (green) and polymer-free areas for bonding (left hand).

Replication onto opto-electronic wafers

The direct replication of microlens arrays on top of e.g. CMOS detectors exhibiting a surface topology has been realized (Fig. 3). Polymer-clad areas were restricted to the detector regions by selective UV-curing and subsequent treatment with solvent. Adhesion to standard planarization layers (SiO_2 , Si_3N_4) was realized by silanization.

Double sided UV molding

Double sided UV molding onto glass wafers was realized in a two step process where the second replication is laterally and axially aligned to the first one. Wedge error compensation and z axis can be controlled in a way that the designed distance between front and reverse side elements can be realized even in the case of non-uniform substrate thickness. A 4" glass substrate with microlens telescopes was fabricated and the wavefront deviation (defocus) at different positions was measured in order to evaluate the axial alignment uniformity across the wafer (Fig. 4). Note that the very low wavefront errors of about 0.1λ rms (equivalent to a defocus of $\sim 20 \mu\text{m}$) also include the non-uniformity of the lens radii. The major applications of the microlens condensers and telescopes (Fig. 2b–d, m) are LED illumination /4/ and fiber coupling of high-power laser diode bars /5/.

Dielectric coating

Dielectric coating of replicated polymer surfaces was carried out using a special APS coating technology including a thin film design adapted to polymer substrates /6/. One application (which is crucial for complex systems) is the anti-reflective coating of every functional

surface. In addition, we realized more complex filter characteristics: it was shown that stacks of polymer structures and dielectric coatings (appearing alternately) are achievable (Fig. 2g).

Metal coatings

Metal coatings were realized by HF-sputtering onto diffractive and refractive polymer elements in order to generate reflective micro-optical systems. Optimized gold reflectors for use in laser diode modules /5/ showed low surface roughness, good stability and a high reflectivity of 98 % at a wavelength of 940 nm.

A few ten nanometer thick gold layers were sputtered onto diffractive elements and subsequently smoothed with polymer in order to achieve diffraction (i.e. beam splitting) in reflection but not in transmission (Fig. 2h). In addition, sputtered metal films (Cr, Ti) were patterned by lithography and wet etching in order to generate reflectors, apertures or pinholes.

Black aperture structures

The introduction of black, absorbing layers for stray light and flare reduction is often crucial for the performance of micro-optical arrays. Photo-patternable black matrix polymer (PSK2000, Brewer Science) was used for structuring apertures, pinholes, illumination slits etc. onto glass or silicon substrates and was subsequently covered by replicated polymer films with refractive as well as diffractive microlenses.

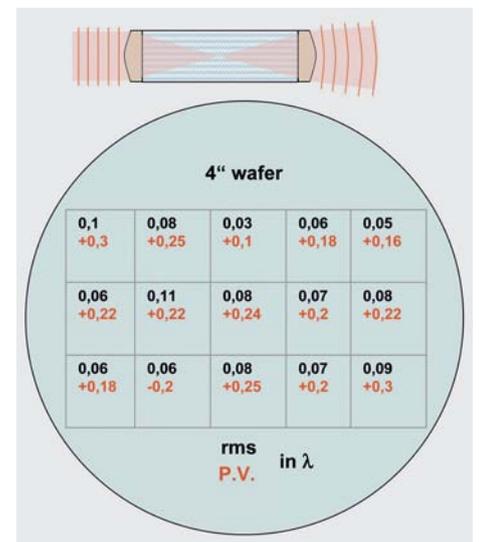


Abb. 4: Positionsabhängiger Wellenfrontfehler von Zylinderlinsenteleskopen auf 4" Wafer. Die geringen Defokus-Werte zeigen die gute axiale Justage im Wafer-Maßstab sowie eine geringe Brennweitenschwankung der lithographisch erzeugten Mikrolinsenmaster.

Fig. 4: Wavefront error (defocus) of cylindrical lens telescopes in dependence on the position on a 4" glass wafer. Low numbers indicate precise axial alignment on wafer scale as well as a low focal length variation of the lithographically fabricated master structures.

Strukturierte Farbfilter

Strukturierte Farbfilter spielen bei Kamera- und Sensoranwendungen eine Rolle. So gibt es verschiedene Konzepte, die am IOF entwickelten ultra-dünnen Kameraobjektive mittels Filterstrukturen farbtauglich zu machen. Entsprechende polymerbasierte Filtermaterialien (PSC/ Brewer Science) wurden nacheinander auf einem Glaswafer aufgebracht und fotostrukturiert (Abb. 5). Anschließend können durch Kombination mit Mikrolinsenarrays z. B. einzelne farbkodierte Kanäle erzeugt werden.

Polarisatoren

Linearpolarisatoren in einem interferometrischen Positionssensor wurden durch Abformung auf spezielle Glaswafer mit auflaminierten großflächigen Polarisationsfiltern (Codixx) integriert.



Abb. 5: Lithographisch strukturierte absorptive Farbfilterstrukturen auf Glaswafer.

Fig. 5: Photo-patterned absorptive RGB color filters on a glass wafer.

Stapeln von Wafern

Für das Erzeugen von mehr als zwei brechenden Polymer-Luft-Grenzflächen ist im Allgemeinen das Stapeln mehrerer Wafer erforderlich. In einer Anwendung zur LED-Linienfokusbeleuchtung wurden hierfür nach Strukturierung mit Blenden und Abformung von refraktiven Zylinderlinsenarrays zwei entsprechende Wafer im Maskaligner zueinander justiert und großflächig verklebt.

Da sich lithographische Strukturierung nur durch die parallele Erzeugung vieler Chips auf einem Wafer mit vertretbarem Aufwand realisieren lässt, werden besonders bei umfangreichen Prozessen die Verwendung immer größerer Waferdurchmesser sowie die Minimierung des Platzbedarfes auf dem Chip wesentlich. Optische Systeme lassen sich prinzipbedingt allerdings nur begrenzt verkleinern; sodass eine wirtschaftliche Herstellung bei großflächigen Modulen schwierig ist. In der derzeitigen Entwicklungsphase konnte gezeigt werden, dass sich einseitig und doppelseitig strukturierte Wafer sowie Waferstapel bis $d = 4,3$ mm mit Standard-Wafersägen in guter Qualität vereinzeln lassen. Module für einen Abstandssensor (wie Abb. 21) nach der Vereinzlung zeigt Abb. 6.

Zusammenfassung

Lithographische Strukturierung und UV-Abformung dünner Polymerfilme auf beliebige Substrate können als Plattform zur Integration mehrerer optischer Funktionen sowie der Erzeugung mikrooptischer Module im Wafermaßstab verwendet werden. In vorausgehenden Arbeiten wurden dazu Lithographie und Abformung qualifiziert (Präzision, Parameterbereich, Gleichmäßigkeit). Zusätzlich wurden lithographisch erzeugte Blenden- und Farbfilterstrukturen sowie großflächige Beschichtungen einbezogen. Darauf aufbauend konnten vielfältige Integrationsmöglichkeiten erarbeitet und anhand von Anwendungsbeispielen demonstriert werden. Entscheidend für die Realisierbarkeit des Ablaufes (Abb. 7) war die Kompatibilität der UV-Abformung mit den Beschichtungs- und Lithographieprozessen sowie der Vereinzlung.

Literatur:

- /1/ Zeitner, U. D.; Dannberg, P.: "Double-sided hybrid microoptical elements combining functions of multistage optical systems", SPIE Proceedings 4440 (2001), pp. 44–50.
- /2/ Dannberg, P.; Mann, G.; Wagner, L.; Bräuer, A.: "Polymer UV-molding for microoptical systems and opto-electronic integration", SPIE Proceedings 4179 (2000) 137–145.
- /3/ Houbertz, R.; Domann, G.; Cronauer, C.; Schmitt, A.; Martin, H.; Park, J.-U.; Fröhlich, L.; Buestrich, R.; Popall, M.; Streppel, U.; Dannberg, P.; Wächter, C.; Bräuer, A.: "Inorganic-Organic Hybrid Materials for Application in Optical Devices", Thin Solid Films, 442, pp. 194–200, 2003.
- /4/ Schreiber, P.; Kudaev, S.: "Mikrooptik für LED-Lichtquellen", Photonik 3 (2005), 80–82.
- /5/ Schreiber, P.; Höfer, B.; Dannberg, P.: »Mikrooptik für Faserkopplung von Hochleistungs-Diodenlasern«, Photonik 35 (2003) 6 S. 50.
- /6/ Schulz, U.; Schallenberg, U. B.; Kaiser, N.: "Antireflective coating design for plastic optics", Appl. Opt. 42 (2003) 1346–1351.

Color filter structures

RGB filters are used in camera and sensor applications. There are also several concepts to introduce color vision to the ultra-flat image sensors currently investigated at IOF. Corresponding polymer based filter materials (PSC/ Brewer Science) were subsequently coated and patterned on glass or silicon wafers (Fig. 5). The combination with microlenses allows e.g. for the generation of color coded channels.

Polarizer

Linear polarizers in an interferometric position sensor were integrated by replication of the optical elements on top of special glass wafers with large-area laminated Codixx polarizers (Fig. 2h).

Wafer stacking

The Stacking of wafers is mandatory when more than two air-polymer interfaces are needed. In an application of such stacks for a LED line focus generator, apertures were first generated, cylindrical lens arrays then replicated and finally two 4" glass wafers were aligned to each other and mounted together in the MA6 mask aligner.

For complex systems in particular the costs of a large number of lithographic fabrication steps can be kept to a moderate level only by use of larger and larger wafers and by reduction of the chip area. But in the case of optical systems a size reduction is difficult as a matter of principle so the cost effective fabrication of large area modules becomes critical. In the current level of development it was shown that single and double side patterned wafers, as well as wafer stacks with a thickness of up to 4.3 mm, could be separated with

good quality using a standard dicing saw (Disco). Figure 6 shows modules for a distance sensor (corresponding to Fig. 2l) after dicing.

Summary

Lithographic patterning in combination with UV-molding of thin polymer films onto arbitrary substrates can act as a basis for the integration of several optical functions and the generation of micro-optical modules on a wafer scale. The assessment of lithography and replication (precision, uniformity, parameter range) for this purpose was done in previous projects. In addition to double sided replication we introduced lithographically generated aperture and color filter structures as well as large area coatings. On the basis of this technology a number of integration schemes have been carried out and several applications have been realized. The compatibility of the UV molding technology with the coating, lithographic processes and the dicing was crucial for the success of the approach (Fig 7).

References:

- /1/ Zeitner, U. D.; Dannberg, P.: "Double-sided hybrid microoptical elements combining functions of multistage optical systems", SPIE Proceedings 4440 (2001), pp. 44–50.
- /2/ Dannberg, P.; Mann, G.; Wagner, L.; Bräuer, A.: "Polymer UV-molding for micro-optical systems and opto-electronic integration", SPIE Proceedings 4179 (2000) 137–145.
- /3/ Houbertz, R.; Domann, G.; Cronauer, C.; Schmitt, A.; Martin, H.; Park, J.-U.; Fröhlich, L.; Buestrich, R.; Popall, M.; Streppel, U.; Dannberg, P.; Wächter, C.; Bräuer, A.: "Inorganic-Organic Hybrid Materials for Application in Optical Devices", Thin Solid Films, 442, pp. 194–200, 2003.
- /4/ Schreiber, P.; Kudaev, S.: "Mikrooptik für LED-Lichtquellen", Photonik 3 (2005), 80–82.
- /5/ Schreiber, P.; Höfer, B.; Dannberg, P.; »Mikrooptik für Faserkopplung von Hochleistungs-Diodenlasern«, Photonik 35 (2003) 6 S. 50.
- /6/ Schulz, U.; Schallenberg, U. B.; Kaiser, N.: "Antireflective coating design for plastic optics", Appl. Opt. 42 (2003) 1346–1351.



Abb. 6: Sensorchips mit entspiegelten refraktiven Mikrolinsenarrays, Blenden und Pinholestrukturen nach der Vereinzelung.

Fig. 6: Sensor chips including anti-reflection coated microlens arrays, black apertures and pinholes after dicing.

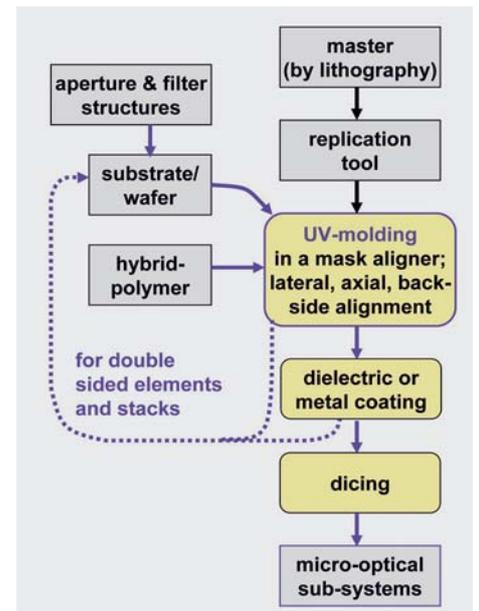


Abb. 7: Schema des technologischen Ablaufes. Master und Abformwerkzeug müssen dabei nur ein Mal erzeugt werden.

Fig. 7: Scheme of the technological cycle. Master and embossing tools have to be generated only once.

Herstellung gechrpter Mikrolinsenarrays durch Reflow von Fotoresist



Frank Wippermann



Jacques Duparré



Peter Dannberg



Peter Schreiber



Andreas Bräuer

Herkömmliche Arrays bestehen aus einer sich wiederholenden Anordnung einer Einheitszelle auf einem festen Raster. Dies ist für einige Anwendungen nachteilig, da die Linsen nicht einzeln für ihre spezielle Aufgabe optimiert werden können, sondern eine Kompromisslösung darstellen. Gechrpte Arrays lösen die starre Anordnung einheitlicher Linsen auf. Die Arrays bestehen aus individuell angepassten Zellen, die mittels parametrischer Beschreibung definiert sind. Die Zahl erforderlicher Parameter hängt hierbei von der konkreten Geometrie der Linsen ab. Die Zelldefinition kann durch analytische Funktionen beschrieben oder durch numerische Optimierungsverfahren gewonnen werden. Allen gechrpten Arrays ist hierbei die Abhängigkeit der Funktionen von der Position der jeweiligen Zelle im Array gemein.

Zur Herstellung von Mikrolinsenarrays eignet sich im Besonderen das Schmelzen von Fotoresist, mit dem besonders glatte und gut definierte Oberflächen hergestellt werden können /1/. Hierbei werden die nach der Entwicklung des durch eine Maske bestrahlten Resists entstandenen Zylinder aufgeschmolzen, was durch das Wirken von Oberflächenspannungen zur gewünschten Linsenform führt (Abb. 1).

Um gechrpte Arrays herzustellen, muss auch die Maske aus individuell geformten Zellen bestehen. Da kommerziell verfügbare Software lediglich für die Herstellung regulärer Arrays ausgelegt ist, waren neue Software-Tools zu erarbeiten. Sinnvolle Randgeometrien der Linsen für den Reflowprozess sind Rechtecke (Zylinderlinsen), Kreise (sphärische Linsen) und Ellipsen (anamorphotische Linsen).

Letztere ermöglichen eine effektive kanalweise Korrektur von Astigmatismus und Bildfeldwölbung, sofern die einzelnen Linsen des Arrays für unterschiedliche Feldwinkelbereiche genutzt werden, wie dies z. B. bei der Insektenaugenkamera (ultra-dünne Kamera) der Fall ist /2/, /3/. Zur Beschreibung des Arrays elliptischer Linsen sind fünf Funktionen erforderlich, die analytisch abgeleitet werden können (Abb. 2). Das optische Design führte zu einer Belichtungsmaske mit etwa 20 000 individuell geformten, positionierten und gedrehten Ellipsen.

Die Abbildungen 3 und 4 zeigen die gute Übereinstimmung der gemessenen Werte der Krümmungsradien der elliptischen Linsen mit den Designwerten und die beugungsbegrenzte Abbildungsqualität. Gechrpte Arrays ermöglichen damit neue Designfreiheiten für die Gestaltung von Mikrolinsenarrays, die für Aberrationskorrektur und verbesserte Integration genutzt werden können.

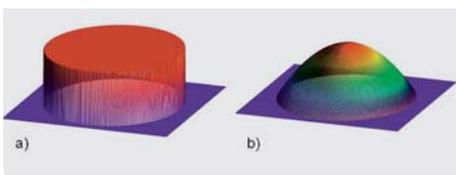


Abb. 1:
a: Resist-Zylinder mit elliptischer Basis.
b: Computer simulierte Oberfläche des elliptischen Zylinders nach Schmelzprozess.

Fig. 1:
a: Resist cylinder with elliptical rim.
b: Computer simulated surface by iterative melting of a resist cylinder with elliptical rim.

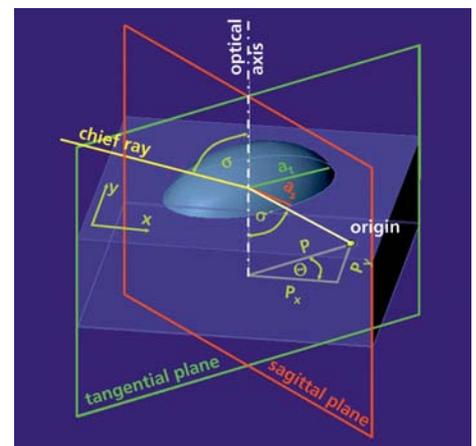


Abb. 2:
Geometrie elliptischer Linsen; Parameter: Halbachsen der Ellipse (Tangential- und Sagittalebene), Koordinaten des Scheitelpunktes (P_x und P_y) und Drehwinkel Θ .

Fig. 2:
Geometry of the ellipsoidal lens; parameters: axes of the ellipse (tangential and sagittal plane), coordinates of the vertex position (P_x and P_y) and orientation angle Θ .

Chirped arrays of micro-lenses by reflow of photoresist

Conventional arrays consist of a repetitive arrangement of a unit cell on a fixed, equidistantly sectioned grid. This is disadvantageous for many applications because the cells cannot be individually optimized for their specific optical function but instead the design is a compromise which enables a sufficient, overall performance. In a chirped array, the inflexibility of a regular arrangement has been overcome. Here, the array consists of individually shaped lenses which are defined by a parametric description of the cells optical function. The number of parameters needed depends on the geometry to be described. The parameters each cell possesses can be defined by analytical functions or by using numerical optimization techniques. Dependency on the position of the cell within the array is a characteristic of these functions.

Reflow of photoresist, which leads to very smooth and well defined surfaces, is a fabrication technology for the creation of micro-lenses with superior optical performance [1]. In this process, a layer of photoresist is patterned by exposure through a photolithographic mask. After the development process this leads to resist cylinders, which are subsequently melted. The surface of the lenses is formed by surface tension effects (Fig. 1).

For creating a chirped micro-lens array, the mask determining the bases of the lenses consists of individually shaped cells. Since commercially available software can only deal with regular arrays (repeating structures) new software tools were developed by us. Stringent limitations to viable rim geometries and therefore to the 3D-surfaces apply which make rectangles (cylindrical lenses), circles (spherical lenses) and ellipsoids (anamorphic lenses) the most useful forms.

The latter enables an efficient, channel-wise compensation of off-axis aberrations like astigmatism and field curvature when the single cells of the array are working under different angles of incidence e.g. in the artificial apposition compound eye objective (ultra-thin camera) [2, 3]. For the definition of the chirped array of ellipsoidal lenses, five describing functions are needed (Fig. 2), which can be derived completely analytically. The optical design data has to be translated into a photolithographic mask which consists of about 20 000 individually shaped, translated and rotated ellipses.

The parameters of the lenses of the fabricated chirped array match the design data extremely accurately (Fig. 3) and show diffraction limited performance for each single channel (Fig. 4). Chirped micro-lens arrays open up novel design possibilities which enable aberration compensation and improved integration.

References:

- /1/ Daly, D. et al: "The manufacture of micro-lenses by melting of photoresist", J. Meas. Sci. Technol. 1, pp. 759–766, (1990)
- /2/ Wippermann, F.; Duparré, J.; Schreiber, P.; Dannberg, P.: "Design and fabrication of a chirped array of refractive ellipsoidal micro-lenses for an apposition eye camera objective", Proc. of Optical Design and Engineering II, L. Mazuray and R. Wartmann, eds., SPIE 5962, (2005).
- /3/ Duparré, J.; Frank Wippermann, F.; Dannberg, P.; Reimann, A.: "Chirped arrays of refractive ellipsoidal microlenses for aberration correction under oblique incidence", Optics Express 13 (2005) 26 p. 10539–10551, ISSN 1094-4087.

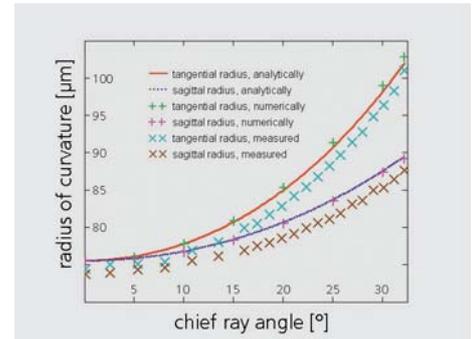


Abb. 3: Berechnete und gemessene Krümmungsradien (tangential und sagittal) eines durch Reflow hergestellten gechirpten Arrays elliptischer Linsen zur Kompensation von off-axis Aberration eines künstlichen Facettenaugenobjektivs (ultra-dünne Kamera).

Fig. 3: Calculated and measured tangential and sagittal radii of curvature of a chirped array of ellipsoidal micro-lenses used for off-axis aberration compensation of the artificial apposition compound eye objective (ultra-thin camera).

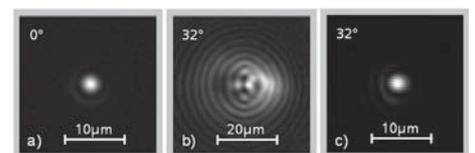


Abb. 4: Gemessene Intensitätsverteilungen im Fokus von durch Reflow hergestellten Mikrolinsen.
a: sphärische Linse unter senkrechtem Einfall mit beugungsbegrenzter Abbildungsqualität.
b: sphärische Linse unter schrägem Einfall (32°).
c: elliptische Linse unter schrägem Einfall (32°) mit beugungsbegrenzter Abbildungsqualität.

Fig. 4: Measured intensity distributions in the focal plane of micro-lenses fabricated by reflow.
a: spherical lens under perpendicular incidence with diffraction limited performance.
b: spherical lens under oblique incidence (32°).
c: ellipsoidal lens under oblique incidence (32°) with diffraction limited performance.

Verbesserung der Auflösungshomogenität ultra-dünner Bilderfassungssysteme basierend auf künstlichen Facettenaugen



Jacques Duparré



Frank Wippermann



Peter Dannberg



Andreas Bräuer

Einleitung

Eine Verbesserung der Auflösungshomogenität ultra-dünner abbildender Systeme basierend auf künstlichen Facettenaugen wird durch die Verwendung eines gechirpten Arrays refraktiver elliptischer Mikrolinsen erzielt. Solch ein Array besteht aus 130×130 individuell geformten und ausgerichteten anamorphotischen Linsen, so dass Abbildungsfehler unter schrägem Lichteinfall wie Astigmatismus und Bildfeldwölbung kanalweise korrigiert werden können. Die Messungen der optischen Leistungsfähigkeit erster Prototypen zeigen eine signifikante Verbesserung der Winkelauflösungshomogenität über das gesamte Gesichtsfeld von $64,3^\circ$.

Der Unterschied von natürlichen und künstlichen Bilderfassungssystemen

Die Verwendung von künstlichen Facettenaugenobjektiven für bilderzeugende Anwendungen mit geringen räumlichen Auflösungsanforderungen führt zu sehr kurzen Bilderfassungssystemen mit Dicken unterhalb $250 \mu\text{m}$ / 1λ . Natürliche Vorbilder sind die Facettenaugen von Insekten, wie z. B. der Hausfliege. Diese Augen bestehen aus vielen auf einer gekrümmten Basis angeordneten Mikrolinsen, die jeweils mit einem Photorezeptor verbunden sind (Abb. 1a). Aufgrund der Krümmung besitzen die Facettenaugen ein sehr großes Gesichtsfeld, wobei jeder optische Kanal (»Ommatidium«) auf seinen Rezeptor fokussiert, wenn der entsprechende Objektpunkt auf der optischen Achse des Kanals liegt. Da jeder Kanal unter normalem Lichteinfall benutzt wird, treten keine Abbildungsfehler achsenferner Strahlen wie Astigmatismus, Bildfeldwölbung, Koma oder Verzeichnungen auf, die das Winkelauflösungs-

vermögen für größere Gesichtsfelder verschlechtern würden. Künstliche Facettenaugen sind auf eine planare Bauweise beschränkt, da die heutigen Herstellungstechnologien der Halbleiterindustrie an planare Empfänger-matrizen wie CMOS oder CCD gebunden sind. Deshalb können die optischen Kanäle nicht – wie in der Natur – auch für große Gesichtsfelder stets nur im achsennahen Bereich genutzt werden. Bei der Verwendung von sphärischen Linsen treten automatisch außeraxiale Abbildungsfehler auf. Bei klassischen makroskopischen Objektiven, in denen das Bild über nur einen Kanal übertragen wird, sind für die Minimierung dieser Abbildungsfehler als Kompromiss über das gesamte Gesichtsfeld viele optische Elemente notwendig, was zu sehr komplexen, unhandlichen und teuren optischen Systemen führt.

Korrektur von Astigmatismus und Bildfeldwölbung

Bei Facettenaugenobjektiven ist jede Linse genau einem Winkel des gesamten Gesichtsfeldes zugeordnet. Folglich ist eine individuelle Korrektur der außeraxialen Aberration für jeden Kanal durchführbar. Wegen der kleinen numerischen Apertur der Linsen des Objektivs sind Astigmatismus und Bildfeldwölbung wesentlich dominanter als Koma, welche einen nur geringen Einfluss hat. Deshalb ist durch die Verwendung von unterschiedlichen und unterschiedlich orientierten anamorphotischen Linsen für jeden Kanal eine individuelle, effiziente Fokussierung für jedes schräge Bündel, das übertragen werden soll, möglich. Die Krümmungsradien auf den Achsen einer Linse müssen demnach unterschiedlich sein und ihr Verhältnis wird durch die Kompensation des Astigmatismus für den jeweiligen Einfallswinkel bestimmt.

Improving the resolution-homogeneity of ultra-thin vision systems based on artificial compound eyes

Introduction

Improvements in the resolution homogeneity of an ultra-thin artificial apposition compound eye objective are accomplished by the use of a chirped array of refractive ellipsoidal microlenses. The array contains 130 x 130 individually shaped ellipsoidal lenses for channel-wise correction of astigmatism and field curvature occurring under oblique incidence. Measurements of the optical performance show a significant improvement of angular resolution homogeneity over the entire 64.3° field of view, in comparison to the first prototypes.

The difference of natural and artificial imaging systems

Using artificial apposition compound eye objectives for imaging applications with a low spatial resolution requirement leads to extremely short vision systems with a thickness of less than 250 μm [1]. Natural antetypes are the compound eyes of many insects such as the house fly. They consist of arrays of microlenses on a curved base and each microlens is associated with a small group of photo receptors (Fig. 1a). Due to this curvature compound eyes possess a very large field of view (FOV) but each optical channel (also known as "ommatidium") focuses light only onto a photoreceptor if it is coming from object points lying on the channels' optical axes. Since each channel is used under normal incidence no off-axis aberrations such as astigmatism, field curvature, coma or distortion occur which would decrease the angular resolution with increasing FOV.

Artificial apposition compound eye objectives are limited to planar substrates since today's micro-electronics fabrication technology is bonded to planar artificial receptor arrays such as CMOS or CCD sensors (Fig. 1b). Consequently the optical channels cannot be arranged as on-axis configurations inherently connected with the appearance of off-axis aberrations when using spherical lenses. In classical macroscopic optical systems, where one optical channel transfers the overall FOV, many optical elements have to be used in order to minimize off-axis aberrations leading to very complex, bulky and expensive optical systems.

Correction of astigmatism and field curvature

In contrast, for the apposition compound eye objective each lenslet is assigned only to one angle of the overall FOV. Consequently an individual correction of the channels for aberrations is feasible. Due to the small numerical aperture of the lenslets of the objective, astigmatism and field curvature are far more dominant than coma, which is of minor influence. Therefore efficient channel-wise focussing of the oblique angle to be transferred is possible by using different and differently oriented anamorphic lenses for each channel (Fig. 2). The radii of curvature of the lenses in perpendicular directions have to be different and selected to compensate for astigmatism due to the oblique incidence.

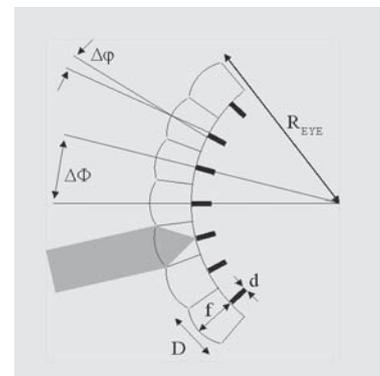


Abb. 1a: Schematische Ansicht eines natürlichen Facettenauges.

Fig. 1a: Schematic view of a natural apposition compound eye.

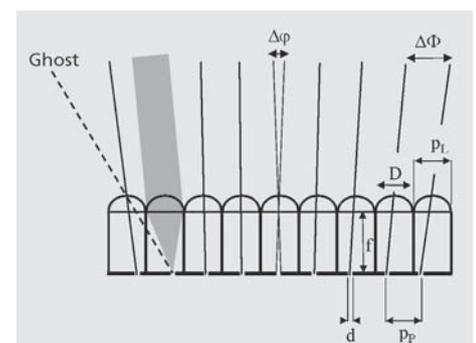


Abb. 1b: Prinzip eines planaren künstlichen Facettenauges.

Fig. 1b: Principle of a planar artificial apposition compound eye.

Des Weiteren werden beide Radien so gewählt, dass die Brennebene aller Zellen, für ihren jeweiligen Einfallswinkel auf die paraxiale Bildebene fixiert ist. Das führt zu einem geebneten, moiré-vergrößerten Bild in der Detektorebene [2].

Ultra-dünne Kameraobjektive aus einer Anordnung variabler elliptischer Mikrolinsen

Für den vorliegenden Prototyp wurden die Parameter der Linsenanordnung an die eines vorhandenen CMOS Bildwandlers mit großem Pixelabstand angepasst. Die Originalstruktur der

individuell an den Kanal angepassten anamorphotischen Linsen wurde durch das Schmelzen von Photolackpodesten mit variablen elliptischen Basen hergestellt.

Die eigentlichen Objektive werden anschließend durch UV-Replikation der Linsenarrays auf der Vorderseite eines dünnen Glassubstrats realisiert. Auf der Rückseite dieses Substrats werden die Lochblenden in einer dünnen Metallschicht erzeugt, die in der Brennebene der Mikrolinsen liegt. Für Vergleichszwecke haben wir zwei Systeme mit der gleichen Anzahl von Kanälen, paraxialer Brennweite und Gesichtsfeld gefertigt. Das erste Objektiv besteht aus

identischen sphärischen Linsen, hierfür wurde ein regelmäßiges Mikrolinsenarray (rMLA) verwendet. Das zweite Objektiv besteht aus einer Anordnung von unterschiedlichen elliptischen Mikrolinsen (cMLA) für die individuelle Korrektur des Astigmatismus und der Bildfeldwölbung jedes Kanals.

Beide Objektive nehmen einen Quadranten des symmetrischen Gesichtsfeldes auf, da die anderen drei Quadranten lediglich Spiegelbilder des betrachteten sind (Abb. 3).

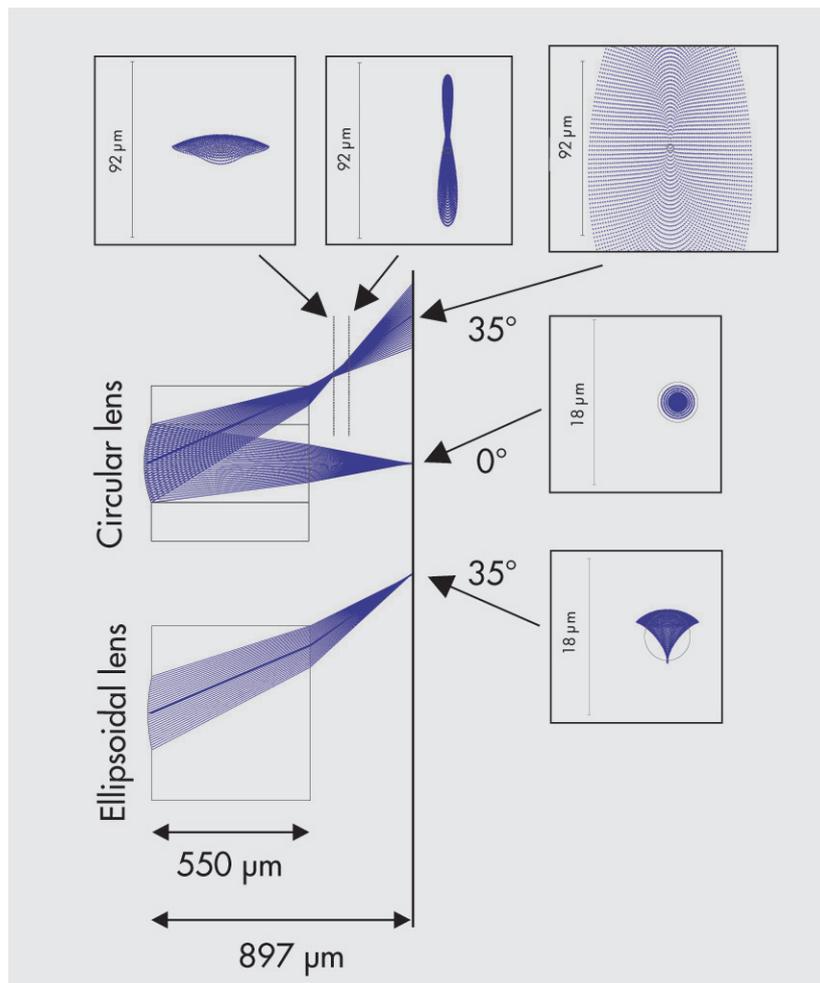


Abb. 2: Kreisförmige und elliptische Linsen unter senkrechtem und schrägem Einfall und dazugehörige Punktbielddiagramme. Eine kreisförmige Linse mit einem Krümmungsradius $R = 339 \mu\text{m}$ und einem Durchmesser $D = 242,8 \mu\text{m}$ aus Quarzglas ($n = 1,46$ bei 550 nm Wellenlänge) unter senkrechtem Einfall produziert einen beugungsbegrenzten Fokus. Unter schrägem Lichteinfall führen jedoch Astigmatismus und besonders Bildfeldwölbung zu einem sehr großen Fleck in der Gauß'schen Bildebene. Die tangentielle und sagittale Bildebene sind von der Gauß'schen Bildebene getrennt (hier $-165 \mu\text{m}$ und $-262 \mu\text{m}$, jeweils) und die Foki sind zu Linien verschmiert. Die Verwendung einer anamorphotischen Linse mit für ihren speziellen Einfallswinkel angepassten tangentialen und sagittalen Krümmungsradien ($R_t = 579 \mu\text{m}$, $R_s = 451 \mu\text{m}$) liefert ein beugungsbegrenztes Punktbielddiagramm.

Fig. 2: Circular lens and ellipsoidal lens under perpendicular and oblique incidence and related spot diagrams. A circular lens with radius of curvature $R = 339 \mu\text{m}$ and diameter $D = 242.8 \mu\text{m}$ in fused silica ($n = 1.46$ at 550 nm wavelength) under perpendicular incidence produces a diffraction limited focus. However, if illuminated under oblique incidence astigmatism and especially field curvature lead to very large spots in the Gaussian image plane. The tangential and sagittal image planes are separated from the Gaussian image plane (here $-165 \mu\text{m}$ and $-262 \mu\text{m}$, respectively) and the foci are blurred to lines. Using an anamorphic lens with adopted tangential and sagittal radii of curvature ($R_t = 579 \mu\text{m}$, $R_s = 451 \mu\text{m}$) for this special angle of incidence, a diffraction limited spot is achieved.

Furthermore they are both chosen in such a way that the focal plane of all cells with their different angles of incidence is fixed at the position of the paraxial image plane. This leads to a planarized moiré-magnified image in the detector surface [2].

Ultra-thin camera objective with chirped array of ellipsoidal micro-lenses

For prototyping we chose the parameters of the lens array in order to meet the specifications of an available large-pitch CMOS imager. The master structures of the channel-adapted anamorphic lenses were originated by reflow of photo-resist on variable ellipsoidal bases.

The actual objectives were subsequently fabricated by UV-embossing of the lens arrays on the front side of a thin glass substrate. On the reverse side of this substrate the pinholes were structured into a metal layer located in the focal plane of the micro-lenses. For reasons of comparison, we built two systems with same number of channels, paraxial focal length and FOV.

The first objective consists of identical spherical lenses therefore using a regular micro-lens array (rMLA). The second one uses a chirped micro-lens array (cMLA) with ellipsoidal lenses for channel-wise correction of astigmatism and field curvature.

Both prototypes capture a quadrant of a symmetrical FOV, since the other three quadrants are simply mirrored images of the considered area (Fig. 3).

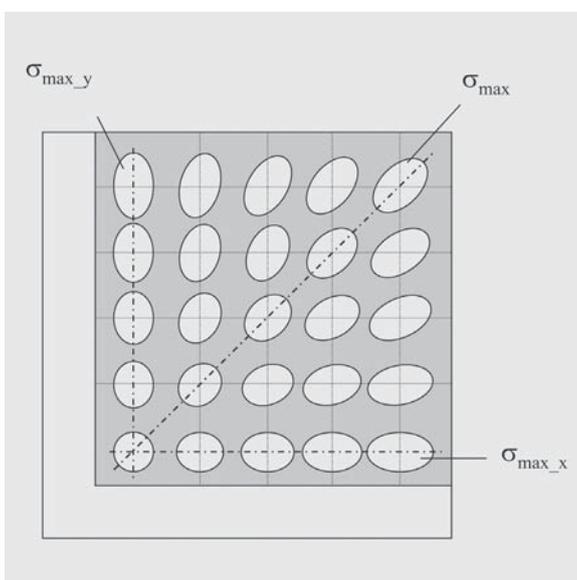


Abb. 3.: Schematische Zeichnung eines Objektivchips, der einen Quadranten des Gesichtsfelds aufnimmt. Der linke und der untere Rand dienen als Haltefläche für das Greifwerkzeug während der Montage mit dem CMOS-Sensor. Der Kanal in der unteren linken Ecke hat eine senkrechte Blickrichtung bezogen auf die Objektivenebene und besitzt daher eine kreisförmige Linse. Mit steigendem Blickwinkel der Kanäle nimmt die Elliptizität der jeweiligen Linsen zu, bis zu einem Winkel von $\sigma_{\max} = 32^\circ$ auf der Diagonale.

Fig. 3: Schematic drawing of an objective chip capturing a quadrant of the full FOV. The left and bottom margins serve as docking areas for the gripping tool during assembly with the CMOS sensor. The channel in the lower left corner has a perpendicular viewing direction with respect to the objective-plane and consequently applies a circular lens. With increasing the viewing angle of the channel up to an angle of $\sigma_{\max} = 32^\circ$ on the diagonal, the ellipticity of the corresponding lens is increased.

Die Objektive wurden im Wafermaßstab hergestellt, anschließend mittels Chipsäge vereinzelt und aktiv auf das Empfängerarray aufgebracht (Abb. 4).

Wir bildeten unterschiedliche Testmuster mit einem Bilderfassungssystem bestehend aus variablen anamorphotischen Mikrolinsen und zum Vergleich mit einem System aus regelmäßigen Mikrolinsen ab. Die aufgenommenen Bilder wurden hinsichtlich der Auflösungshomogenität über das gesamte Gesichtsfeld untersucht.

Abbildung 5 zeigt die Originale kreisförmiger Testmuster unterschiedlicher Perioden (ein Quadrant) und die dazugehörigen Bilder aufgenommen durch die Facettenaugenobjektive, jeweils gechirpte oder regelmäßige Linsenarrangements.

Es ist klar zu erkennen, dass wie erwartet die Auflösung im Zentrum des Gesichtsfeldes (linke untere Ecke) unabhängig von dem verwendeten Objektiv ist. Die Auflösung nimmt jedoch mit steigendem Blickwinkel ab, wenn man die regelmäßigen Mikrolinsen verwendet. Durch die Nutzung der für die jeweilige Blickrichtung individuell optimierten Mikrolinsen erreicht man eine konstante Auflösung über das Gesichtsfeld /3/.

Zusammenfassung

Neben den Vorteilen der auf künstlichen Facettenaugen basierenden Bilderfassungssysteme, die bereits früher präsentiert wurden, wie Kompaktheit, einfache Herstellung und großes Telephotoverhältnis, wurde an dieser Stelle einer ihrer größten Vorteile gezeigt: Aufgrund der getrennten Bildübertragung kann jeder einzelne Kanal für seine individuelle Blickrichtung optimiert werden, während bei klassischen Ein-Kanal-Bilderfassungssystemen für alle Einfallswinkel im Gesichtsfeld ein Kompromiss gefunden werden muss.

Danksagung

Wir bedanken uns für die freundliche Leihgabe des CMOS-Sensors durch Pierre-Francois Rüedi und Pascal Nussbaum vom Centre Swiss d'Electronique et de Microtechnique SA (CSEM), Neuchâtel, Schweiz.

Literatur:

- /1/ Duparré, J.; Dannberg, P.; Schreiber, P.; Bräuer, A.; Tünnermann, A.: "Thin compound eye camera", *Appl. Opt.* 44(15), pp. 2949–2956 (2005).
- /2/ Wippermann, F.; Duparré, J.; Schreiber, P.; Dannberg, P.: "Design and fabrication of a chirped array of refractive ellipsoidal micro-lenses for an apposition eye camera objective", *Proc. of Optical Design and Engineering II*, L. Mazuray and R. Wartmann, eds., SPIE 5962, (2005).
- /3/ Duparré, J.; Wippermann, F.; Dannberg, P.; Reimann, A.: "Chirped arrays of refractive ellipsoidal microlenses for aberration correction under oblique incidence", *Optics Express* 13 (2005) 26 p. 10539–10551, ISSN 1094-4087.

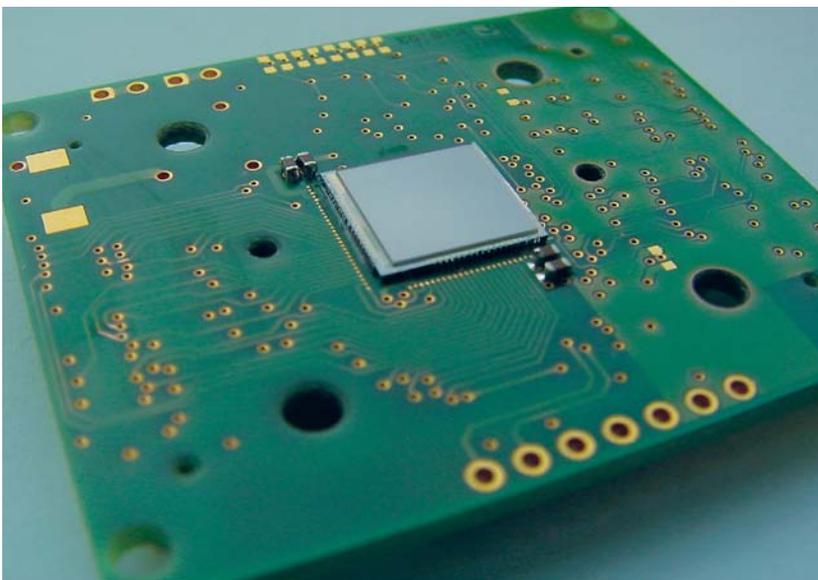


Abb. 4: Künstliches Facettenaugenobjektiv, angebracht auf dem CMOS-Sensor (freundliche Leihgabe des Centre Swiss d'Electronique et de Microtechnique SA (CSEM) Neuchâtel, Schweiz).

Fig. 4: Objective attached to CMOS-sensor (courtesy of Centre Swiss d'Electronique et de Microtechnique SA (CSEM) Neuchâtel, Switzerland).

The wafer-scale fabricated objectives are subsequently diced and actively aligned in front of the detector array (Fig. 4).

For comparison with the regular lens array, we displayed different representative test patterns to a vision system composed of a chirped lens array and investigated the captured images with respect to resolution homogeneity over the FOV.

Figure 5 shows the original circular test targets and the corresponding images taken by compound eye objectives applying chirped or regular lens arrays, respectively. It can be clearly observed that – as to be expected – the resolution at the center of the FOV is independent of whether regular or chirped

lens arrays are used. However, with an increasing viewing angle the resolution is decreased when simply using the regular lens array while the resolution stays constant when applying the chirped lens array where each channel is individually optimized for its viewing direction [3].

Summary

Besides the advantages of artificial compound eye imaging systems which we have previously presented such as compactness, simplicity in manufacturing and large telephoto ratio, we demonstrate one of their other major benefits here: because of the segmented image transfer each channel can be specially optimized for its individual

viewing direction while classical single-channel-imaging-systems always have to be a compromise of all the angles of incidence represented in the FOV.

Acknowledgements

We gratefully acknowledge the provision of the opto-electronic vision sensor by Pierre-Francois Rüedi and Pascal Nussbaum of the Bio-inspired Systems – Microelectronics Division of Centre Swiss d'Electronique et de Microtechnique SA (CSEM), Neuchâtel, Switzerland.

References:

- /1/ Duparré, J.; Dannberg, P.; Schreiber, P.; Bräuer, A.; Tünnermann, A.: "Thin compound eye camera", *Appl. Opt.* 44(15), pp. 2949–2956 (2005).
- /2/ Wippermann, F.; Duparré, J.; Schreiber, P.; Dannberg, P.: "Design and fabrication of a chirped array of refractive ellipsoidal micro-lenses for an apposition eye camera objective", *Proc. of Optical Design and Engineering II*, L. Mazuray and R. Wartmann, eds., SPIE 5962, (2005).
- /3/ Duparré, J.; Wippermann, F.; Dannberg, P.; Reimann, A.: "Chirped arrays of refractive ellipsoidal microlenses for aberration correction under oblique incidence", *Optics Express* 13 (2005) 26 p. 10539–10551, ISSN 1094-4087.

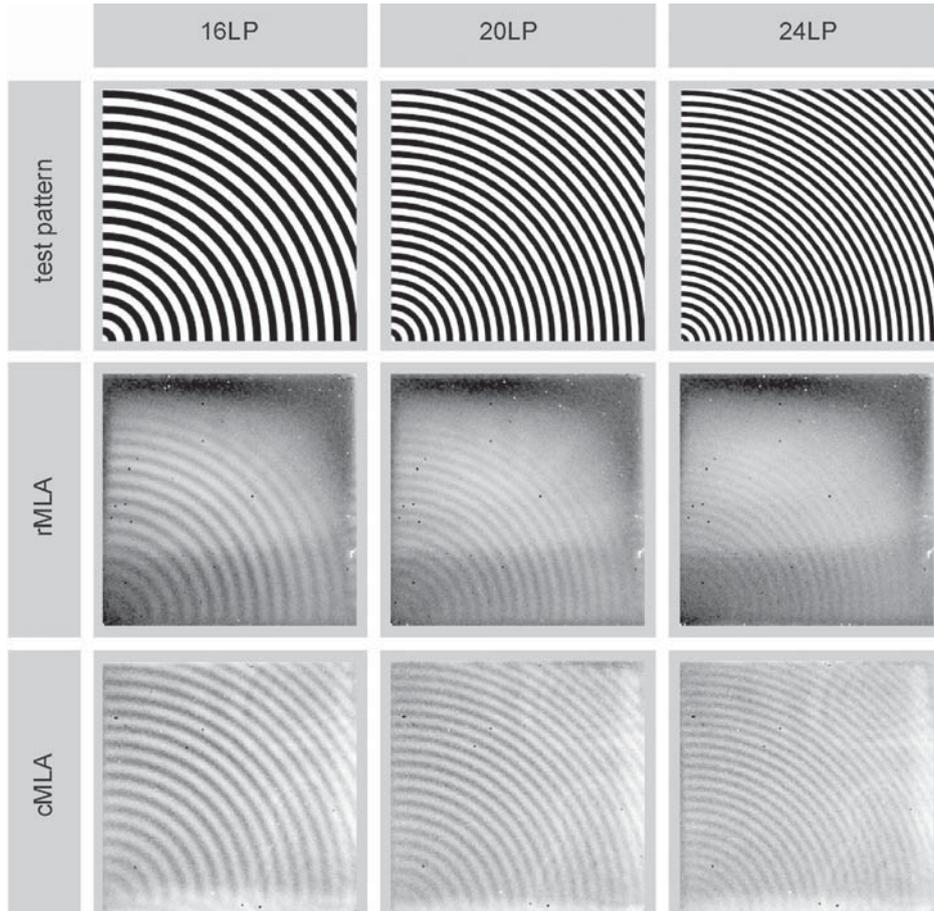


Abb. 5:

Quadrant eines kreissymmetrischen Testmusters unterschiedlicher Ortsfrequenzen (LP steht für Linienpaare pro Gesichtsfeld) zentriert auf die Mitte des Gesichtsfeldes und aufgenommene Bilder unter Verwendung eines gechirpten Mikrolinsenarrays für die kanalweise Korrektur der Aberration bei schrägem Einfall und unter Verwendung eines regelmäßigen Mikrolinsenarrays zum Vergleich.

Fig. 5:

Circular symmetric test patterns of different spatial frequencies (LP stands for linepairs over the FOV) centered on the center of FOV and captured images. Images were captured using a chirped lens array for channelwise aberration correction for the oblique incidence and by using a regular lens array for comparison.



Ernst-Bernhard Kley¹



Thomas Kämpfe¹

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

Die Erzeugung von Bildern mittels Projektionstechnik hat ein weites Anwendungsgebiet überall dort, wo eine Ausfüllung der Bildebene mit einem bilderzeugenden Gerät nicht machbar oder zu teuer ist. Die üblichen Projektionsverfahren, welche die Bildinformation mittels LCD- oder Mikrospiegel-Array auf einen gewöhnlichen Lichtstrahl aufmodulieren, sind dabei in Ihrer Anwendung durch die erreichbare Helligkeiten und Kontraste, den erreichbaren Verzerrungsgrad des Bildes (bei Projektion auf schräge Flächen) und die Größe der Projektionseinheit beschränkt. Einige spezielle Anwendungsfälle können daher mit konventionellen Projektionssystemen nicht gelöst werden.

Am Institut für Angewandte Physik werden in diesem Rahmen computergenerierte RGB-Hologramme entwickelt, die Projektionssysteme mit großer Schärfentiefe und starkem Kontrast möglich machen. Weiterhin ist mit diesem Prinzip die Realisierung einer sehr kleinen Projektionseinheit am Ort der Bildprojektion möglich, insofern die benötigte Laserleistung zur Verfügung steht (z. B. durch Lichtleitfasern geliefert).

Die monochromatische Bilderzeugung durch computergenerierte Hologramme (CGH) ist bekannt. Auf den Laserstrahl wird durch das CGH eine optische Funktion aufmoduliert, die während der weiteren Ausbreitung des Strahls in das Fernfeld durch Interferenz das gewünschte Bild entstehen lässt. Das CGH und die Bildebene sind dabei im einfachsten Fall durch eine Fourier-Transformation verknüpft, wodurch die typischen Eigenschaften eines Hologramms (Justierempfindlichkeit, »Zerbrochene« Hologramme erzeugen immer noch das Gesamtbild) bedingt sind. Im allgemeinen Fall kann das CGH sowohl die Amplitude als auch die

Phase des Strahls beeinflussen. Aufgrund der wesentlich höheren Effizienz sind jedoch in unserem Fall hauptsächlich Phasenhologramme von Interesse.

Zur Erzeugung vollfarbiger Bilder benötigt man drei einzelne CGH, welche den Rot-, Blau- und Grünanteil des zu erzeugenden Bildes einzeln kodieren. Durch Beleuchtung der drei Hologramme mit den entsprechenden Wellenlängen können drei einzelne Bilder in den Grundfarben Rot, Blau und Grün erzeugt werden, die bei geeigneter Überlagerung das gewünschte, bunte Bild ergeben. Ein naheliegender Weg, die Farbtrennung in der Hologrammebene zu erreichen, ist eine laterale Trennung der CGHs. Dieses Prinzip konnte bereits erfolgreich experimentell bestätigt werden. Die erzeugten Bilder zeichnen sich durch sehr hohen Kontrast und eine sehr gute Farbbrillanz aus. Ein entscheidender Vorteil von CGHs geht jedoch bei diesem lateralen Farbmultiplexing verloren: Die Überlagerung der drei Farben kann nur für eine bestimmte Ebene erreicht werden, somit wird die Schärfentiefe verringert. Weiterhin ist der optische Aufbau sehr justieraufwendig.

Die momentane Forschung konzentriert sich darauf, andere Methoden des Farbmultiplexings zu finden, die ohne eine laterale Deplatzierung der einzelnen CGHs auskommen. Damit wäre eine einfache Erzeugung echter, farbiger Bilder aus einem weißen Laserstrahl (kombiniert aus Rot, Grün und Blau) möglich. Das RGB-CHG würde sich dann genauso verhalten, wie ein konventionelles CGH und die gleichen vorteilhaften Eigenschaften zeigen (sehr große Schärfentiefe, einfaches Handling). Erste Prototypen dieser neuen Technik konnten bereits erfolgreich getestet werden.

Color picture generation by RGB-holograms

The generation of pictures by projection techniques can be very useful, if the picture can not be created in the image plane itself. The common projection techniques, which modulate a beam of light by means of an LCD- or micro-mirror-array, are restricted regarding the achievable picture deformation (important for projection on tilted surfaces) and the size of the projection unit itself. Therefore conventional projection systems can not be used for certain applications.

In this context the institute of applied physics currently develops computer generated RGB-holograms, which allow the realization of projection systems with an extensive depth of focus and high contrast. Furthermore this principle allows very small projection units, if the necessary laser power is available (e.g. delivered by an optical fiber).

The generation of monochromatic pictures by computer generated holograms (CGH) is common knowledge. An optical function is modulated onto a laser beam, creating the desired picture by interference during the further propagation of the beam. In principle the CGH and the image plane are connected by a Fourier transformation, therefore CGH's show the typical properties of conventional holograms (tolerant to adjustment errors, "broken" holograms still create the whole image). In the most general case, a hologram can influence both amplitude and phase. However, our interest lies in phase holograms due to their superior efficiency.

To create colored pictures three holograms are necessary, which encode the red, green and blue parts of the image separately. The illumination of these three holograms with the corresponding wavelength allows the creation of three pictures in the main

colors red, green and blue, which create a fully colored picture if they are superpositioned correctly. The simplest way of separating the colors in the hologram plane is to laterally separate the three CGHs. This principle has already been demonstrated experimentally. The created pictures are very colorful and exhibit a high contrast, but important advantages of CGHs are lost in the case of lateral color multiplexing. The correct superposition of all three colors can only be obtained for a certain image plane, which reduces the depth of focus. Furthermore the adjustment process is very complicated.

Our current research explores the possibilities of other color multiplexing techniques, which avoid the lateral displacement of the single red, green and blue CGHs. This would allow the creation of color pictures from one white laser beam (combined from red, green and blue). Such an RGB-CGH would have the same advantages as a conventional CGH (large depth of focus, easy handling). The first prototypes of this new technique have been successfully tested.

Abb. 1:
Mit computergenerierten RGB-Hologrammen erzeugte Farbbilder.

Fig. 1:
Color pictures, created by RGB-CGHs.

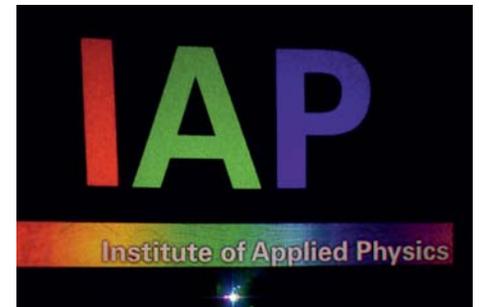
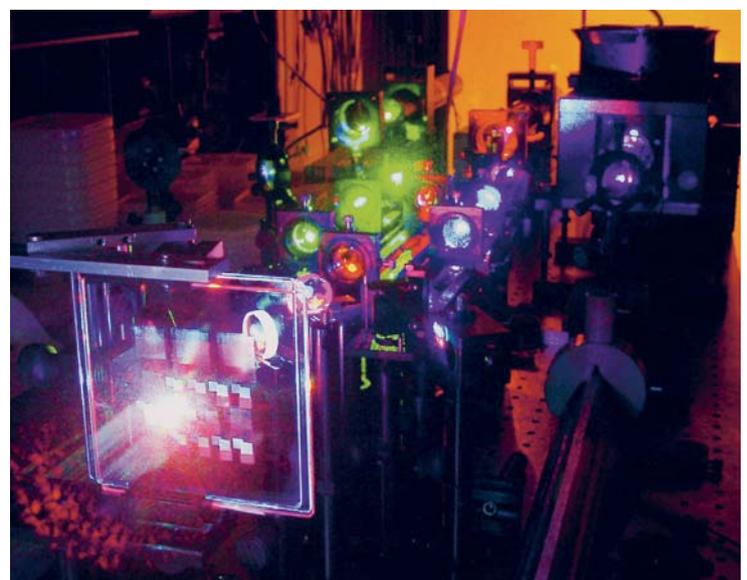


Abb. 2:
Optischer Aufbau.

Fig. 2:
Optical setup.





Markus Augustin¹



Chii-Chang Chen²



Thomas Pertsch¹



Andreas Tünnermann



Ernst-Bernhard Kley¹



Stefan Nolte¹

Photonische Kristalle sind periodische, dielektrische (Nano)strukturen. Analog zu Halbleiterkristallen wird darin die Ausbreitung von elektromagnetischen Wellen beeinflusst, wo die Bewegung der Elektronen durch ein periodisches Potential und durch die Existenz von erlaubten und verbotenen Energiebändern bestimmt wird. Die Abwesenheit erlaubter propagierender Moden innerhalb der Struktur – in einem Wellenlängenbereich, der als photonische Bandlücke bezeichnet wird – erlaubt die Realisierung konkreter Bauelemente mit unterschiedlichsten Funktionalitäten. Hervorzuheben sind hierbei insbesondere Wellenleiter und Resonatoren. Das viel versprechende Potential dieser Elemente ist aber durch sehr große Koppelverluste zur Außenwelt, welche durch kleine Modenfelder bedingt sind, deutlich limitiert. Eine Abhilfe versprechen hierbei ebenfalls Photonische Kristalle, wobei hier allerdings nicht die Existenz und Größe der Bandlücke entscheidend sind, sondern dass diese bei einem Lichtstrahl eine gezielte Phasenänderung bewirken, welche sich in einer Fokussierung des Lichtes äußert. Dadurch sollte eine hocheffiziente Ankopplung an die deutlich kleineren Modenfelder photonischer Kristallwellenleiter möglich sein.

Eine Fokussierung von Licht mittels einer Linse wird normalerweise durch einen Phasenfaktor bewirkt, welcher durch die konvex gewölbte Form eines homogenen Materials induziert wird. Analog hierzu ist eine Fokussierung auch in einem Material mit einer Gradientenindexverteilung möglich. Eine solche Verteilung kann auch durch eine Nanostrukturierung erreicht werden, indem ein Parameter der periodischen Struktur kontinuierlich verändert wird (z. B. der Lochdurchmesser). Mit Hilfe einer Finite-Differenz Time-Domain (FDTD) Simulation ist für eine Struktur bestehend aus Löchern

in einer quadratischen Anordnung im Abstand von 1241 nm und einer linearen Variation des Lochdurchmessers von 500 nm zu 993 nm dieser Fokussierungseffekt überprüft worden. Hierbei konnte bei einer Wellenlänge von 1,55 μm eine Fokussierung auf eine Halbwertsbreite von etwa 1,5 μm beobachtet werden (Abb. 1).

Zweidimensionale Strukturen sind mittels Elektronenstrahlithographie hergestellt worden. Die vertikale Führung von Licht ist hierbei unter Nutzung des Prinzips der Totalreflexion möglich – der Photonische Kristall wird zwischen zwei niedrigbrechenderen Schichten gelagert. Entgegen der bisher in der Literatur für die Realisierung Photonischer Kristalle verwendeten hochbrechenden Materialien wie Silizium und Gallium-Arsenid erfolgte in Jena die Untersuchung Photonischer Kristalle auf der Basis von Siliziumnitrid, welches auch im sichtbaren Spektralbereich transparent ist. Statt einer Brechzahl von über drei liegt hier nur eine Brechzahl ~ 2 vor.

In Abb. 2 ist eine REM-Aufnahme eines Photonischen Kristalls zu sehen, der den gewünschten Gradienten im Lochdurchmesser aufweist und dadurch für eine Wellenlänge von 1,55 μm die Fokussierung von Licht in einen Photonischen Kristallwellenleiter erlaubt. Dieser Wellenleiter ist im Bild rechts zu sehen. Hierdurch sollte es möglich sein, eines der wesentlichen Probleme Photonischer Kristallwellenleiter, nämlich die sehr hohen Koppelverluste, deutlich zu verringern und damit diese anwendungstauglich zu machen.

¹ Friedrich-Schiller-Universität Jena, Institut für Angewandte Physik
² National-Central-University, Institute of Optical Sciences, Taiwan

Photonic crystals are periodic dielectric (nano)structures. They affect the propagation of electromagnetic waves in the same way as the periodic potential in a semiconductor crystal affects electron motion; by defining allowed and forbidden electronic energy bands. The absence of allowed propagation modes inside the structures, over a range of wavelengths called a photonic band gap, makes the realization of concrete components with distinct functionality possible; of particular note are waveguides and resonators. However the promising potential of these devices is limited by huge coupling losses to the outside world which are caused by very small mode fields. A solution to this problem can be found in Photonic Crystals themselves, although in this regard the existence or size of the band gap is not the important feature but rather that the Photonic Crystal causes a specific phase change in a light beam leading to a focusing of the beam. Thereby a highly efficient coupling to the much smaller mode fields of the photonic crystal waveguides should become possible.

Focusing light by means of a lens is normally caused by the induction of an appropriate phase factor by the convex curvature of a homogenous material. A similar type of focusing is also possible with a material featuring a gradient index distribution. Such a distribution can also be accomplished by a nano-structuring, e. g. if one parameter of the periodic structure, such as the hole diameter is continuously changing.

With the help of a finite-difference time-domain (FDTD) simulation this focusing effect was verified for a structure consisting of air holes in a square lattice with a pitch of 1 241 nm and a linear variation of the diameter

from 500 nm to 993 nm. In this case a focusing of light with a wavelength of 1.55 μm to a full width half maximum of 1.5 μm was observed in the simulation (Fig. 1).

Two dimensional structures are fabricated by electron beam lithography. The vertical confinement of light is accomplished by exploiting the principle of total internal reflection – the photonic crystal is placed between layers with a lower refractive index. In contrast to reports in the literature, where high index materials such as silicon or gallium arsenide are used for the realization of photonic crystals, the investigations in Jena have been concentrated on silicon nitride, which is also transparent in the visible spectral range. Using silicon nitride, a refractive index of ~ 2 can be found, as opposed to a refractive index of over 3.

In Fig. 2 SEM images of a Photonic Crystal are shown. This crystal exhibits the desired gradient in the hole diameter and thereby allows the focusing of light, for a wavelength of 1.55 μm , into a Photonic Crystal waveguide. This waveguide can also be seen in Fig. 2 on the right. Using this technique it should be possible to reduce the huge coupling losses and thereby solve one of the major problems of photonic crystal waveguides and thus make them suitable for a wide range of applications.

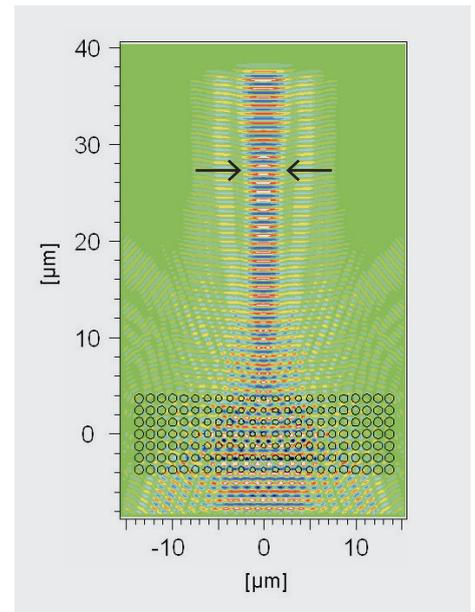
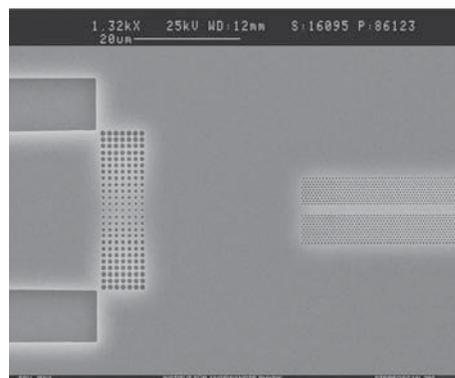


Abb. 1: Mit Hilfe einer Gradientenstruktur kann eine Fokussierung erreicht werden. Die Struktur besteht im Detail aus Löchern in einer quadratischen Anordnung, deren Durchmesser zur Mitte hin linear kleiner werden. Hierdurch ist eine Fokussierung des Lichts auf eine Halbwertbreite von etwa 1,5 μm möglich.

Fig. 1: With a gradient structure focusing can be achieved. In detail, this structure consists of air holes in a square lattice, where from the middle of the structure the hole-diameter is linearly increased. Thereby the focusing of light to a full width half maximum of 1.5 μm is enabled.

Abb.2: Rasterelektronenmikroskopaufnahme einer Gradientenstruktur, mit deren Hilfe es möglich sein sollte, die Koppelverluste von Photonischen Kristallwellenleitern deutlich zu verringern. Rechts im Bild ist außerdem ein Photonischer Kristallwellenleiter zu sehen, in den mit Hilfe dieser »Photonischen Kristalllinse« eingekoppelt werden kann.

Fig. 2: SEM image of a gradient structure allowing the drastic reduction of coupling losses of photonic crystal waveguides. On the right side of the image such a photonic crystal waveguide is also shown, in which light can be coupled with this "photonic crystal lens".

Faserlaser – Neue Möglichkeiten durch Mikrostrukturierung



Jens Limpert¹



Fabian Röser¹



Andreas Liem¹



Thomas Schreiber¹



Oliver Schmidt¹



Andreas Tünnermann

Einleitung

In den letzten Jahren haben sich mit Seltenen Erden dotierte Faserlaser und -verstärker als leistungskalierbares Festkörperlaser-Konzept bewährt. Im cw Betrieb wurden Leistungen im Kilowattbereich bei gleichzeitig sehr hoher Strahlqualität erreicht. Diese Ergebnisse sind aufgrund von einigen besonderen Eigenschaften aktiver Fasern möglich geworden. Der hauptsächliche Vorteil dieser Fasern liegt in der Möglichkeit, gleichzeitig sowohl Pump- als auch Laserstrahlung in Wellenleiterstrukturen zu führen. Die Qualität der vom Laser abgegebenen Strahlung wird durch das Brechzahlprofil des dotierten Kerns bestimmt und ist daher leistungsunabhängig. Des Weiteren wird durch das große Verhältnis zwischen Oberfläche und aktivem Volumen eine sehr gute Wärmeableitung garantiert, wodurch der Faserlaser prinzipiell unanfällig gegenüber thermo-optischen Problemen wird.

Durch Führung der Pumpstrahlung wird ein hohes Produkt von Intensität der Pumpstrahlung und Interaktionslänge garantiert, weshalb schon bei einmaligem Durchlauf einer mit Seltenen Erden dotierten Faser eine hohe Verstärkung erreicht wird. Allerdings treten in konventionellen monomodigen Stufenindexfasern nichtlineare Effekte auf, da das Laserlicht in Kernen mit Durchmessern von $\sim 10 \mu\text{m}$ über große Längen von mehreren Metern mit dem Fasermaterial wechselwirkt.

Diese nichtlinearen Effekte, insbesondere inelastische Ramanstreuung und der intensitätsabhängige Brechungsindex, begrenzen im Allgemeinen die Möglichkeiten der Skalierung von Faserlasern und -verstärkern. Die Nichtlinearität einer Faser skaliert mit ihrer Länge und ist indirekt proportional zur Modenfeldfläche. Daher werden kurze Fasern mit großer Modenfeldfläche für eine signifikante Leistungskalierung genutzt.

Photonische Kristallfasern geringer Nichtlinearität

Unsere Arbeit konzentrierte sich auf neue Faserdesigns, mit denen die Beschränkungen konventioneller Faserlaser und -verstärker aufgehoben werden sollen. Durch die Mikrostrukturierung einer Faser kann ihre Funktionsvielfalt erhöht werden. Eines unserer Ergebnisse ist der Entwurf einer photonischen Kristallfaser mit den Außendimensionen eines Stab-Lasers und den Funktionseigenschaften einer Faser. Die Grundidee dieses Faserdesigns ist, die Außendimensionen eines Stab-Lasers, also einen Durchmesser im Bereich von einigen wenigen Millimetern und eine Länge von nur wenigen zehn Zentimetern, mit den zwei wichtigen Wellenleiterstrukturen, eine für die Pump- und eine zweite für die Laserstrahlung, zu verbinden. Die Nichtlinearität einer solchen Faser ist dadurch extrem reduziert und macht somit eine signifikante Leistungs- und Energieskalierung möglich /1/.

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

Fiber Laser – Microstructures open new possibilities

Introduction

Over the past few years rare-earth-doped fiber lasers and amplifiers have proved to be a power-scalable solid-state laser concept. Continuous-wave output powers in the kilowatt range with excellent beam quality have been demonstrated. These results are possible because of several inherent properties of active fibers. Their main performance advantages arise from the fact that they can simultaneously guide pump and laser radiation through waveguide structures. The refractive-index profile of the doped core determines the mode quality of the laser output, which is therefore power independent. Furthermore, the large ratio of surface to active volume ensures excellent heat dissipation, which makes a fiber laser basically immune to thermo-optic problems.

The guidance of pump radiation guarantees a large product of pump intensity and interaction length, which is the reason for the high single-pass gain of rare-earth-doped fiber. However, nonlinear optical effects arise in conventional single-mode fibers due to high intensities created by the tight confinement of the laser radiation in typical core diameters of $\sim 10 \mu\text{m}$ together with the extended length of material over which the laser interacts, which can be up to several tens of meters.

These nonlinear effects, in particular inelastic Raman scattering and self-phase modulation resulting from the intensity dependent refractive index, are in general the main performance limitations of fiber lasers and amplifiers. The nonlinearity of a fiber scales with the fiber length and is inversely proportional to the mode-field area. Therefore, the employment of short, large-mode-area fibers allows for significant power scaling.

Rod-type photonic crystal fibers – Low-nonlinearity fibers

Our work focused on novel fiber designs to overcome the conventional limitations of fiber lasers and amplifiers. By microstructuring a fiber, new functionality can be added. As a result we designed a large-mode-area photonic crystal fiber with the outer dimensions of a rod laser and the performance of a fiber laser. The basic idea of this fiber design is to have the outer dimensions of a rod laser; meaning a diameter in the range of a few millimeters and a length of just a few tens of centimeters, but to include two important waveguide structures; one for pump radiation and one for laser radiation. Finally, such a fiber has a radically reduced nonlinearity and therefore allows for significant power and energy scaling /1/.

Durch eine Verkleinerung des Verhältnisses zwischen der Pumpkernfläche und der aktiven Kernfläche wird die Pumplichtabsorption erhöht, was eine Reduzierung der Faserlänge zur Folge hat. Der Mantel zur Führung des Pumplichtes der beschriebenen Faser wird von Luftlöchern umgeben, wie in Abb. 1 zu sehen ist. Der Durchmesser dieses so geformten Pumplichtmantels beträgt $\sim 180 \mu\text{m}$ mit einer numerischen Apertur von 0,6. Der Ytterbium-dotierte Kern besitzt einen Durchmesser von $\sim 60 \mu\text{m}$, was zu einer Pumplichtabsorption dieser Struktur von $\sim 30 \text{ dB/m}$ bei 976 nm führt. Hierbei sollte erwähnt werden, dass aufgrund des nicht veränderten Produktes von Pumpintensität und Faserlänge verglichen mit anderen Doppelkerndesigns die hohe Verstärkung bei einmaligem Durchlauf selbst bei extrem kurzen Faserlängen beibehalten wird. Daher besitzt diese (Stab-)Faser sowohl eine geringe Laserschwelle sowie hohe Effizienz wie im Fall der konventionellen Faserdimensionen.

Normalerweise ist die Erzeugung von hohen Leistungsniveaus mit kurzen Fasern durch thermo-optische Probleme begrenzt. Eine detaillierte Analyse des thermo-optischen Verhaltens von Hochleistungs-Faserlasern (unter Einbeziehung von photonischen Kristallfasern) [2] hat gezeigt, dass Leistungskalierung durch die Schädigung des Polymer-Schutzmantels begrenzt wird, was bei Temperaturen zwischen $100 \text{ }^\circ\text{C}$ und $200 \text{ }^\circ\text{C}$ auf der Faseroberfläche auftritt. Diese Temperaturen treten leicht auf, wenn Leistungen im Bereich von 100 W/m gewonnen werden. In einer konventionellen Doppelkernfaser hat der Schutzmantel eine optische Funktion.

Er muss einen kleineren Brechungsindex als Quarzglas besitzen und bildet somit den Wellenleiter für die Pumpstrahlung. In einer mikrostrukturierten Faser dient dieser Mantel jedoch nur dem Schutz der Faser gegen mechanische oder chemische Zerstörung. Der direkteste Weg das Polymer vor Zerstörung zu schützen ist, es zu entfernen. Dies ist möglich, wenn die Faser selber mechanisch stabil genug ist, d. h. wenn sie z. B. eine genügende Dicke besitzt. Der Außendurchmesser der in Abb. 1 dargestellten Faser beträgt 2 mm , wobei diese keinen Polymer-Schutzmantel mehr besitzt. Zusätzlich verbessert der größere Außendurchmesser die Wärmeabfuhr [2] und reduziert die Propagationsverluste schwach geführter Strahlung aufgrund erhöhter Steifigkeit der Faser.

Ein Faserlaser in seiner einfachsten Form wird mit einem 50 cm langen Stück dieser $60 \mu\text{m}$ Ytterbium-dotierten (Stab-)Faser gebaut. Verglichen mit konventionellen Stufenindex-Fasern ist die Nichtlinearität um einen Faktor $2\,000$ kleiner. Der Laser wird von zwei Seiten gepumpt und die Faserenden sind gerade poliert.

Der Resonator wird durch einen hochreflektierenden Spiegel an der einen und $\sim 4 \%$ Fresnel-Reflexion an der anderen Seite gebildet. Abbildung 2 zeigt ein Photo des experimentellen Aufbaus. Bei einem differentiellen Wirkungsquerschnitt von 75% erhielten wir 260 W monomodiger Laser Ausgangsleistung. Die zugehörige mittlere extrahierte Leistung beträgt $> 500 \text{ W/m}$, welches nach unserem Wissen den höchsten Wert für Faserlaser überhaupt darstellt [3].

Polarisierende photonische Kristallfasern

Aufgrund der Erhöhung nichtlinearer Grenzen, die durch die größeren monomodigen Kerne und die hohe Absorption von photonischen Kristallfasern mit Luftmantel erzielt wurden, ist eine dramatische Skalierung der Ausgangsleistung von Faserlasern erreicht worden. Normalerweise stellt man in solchen Hochleistungsexperimenten einen Einbruch des Polarisationsgrades fest.

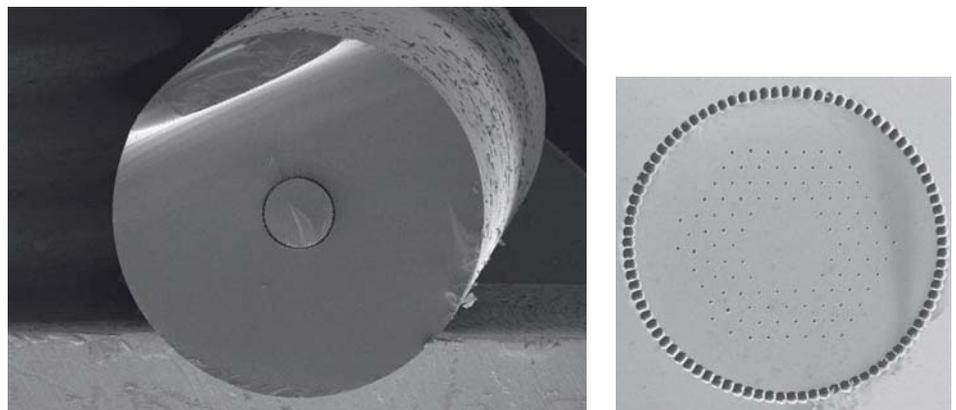


Abb. 1: Mikroskopaufnahme der Stab-Faser (links) und eine Nahaufnahme der Kernregion (rechts).

Fig. 1: Microscope image of a rod-type photonic crystal fiber (left) and close-up view of the inner cladding and core regions (right).

One can achieve the reduction of fiber length by reducing the ratio of pump core area to active core area, which increases the pump light absorption of the double-clad fiber. The inner cladding of this fiber is surrounded by an air – cladding region, as shown in Fig. 1. The inner cladding has a diameter of $\sim 180 \mu\text{m}$ with a numerical aperture as high as 0.6. The ytterbium-doped core has a diameter of $\sim 60 \mu\text{m}$, leading to pump light absorption by this structure of $\sim 30 \text{ dB/m}$ at 976 nm. It is important to note that, because of the unchanged product of pump intensity and fiber length compared with other double-clad fiber designs, the high single-pass gain of the fiber is maintained even over an extremely short fiber length. Therefore, this rod-type fiber also features a low lasing threshold and high efficiency as is the case for conventional fiber dimensions.

Usually, the extraction of high-power levels from short fiber lengths is limited by thermo-optic problems. A detailed analysis of the thermo-optic behavior of high-power fiber lasers (including photonic crystal fibers) /2/ has revealed that power scaling is restricted by damage to the polymer coating, which occurs at fiber surface temperatures between 100 and 200 °C. These temperatures are easily reached if power levels in the 100 W/m range are extracted. In a conventional double-clad fiber the coating has an optical function.

The coating has to have a lower refractive index than fused silica and therefore forms the waveguide for pump radiation. But in a micro-structured air-clad fiber, it just serves to protect the fiber from mechanical damage and chemical attack. The most straightforward way of avoiding coating damage is to remove the coating. This can be done if the fiber itself has enough mechanical stability, i.e., if the fiber is thick enough.

The fiber shown in Fig. 1 has an outer cladding diameter amounting to 2 mm and possesses no coating. In addition, the larger outer diameter improves the heat dissipation capabilities of this fiber /2/ and also reduces the propagation loss of weakly guided radiation that is due to the increased rigidity. A fiber laser in its simplest form is built by use of just a 50-cm length of the 60 μm ytterbium-doped core rod-type fiber discussed here. Compared to conventional step-index fibers the nonlinearity is reduced by a factor of 2000. The laser is pumped from two sides, and the fiber ends are perpendicularly polished.

The cavity is formed by a high reflecting mirror on one side and $\sim 4\%$ Fresnel reflections on the other side. Figure 2 shows a photograph of the experimental setup. We obtained 260 W of single-transverse-mode laser output power from this fiber sample with a slope efficiency of 75 %. This corresponds to an extracted power greater than 500 W/m, which to our knowledge is the highest value ever reported for fiber lasers /3/.

Single-polarization photonic crystal fiber

Due to the up-scaling of the nonlinear limits, which are greatly reduced due to the larger single-mode cores and shorter absorption of air-clad large mode area photonic crystal fibers, as described above, a dramatic scaling of the output of fiber laser systems is achieved. Usually, in these high power experiments a degradation of the degree of polarization is observed.

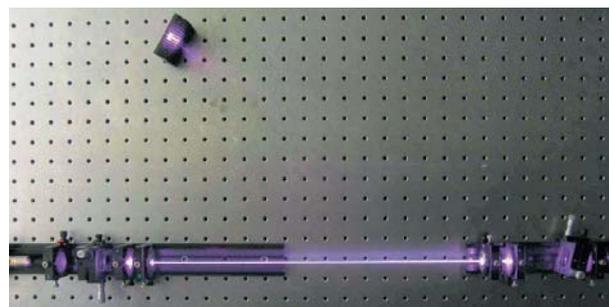


Abb. 2:
Experimenteller Aufbau des Hochleistungslasers mit Stab-Faser als Verstärkermedium.

Fig. 2:
Experimental setup of a short-length high-power fiber laser.

Um dieses Problem zu lösen und speziell den Laseraufbau in Hinsicht auf Kontrolle der Polarisation zu vereinfachen, interessierten wir uns für die Kombination von mikrostrukturierten Fasern mit großem Modenfelddurchmesser und polarisationserhaltenden Elementen.

Unsere Bemühungen zielten dabei auf polarisationserhaltende photonische Kristallfasern auf der Basis von spannungserzeugenden Elementen ab. Wir konnten zeigen, dass die Mikrostrukturierung der Faser die Anwendung von spannungsinduzierten Elementen zur Erzeugung von Doppelbrechung nicht limitieren, aber die Kombination von spannungsinduzierter Doppelbrechung und großen Kernen schwer zu erreichen ist /4/. Deshalb entwickelten wir ein neues Faserdesign, welches spannungsinduzierende Elemente als Teil des mikrostrukturierten Mantels beinhaltet /5/. Diese Elemente schaffen einerseits genügend Doppelbrechung, sind andererseits aber mit ihrer Brechzahl an die Mikrostrukturierung angepasst und damit auch für die Führung des Lichts verantwortlich. Solch eine Faser ist in Abb. 3 zu sehen. Es zeigte sich, dass die durch ein solches Design erzeugte Doppelbrechung ausreicht, um die zwei degenerierten Polarisationsmoden der Fundamentalen aufzuspalten. Dabei liegt der effektive Index einer der beiden Moden unterhalb des Mantelindex und wird daher nicht geführt. Die Faser wirkt demnach polarisierend. Die Modenfeldfläche beträgt $\sim 700 \mu\text{m}^2$ und ist damit deutlich größer als die jeder vergleichbaren polarisationserhaltenden grundmodigen Stufenindexfaser.

Die Faser wurde bei kleinen Leistungen getestet und zeigte vergleichbare Leistungsmerkmale wie eine nicht polarisationserhaltende Faser mit dem Unterschied, dass die Polarisation nicht zufällig, sondern perfekt linear war /5/. In einem weiteren Experiment konnten bis zu 147 W mittlere Leistung bei einem differentiellen Wirkungsquerschnitt von 66 % aus der Faser extrahiert werden. Die Daten sind in Abb. 4 zusammengefasst und waren nur durch die Leistung der Pumpdiode beschränkt. Der Polarisationsgrad betrug 95 % ($> 16 \text{ dB}$ Auslöschungsverhältnis) bis zu einer Leistung von 50 W. Bei der höchsten Leistung betrug der Polarisationsgrad immer noch 82 %. Neben dem demonstrierten Potential einer solchen Faser für hohe linear polarisierte Leistungen kann die Faser als Verstärker eingesetzt werden. Speziell durch die geringe Nichtlinearität ist die Faser prädestiniert für Ultrakurzpuls-Verstärker-Systeme als polarisationserhaltendes Verstärkermittel. Die polarisationserhaltenden Eigenschaften wurden auch experimentell bestimmt und zeigten ein Auslöschungsverhältnis der Polarisierungen von mehr als 24 dB (1:250).

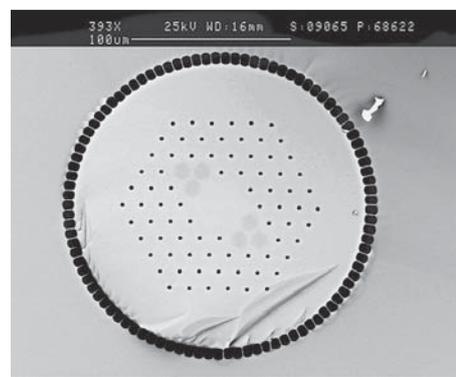


Abb. 3: Mikroskopaufnahme der Yb-dotierten photonischen Kristallfaser mit sechs brechzahlangepassten spannungsinduzierenden Elementen.

Fig. 3: SEM image of the Yb-doped air-clad photonic crystal fiber with six index-matched stress applying parts.

Gefördert im Rahmen der internen Programme der FhG, Fördernummer MAVO 814970.

References:

- /1/ Limpert, J.; Liem, A.; Reich, M.; Schreiber, T.; Nolte, S.; Zellmer, H.; Tünnermann, A.; Broeng, J.; Petersson, A.; Jakobsen, C.: „Low-nonlinearity single-transverse-mode ytterbium-doped photonic crystal fiber amplifier“, *Opt. Express* 12, 1313–1319 (2004).
- /2/ Limpert, J.; Schreiber, T.; Liem, A.; Nolte, S.; Zellmer, H.; Peschel, T.; Guyenot, V.; Tünnermann, A.: “Thermo-optical properties of air-clad photonic crystal fiber lasers in high power operation“, *Opt. Express* 11, 2982–2990 (2003).
- /3/ Limpert, J.; Deguil-Robin, N.; Manek-Hönniger, I.; Salin, F.; Röser, F.; Liem, A.; Schreiber, T.; Nolte, S.; Zellmer, H.; Tünnermann, A.; Broeng, J.; Petersson, A.; Jakobsen, C.: “High-power rod-type photonic crystal fiber laser“, *Opt. Express* 13, 1055–1058 (2005).
- /4/ Schreiber, T.; Schultz, H.; Schmidt, O.; Röser, F.; Limpert, J.; Tünnermann, A.: “Stress-induced birefringence in large-mode-area micro-structured optical fibers“, *Opt. Express* 13, 3637–3646 (2005).
- /5/ Schreiber, T.; Röser, F.; Schmidt, O.; Limpert, J.; Iliev, R.; Lederer, F.; Petersson, A.; Jacobsen, C.; Hansen, K. P.; Broeng, J.; Tünnermann, A.: “Stress-induced single-polarization single-transverse mode photonic crystal fiber with low nonlinearity“, *Opt. Express* 13, 7621–7630 (2005).

To overcome this problem and especially to simplify the laser setup in terms of polarization control, there is considerable interest in combining large mode area microstructured fibers and polarization maintaining elements.

Our investigations focused on polarization maintaining fibers based on stress-induced birefringence in photonic crystal fibers. We found that the microstructure itself does not limit the application of stress applying parts (SAPs) to achieve birefringence but that a fiber with low nonlinearity is difficult to achieve /4/. Therefore, we developed a novel design of photonic crystal fiber that includes stress-applying elements as part of the photonic cladding /5/. Beside the stress-induced birefringence, the light is confined by both parts of the photonic cladding: the air holes and the index matched regular array of SAPs. Such a fiber is shown in Fig. 3. We found that the birefringence is enough to split two polarization states of the weakly guided fundamental mode in such a way that the effective index of one polarization is below the cladding index, thus, resulting in a single polarization, large mode area fiber. The mode field area of $\sim 700 \mu\text{m}^2$ is larger than that of any step-index single mode fibers.

The fiber was tested in low power operation and showed a very similar performance to a comparable non-polarization maintaining fiber, but of course with almost perfectly polarized output /5/. In a new experiment, up to 147 W of output power could be extracted, as shown in Fig. 4, which was again limited by the available pump power. The slope efficiency with respect to the launched pump power was 66 %.

The degree of polarization is above 95 % (>16 dB extinction ratio) for output powers up to 50 W. At the highest power level, the degree of polarization is still 82 %. Besides the potential of such a new fiber design of high power lasers with polarized output, the fiber can be used as an amplifier. The low nonlinearity in particular predestines this fiber to be a polarization maintaining gain medium in ultra-short pulse amplifier systems. The polarization maintaining properties have also been experimentally verified and showed an extinction ratio of the amplifier output of more than 24 dB (1:250).

Supported by the internal programs of the FhG, Grant number MAVO 814970.

References:

- /1/ Limpert, J.; Liem, A.; Reich, M.; Schreiber, T.; Nolte, S.; Zellmer, H.; Tünnermann, A.; Broeng, J.; Petersson, A.; Jakobsen, C.: „Low-nonlinearity single-transverse-mode ytterbium-doped photonic crystal fiber amplifier“, *Opt. Express* 12, 1313–1319 (2004).
- /2/ Limpert, J.; Schreiber, T.; Liem, A.; Nolte, S.; Zellmer, H.; Peschel, T.; Guyenot, V.; Tünnermann, A.: “Thermo-optical properties of air-clad photonic crystal fiber lasers in high power operation”, *Opt. Express* 11, 2982–2990 (2003).
- /3/ Limpert, J.; Deguil-Robin, N.; Manek-Hönniger, I.; Salin, F.; Röser, F.; Liem, A.; Schreiber, T.; Nolte, S.; Zellmer, H.; Tünnermann, A.; Broeng, J.; Petersson, A.; Jakobsen, C.: “High-power rod-type photonic crystal fiber laser”, *Opt. Express* 13, 1055–1058 (2005).
- /4/ Schreiber, T.; Schultz, H.; Schmidt, O.; Röser, F.; Limpert, J.; Tünnermann, A.: “Stress-induced birefringence in large-mode-area micro-structured optical fibers”, *Opt. Express* 13, 3637–3646 (2005).
- /5/ Schreiber, T.; Röser, F.; Schmidt, O.; Limpert, J.; Iliew, R.; Lederer, F.; Petersson, A.; Jacobsen, C.; Hansen, K. P.; Broeng, J.; Tünnermann, A.: “Stress-induced single-polarization single-transverse mode photonic crystal fiber with low nonlinearity”, *Opt. Express* 13, 7621–7630 (2005).

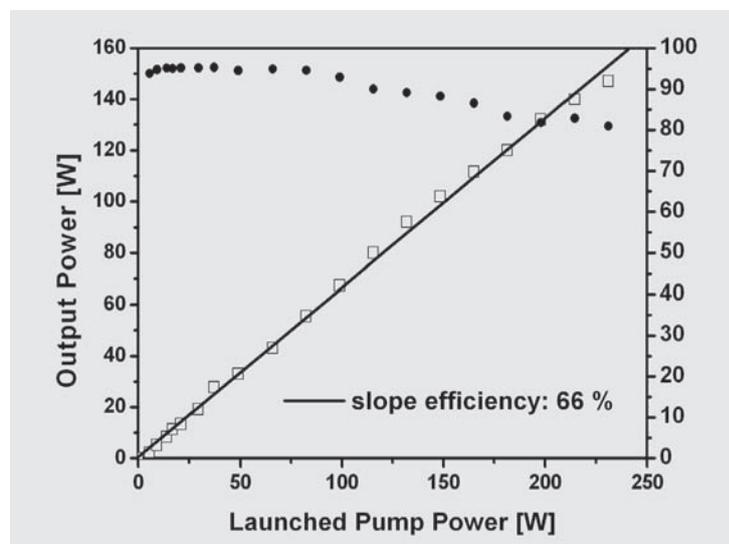


Abb. 4: Ausgangsleistung und Polarisationsgrad der polarisierenden Faser.

Fig. 4: Output characteristics of a free running laser using the single polarization Yb-doped LMA fiber.

Systemtechnische Grundlagen für THz-Imaging-Systeme



Boris Pradarutti



Claudia Brückner



Stefan Riehemann



Gunther Notni



Gabor Matthaues¹



Stefan Nolte¹

Mit der Entwicklung leistungsfähigerer Strahlungsquellen und hochsensitiver Detektoren wird der Terahertz-Frequenzbereich (0,1 THz – 10 THz) zunehmend für eine Vielzahl von Anwendungen im Sicherheits- und Qualitätsmanagement interessant. Die THz-TDS (Time Domain Spectroscopy) stellt hierbei das höchstauflösendste kohärente Detektionsverfahren dar, welches trotz geringer Quantenenergie und Gesamtleistung der THz-Strahlung ein Signal-Rauschverhältnis von bis zu 1 000 000 ermöglicht. THz-Strahlung durchdringt Papier, trockenes Holz und die meisten Kunststoffe und besitzt eine hohe Sensitivität bzgl. Wasser. Zudem existieren viele Rotationsübergänge von interessanten Molekülen, wie z. B. von organischen Substanzen, Medikamenten und illegalen Drogen, die man mit THz-Strahlung identifizieren und detektieren kann. So eröffnen THz-Systeme viele Anwendungsfelder, die bisherigen Techniken verschlossen blieben.

Für den industriellen Einsatz der THz-Technik müssen preisgünstige, robuste und kompakte Komponenten entwickelt werden. Durch den Einsatz eines Ultrakurzpuls-Faserlasers /1/ zur Erzeugung und Detektion der THz-Strahlung konnten die Systemabmessungen deutlich reduziert werden. Das Prinzip der THz-TDS besteht darin, dass die Pulse des Lasersystems in Pump- und Abtastpuls aufgeteilt werden (Abb. 1). Der Pumpimpuls wird über eine Verzögerungsstrecke auf den Emitter, eine Halbleiter-Oberfläche, geleitet, wo elektromagnetische Pulse mit einem Spektrum von (0,1–3) THz emittiert werden (Abb. 2). Ein Parabolspiegel erzeugt einen kollimierten THz-Strahl, in dem eine Probe platziert werden kann. Ein zweiter Parabolspiegel fokussiert die THz-Strahlung auf den Detektor, wo der THz-Puls durch den fs-Laserpuls abgetastet wird. Die Detektion erfolgt über den elektro-

optischen Effekt, d. h. die Polarisation des Probestrahls wird in einem elektrooptischen Kristall proportional zur elektrischen Feldstärke der THz-Strahlung gedreht. Dieser Effekt wird punktuell vermessen, so dass hier auch eine orts aufgelöste (bildgebende) Detektion möglich ist.

Zur Optimierung der Leistungsübertragung werden am IOF spezielle Komponenten realisiert. Im Vergleich zum Optikdesign im sichtbaren und ultravioletten Spektralbereich ergeben sich die Anforderungen an das Design des Abbildungssystems daraus, dass die Abmessungen der Komponenten nur wenige Vielfache größer als die Wellenlänge der THz-Strahlung (30 μm bis 3 mm) sind und somit Beugungseffekte die Strahlungsausbreitung dominieren. Dies wird als Quasioptik bezeichnet. Das Design erfolgt mithilfe der Kombination von klassischen Ray-Tracing-Programmen mit Tools zur Analyse der wellenoptischen Effekte (Abb. 3). Aufgrund der großen Wellenlängen ergeben sich geringere Anforderungen an die Oberflächenrauheit quasioptischer Komponenten als im visuellen Spektralbereich. Daher können zu ihrer Fertigung spanhebende Verfahren wie Feindrehen und Feinfräsen eingesetzt werden, was die Realisierung der optimierten Formen begünstigt. Hiermit ist ein weiterer Schritt hin zu industrietauglichen Systemen erfolgt.

Gefördert im Rahmen der internen Programme der FhG (MAVO 813907).

Literatur:

- /1/ Tünnermann, A.; Schreiber, T.; Röser, F.; Liem, A.; Höfer, S.; Zellmer, H.; Nolte, S.; Limpert, J.: "The renaissance and bright future of fibre lasers", J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys. 38, 681 (2005).

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

System technical basics for THz imaging systems

Due to the development of high power radiation sources and highly sensitive detectors, the terahertz frequency region (0.1 THz – 10 THz) is becoming increasingly interesting for multiple applications in safety and quality management. The THz TDS (Terahertz Time Domain Spectroscopy) is the coherent detection method with the highest resolution. Moreover, it can achieve a signal to noise ratio of 1 000 000 despite low quantum energy. THz radiation penetrates paper, dry wood, many plastics and has a high sensitivity to water. In addition many interesting molecules, e. g. organic materials, pharmaceutical or illegal drugs, have their rotation transitions within the THz range and thus can be detected and identified with THz radiation. THz systems open many areas of application which have been closed to other techniques up to now.

For industrial applications of the THz technique, competitively priced, robust and flexible components have to be developed. Due to the application of ultra short pulse fiber lasers [1] for generation and detection of THz radiation, the system dimensions have been reduced clearly. The principle of the THz TDS consists of splitting the laser pulses into a pump and a gate pulse (Fig. 1). The pump pulse is delayed and directed at a semiconductor surface, where electromagnetic pulses with a spectrum of 0.1 THz to 3 THz are emitted (Fig. 2). A parabolic mirror creates a collimated THz beam in which a sample can be placed. A second parabolic mirror focuses the THz beam onto the detector where the THz pulse is sampled by the fs-laser pulse. The detection is based on the electro-optical effect, which turns the polarisation of the gate beam proportionally in relation to the THz pulses. This effect can be measured point-wise, so that a spatially resolved measurement (an image) can be generated. For an optimized power transfer, special optical components are being realized at the IOF. In comparison with optical

designs for the visible and ultraviolet spectral range, the requirements of this imaging system are dictated by the fact that the dimensions of the components are only a few times larger than the wavelength of the THz radiation (30 μm to 3 mm) and so beam propagation is dominated by diffraction. This is called quasi-optics. The design includes a combination of classical ray-tracing programs with tools for analyzing wave-optical effects (Fig. 3). Due to the long wavelengths, the requirements regarding the surface roughness are fewer than those in the optical spectral range. Therefore techniques like fine cutting and fine turning can be used to realize optimized shapes. Thus, a further step to systems suitable for industrial applications is realized.

Supported by the FhG internal program (MAVO 813907).

References:

- [1] Tünnermann, A.; Schreiber, T.; Röser, F.; Liem, A.; Höfer, S.; Zellmer, H.; Nolte, S.; Limpert, J.: "The renaissance and bright future of fibre lasers", J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys. 38, 681 (2005).

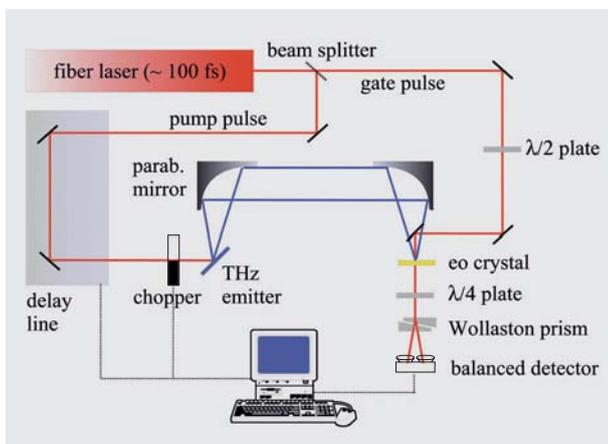


Abb. 1: Schematischer Aufbau eines THz-TDS-Systems.

Fig. 1: Schematic sketch of a THz-TDS system.

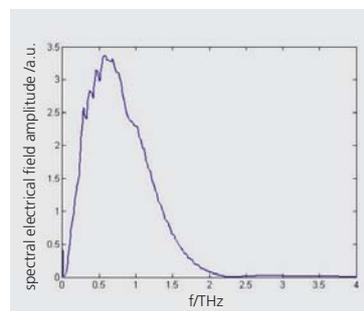


Abb. 2: Spektrale Amplitudenverteilung eines gemessenen THz-Pulses.

Fig. 2: Spectral amplitude of a measured THz pulse.

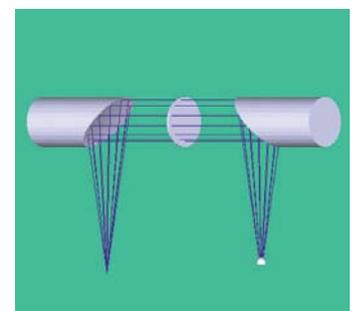


Abb. 3: Optisches Design eines THz-TDS-Systems in ZEMAX.

Fig. 3: Optical design of a THz-TDS-system in ZEMAX.

Anwendung von OLED-Mikrodisplays in visuellen Stimulationssystemen und in der Messtechnik



Uwe Lippmann



Martin Palme



Stefan Riehemann



Gunther Notni



Vegard Vangdal¹



Tormod Thomsen¹

¹ NordicNeuroLab AS, Bergen, Norwegen

Einleitung

In visuellen Stimulationssystemen sowie in Projektionssystemen finden vielfach Mikrodisplays Verwendung um Informationen darzustellen. Bei Projektionssystemen im Multimediabereich wird das projizierte Bild meist von den Zuschauern selbst betrachtet, während in der Messtechnik häufig Maßverkörperungen auf die zu vermessenden Objekte projiziert werden, die von Kameras aufgenommen und ausgewertet werden. In Stimulationssystemen, z. B. für die Funktionsdiagnostik in der Medizin, wird das Mikrodisplay selbst häufig direkt vom Patienten betrachtet. Zum Einsatz kommen vorwiegend transparente (LCD) oder reflektierende (LCOS) Flüssigkristalldisplays oder Mikrospiegelarrays (DMD) /1/. All diesen Displaytypen ist gemein, dass sie nicht selbst Licht abstrahlen, sondern auftretendes Licht modulieren. Es ist daher bei der Verwendung dieser Displays immer eine Beleuchtungseinrichtung erforderlich, um die auf ihnen dargestellten Informationen sichtbar zu machen. Der Platzbedarf der Beleuchtungseinrichtung kann erheblich sein und übersteigt gerade bei Projektionssystemen oft die Größe des eigentlichen Projektionsobjektivs. Generell wird eine Miniaturisierung derartiger Systeme angestrebt, der allerdings die Beleuchtungsbaugruppe im Wege steht.

Visuelle Stimulationssysteme werden meist direkt vor dem Auge angeordnet, so dass auch hier möglichst kompakte Systeme angestrebt werden. Selbstleuchtende OLED-Mikrodisplays können in beiden Fällen neue Möglichkeiten eröffnen. Da diese Displays selbst die Lichtquelle darstellen, können zusätzliche Beleuchtungseinrichtungen eingespart werden.

Es lassen sich so kompaktere Systeme mit einem deutlich niedrigeren Energieverbrauch realisieren. Darüber hinaus sind OLED-Displays in großen Stückzahlen kostengünstig herzustellen und liefern kontrastreichere Bilder als Flüssigkristalldisplays.

OLED-Mikrodisplays

Die Basis der OLED-Displays bildet eine Licht emittierende Diode (LED) aus organischen Verbindungen (OLED = Organic Light Emitting Diode). Der Mechanismus der Lichtentstehung in einer OLED ist analog der Lichterzeugung in einer Halbleiter-LED. In einer organischen Schicht rekombinieren angeregte Elektron-Loch-Paare unter Aussendung von Photonen /2/. Die Wellenlänge des ausgesendeten Lichtes hängt dabei von der Bandlücke des jeweiligen Materials ab. OLED-Displays setzen sich aus einer Matrix von integrierten organischen Leuchtdioden zusammen. Jedes Pixel stellt eine Lichtquelle dar, die je nach Schaltzustand verschiedene Helligkeitsstufen annehmen kann. Durch Kombination von OLEDs verschiedener Farben sind auch Farbdisplays realisierbar. Im Unterschied zu Flüssigkristalltechnologien sind dunkle Pixel auf einem OLED-Display absolut dunkel und werden nicht dadurch erreicht, dass Licht einer Hintergrundbeleuchtung durch polarisierende Elemente blockiert wird. Damit sind deutlich höhere Kontrastverhältnisse als bei LCD- und LCOS-Displays erreichbar.

Application of OLED microdisplays in visual stimulation systems and in metrology

Introduction

In visual stimulation systems and in projection systems, microdisplays are widely used for displaying information. In the case of multimedia projection systems the projected image is usually viewed by the audience, while in metrology cameras capture patterns projected onto the objects to be measured. In medical stimulation systems, e.g. for functional brain diagnostics, the microdisplay is mostly viewed by the patient directly. The predominantly used technologies include transmissive (LCD) or reflective (LCOS) liquid crystal displays or micro mirror-arrays (DMD) /1/. The feature which all these display types have in common is that they do not emit light themselves, but modulate the incident light. When using such displays, an illumination unit is always necessary for making the information on the display visible. The illumination unit can be very space-consuming and can be even larger than the projection lens. In general, an overall miniaturization of such systems is aimed at, however the extent to which the size can be reduced is primarily constrained by the size of the illumination unit.

Visual stimulation systems are, usually, placed near to the eye, therefore compact systems are also preferred in this case. Luminous OLED microdisplays can provide new options in both cases. Since these displays actually are light sources themselves, additional illumination set-ups are redundant and can be omitted. This way more compact systems with less power consumption can be realized. Above all, OLED displays can be produced very cost-efficiently in large quantities and provide a better contrast than liquid crystal displays.

OLED microdisplays

Light emitting diodes made of organic materials provide the basis for OLED displays (OLED = organic light emitting diode). The principle of OLED light generation is analogous to that of anorganic semiconductor LEDs. In an organic layer, pairs of electrons and holes recombine emitting photons /2/. The wavelength of the emitted light is thereby dependent on the band gap of the respective material. OLED displays are composed of an array of integrated organic light emitting diodes. Each

pixel is a light source of its own, able to adopt a different level of brightness. By combining OLEDs of different colors, color displays can also be realized. In contrast to liquid crystal technologies, dark pixels on an OLED display are truly dark and are not achieved by polarizing elements suppressing light from a background source. Therefore with OLEDs significantly higher contrast ratios are possible than with LCD or LCOS displays.

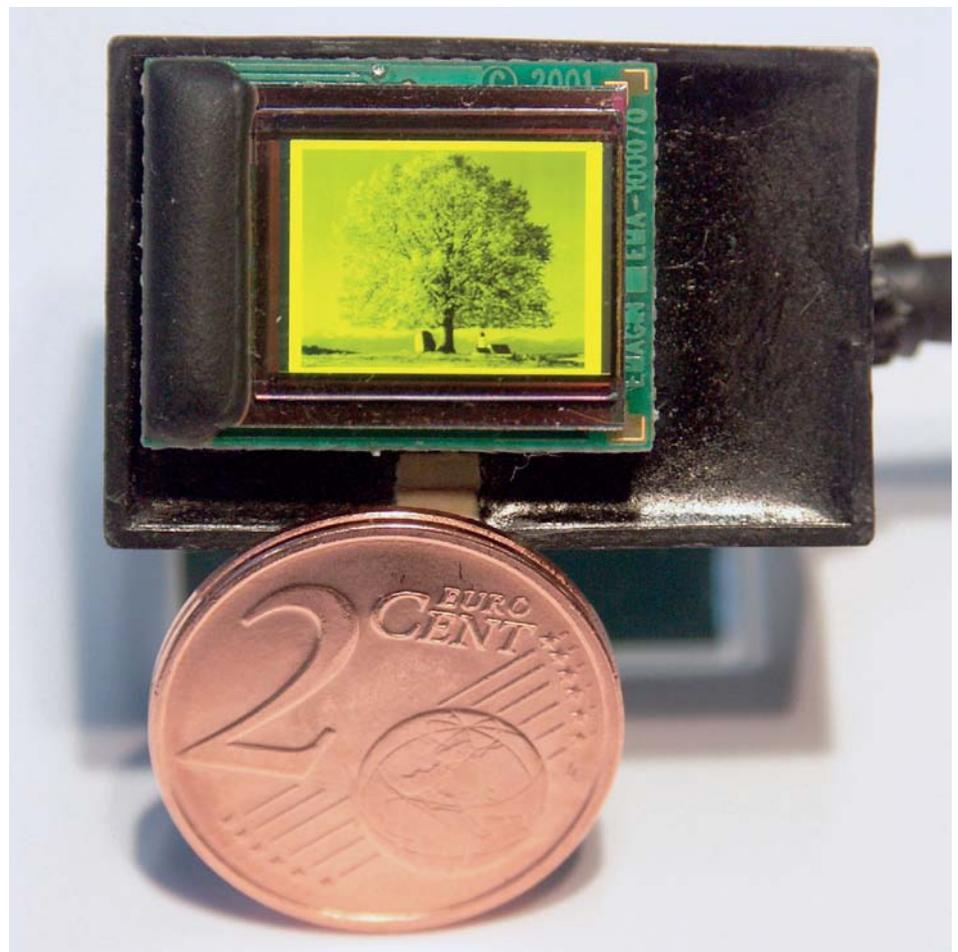


Abb. 1:
OLED-Mikrodisplay.

Fig. 1:
OLED microdisplay.

Anwendung von OLED-Mikrodisplays in visuellen Stimulationssystemen

Ihre häufigste Anwendung finden OLED-Mikrodisplays im Bereich der Head-Mounted-Displays (HMD), also in Systemen, die am Kopf getragen werden. Der Nutzer sieht dabei die Informationen auf dem OLED-Display entweder ausschließlich oder zusätzlich zu den Informationen aus seiner Umgebung (eingespiegelte Inhalte). Betrachtet wird das Display über ein Okular, das dem Auge eine entspannte Betrachtung ermöglicht und das Display vergrößert darstellt.

Besondere Anforderungen an Head-Mounted-Displays stellen Anwendungen in der Medizin, speziell in der Neurologie. HMDs werden hier eingesetzt, um dem Patienten visuelle Reize darzubieten und dadurch ausgelöste Veränderungen der Hirnaktivität zu beobachten. Gemessen werden die Hirnaktivitäten mittels der Magnetresonanztomographie (MRT). Dabei werden sehr starke Magnetfelder erzeugt und sehr geringe Änderungen dieser Felder registriert. Ein HMD, das in einem solchen Tomographen eingesetzt wird, darf daher zum einen nicht durch starke Magnetfelder beeinflusst werden und zum anderen seinerseits nicht das Magnetfeld beeinflussen.

Der Entwurf eines solchen Stimulationssystems muss sicherstellen, dass die elektronischen Komponenten ausreichend abgeschirmt sind und keinerlei ferromagnetische Stoffe zum Einsatz kommen. Andernfalls können die im Tomographen auftretenden starken Magnetfelder die Funktion des Systems stören, und umgekehrt kann das System durch seine magnetischen Eigenschaften die Messung unbrauchbar machen.

Zusätzlich sind die engen Platzverhältnisse innerhalb der Tomographenröhre zu berücksichtigen, die ein sehr kompaktes System erfordern. In Zusammenarbeit mit der norwegischen Firma NordicNeuroLab /3/ wurde am IOF die Optik für ein solches System entwickelt. Das Stimulationssystem besteht aus je einer Einheit für das linke und rechte Auge und ähnelt entfernt einem Fernglas (siehe Abb. 2). Die zu untersuchende Person liegt im Tomographen und betrachtet durch die Okulare die Informationen auf den Mikrodisplays. Zum Einsatz kommen Farbdisplays mit einer Leuchtdichte von etwa 70 cd/m^2 . Die Verwendung von zwei separaten optischen Kanälen erlaubt dabei die Darstellung stereoskopischer Bilder. Neben der Funktion als Okular erlaubt das entwickelte System gleichzeitig die Verfolgung der Augenposition des Betrachters. Über einen Strahlteiler, der zwischen OLED-Mikrodisplay und Okular angeordnet ist, wird das Auge von einer weiteren Optik durch das Okular hindurch beobachtet und auf eine Kamera abgebildet. Damit lässt sich auswerten, auf welchen Teil des Bildes der Proband gerade schaut. Auch eine Nachführung von Bildinhalten, die vom Auge fixiert bleiben sollen, lässt sich auf diese Weise realisieren. Die zur

Beobachtung des Auges notwendige Beleuchtung erfolgt im nahen Infrarotbereich, so dass der Proband nicht geblendet wird.

Anwendung von OLED-Mikrodisplays in der Messtechnik

Neben der Verwendung in Systemen, bei denen das Display direkt betrachtet wird, eröffnet die Entwicklung von OLED-Displays mit hoher Leuchtdichte neue Anwendungsmöglichkeiten. In der optischen Messtechnik – insbesondere bei der Vermessung von Objekten mittels Streifenprojektion – wird auf das zu vermessende Objekt eine Maßverkörperung projiziert und von Kameras aufgenommen. Zum Einsatz kommen dabei meist Projektoren auf LCOS- oder DMD-Basis. Industrielle Anwendungen im Bereich der Oberflächen- und Formvermessung stellen besondere Anforderungen an ein Projektionssystem: Der Abstand vom Messsystem zum Messobjekt soll so klein wie möglich sein und das Objektiv muss nahezu verzeichnungsfrei abbilden. Für kleine Messfelder von wenigen Zentimetern Durchmesser lassen sich DMD- oder LCOS-Projektoren allerdings nicht beliebig verkleinern.



Abb. 2: Visuelles Stimulationssystem für die Funktionsdiagnostik (Bild: NordicNeuroLab).

Fig. 2: Visual stimulation system for functional diagnostics (image: NordicNeuroLab).

Application of OLED microdisplays in visual stimulation systems

The most common applications of OLED microdisplays are head-mounted displays (HMD). The user sees the information on the OLED display either exclusively or in addition to the information from the environment. The display is viewed through an eyepiece, which provides convenient viewing and a magnification of the display.

Special requirements for head-mounted displays arise from medical applications, especially in neurology. HMDs are used in this field for presenting visual stimulations to the test person while neural activity is simultaneously monitored. The neural activities are measured using nuclear magnetic resonance tomography (NMR). This method involves very strong magnetic fields while measuring very small changes of these fields. An HMD being used in such a tomograph must not be influenced by the magnetic fields and must not itself influence the magnetic fields. The design of such a stimulation system must ensure, that the electronic components are shielded sufficiently and that no ferro-magnetic materials

are used. Otherwise the strong magnetic fields inside the tomograph can disturb the function of the system and the magnetic properties of the system can render the measurements unusable. Additionally the limited space inside the tube of the tomograph must be taken into consideration, requiring a very compact system.

In co-operation with the Norwegian company NordicNeuroLab /3/ the optics for such a system was developed at the IOF. The stimulation system consists of one unit for each eye and looks similar to binoculars (see Fig. 2). The test person lies in the tomograph and views the information on the microdisplays through the eyepieces. Color displays with a luminance of about 70 cd/m^2 are utilized. The use of two independent optical channels allows the display of stereoscopic images. Besides its function as an eyepiece, the developed system permits a simultaneous tracking of the position of the eye. The eye of the test person is observed through the eyepiece and a beam splitter placed between the display and the eyepiece. The eye tracking optics then images the eye onto a camera. Thus, which part of the image the test person is looking at can be analyzed. In this way it is also

possible to fix the image segments perceived by the eye through adjusting the image position. The illumination needed for observing the eye is done in the near infrared, in order that the test person is not dazzled.

Application of OLED microdisplays in metrology

Besides utilization in systems in which the microdisplay is viewed directly, the development of OLED displays with a high luminance opens new fields of application. In optical metrology – especially in the measurement of objects using fringe projection – a pattern is projected onto the object and captured by cameras. For this purpose mostly LCOS or DMD based projectors are used. Industrial applications in the field of surface and shape measurement impose special demands on a projection system: the distance between the measuring system and the object to be measured should be as short as possible and the projection lens needs to be almost free of distortion. For small fields of a few centimeters in diameter, DMD or LCOS based projection systems can not be arbitrarily scaled down.

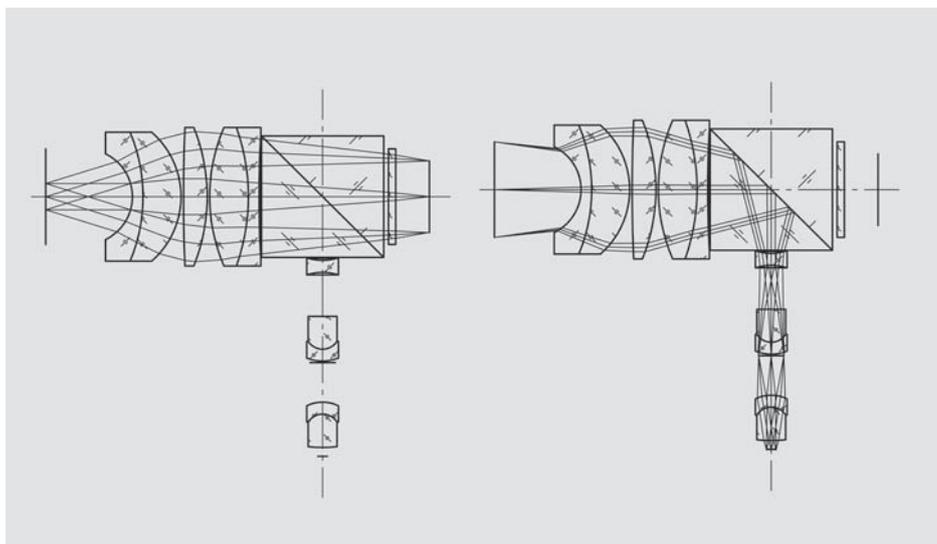


Abb. 3:
Strahlengang im Stimulationssystem –
links: Betrachtung des Displays,
rechts: Erfassung der Augenposition.

Fig. 3:
Beam paths of the visual stimulation system –
left: viewing the display,
right: eye tracking.

Die bei diesen Projektoren notwendige Beleuchtungsbaugruppe steht dabei einer Miniaturisierung im Wege. Einen Ausweg bieten hier OLED-Displays mit hoher Leuchtdichte. Da die Displays selbst die Lichtquelle sind, kann auf eine zusätzliche Beleuchtungsbaugruppe verzichtet werden. Gleichzeitig ist bei der vorhandenen hohen Leuchtdichte des Displays und den kleinen Abmessungen der Messanordnung eine ausreichende Helligkeit im Messfeld gegeben. Verwendet man ein monochromes OLED-Display, ist es darüber hinaus nicht erforderlich, das Projektionsobjektiv chromatisch zu korrigieren.

Im Rahmen eines Forschungsprojektes wurden zwei Messsysteme auf der Basis ultraheller OLED-Mikrodisplays entwickelt /4/, /5/, /6/. Verwendet wurde ein monochrom gelb leuchtendes Display der Firma eMagin /5/. Dieses Display liefert eine Leuchtdichte von bis zu 4000 cd/m² statt der sonst üblichen 50–150 cd/m². Die Auflösung beträgt 852 x 600 Pixel. Eines der realisierten Messsysteme wurde für industrielle Messaufgaben entworfen und kann direkt im Produktionsprozess Anwendung finden. Es besteht aus

einem Projektor auf OLED-Basis und einer hochauflösenden CMOS-Kamera. Für beide Komponenten wurden eigens auf den Anwendungsfall zugeschnittene, weitestgehend zeichnungsfreie Objektive entwickelt und gefertigt. Das 13,5 x 11 x 4,8 cm³ große System ist in Abb. 4 dargestellt. Zu sehen sind die Kamera auf der linken und der OLED-Projektor auf der rechten Seite. Das System erfasst ein Messfeld von 12 x 9 mm² mit einer Genauigkeit von 2 µm und einer Messzeit von etwa zwei Sekunden. Abb. 5 zeigt Beispiele von Objekten, die mit diesem System vermessen wurden.

Ein weiteres System wurde in ein Stereomikroskop integriert um Oberflächenstrukturen optisch zu vermessen. Dabei tritt das OLED-Display an die Stelle des Zwischenbildes in einem der Kanäle, dessen Lichtrichtung dadurch umgekehrt wird. Das Bild des Displays entsteht auf dem Messobjekt in der Einstellebene des Mikroskops. Eine Kamera im anderen Kanal des Mikroskops nimmt das Bild der Objektebene mit Messobjekt und projizierten Streifen auf. Der Winkel, den beide Kanäle im Objektraum einschließen, entspricht

dem Triangulationswinkel des Messsystems. Das Mikroskop mit montiertem OLED-Mikrodisplay sowie das Funktionsprinzip sind in Abb. 6 dargestellt. Die Baugruppe mit dem OLED-Display ist so ausgeführt, dass sie einfach gegen eines der Okulare des Stereomikroskops ausgetauscht werden kann. Das Mikroskop kann so in kürzester Zeit in ein Oberflächenmesssystem verwandelt werden.

Literatur:

- /1/ Hornbeck, L. J.: "From cathode rays to digital micromirrors, A history of electronic projection display technology", TI Technical Journal Paper 15, pp.7–46, 1998.
- /2/ Vaeth, K. M.: "OLED-display technology", Information display 19 No. 6 (2003) 12–17.
- /3/ www.nordicneurolab.com.
- /4/ Notni, G.; Riehemann, S.; Kuehmstedt, P.; Heidler, L.; Wolf, N.: "OLED microdisplays – a new key element for fringe projection systems", Proc. SPIE 5532, pp. 170–177, 2004.
- /5/ Riehemann, S.; Palme, M.; Kühmstedt, P.; Notni, G.: "Miniaturized Projection Systems with OLED Microdisplays – Approaches for Industrial Measurements", SID 2005 Digest (ISSN/0005-0966X/05/3601-0547), pp. 547–549, 2005.
- /6/ Riehemann, S.; Palme, M.; Lippmann, U.; Wolf, N.; Notni, G.: "System concept and optical design of miniaturized projection and imaging systems with OLED microdisplays", Proc. SPIE 5962, pp. 59620X, 2005.
- /7/ www.emagin.com.

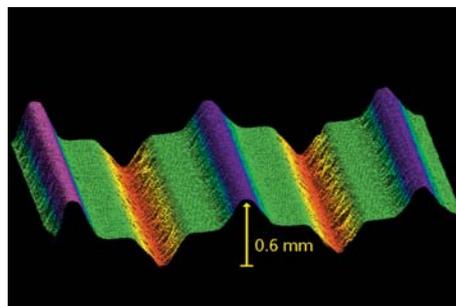


Abb. 4:
OLED-Messsystem.

Fig. 4:
OLED based measuring system.

Abb. 5:
Mit dem OLED-Messsystem gewonnene 3-D-Punktwolke.
links: eines Mikroprüfkörpers der PTB, rechts: eines Uhrwerks.
Gleiche Farben stellen hierbei gleiche Höhen dar.

Fig. 5:
3D point clouds obtained with the measuring system.
left: 3D calibration standard (PTB Braunschweig), right: clockwork.
Equal colors correspond to equal heights.



The illumination unit required for these types of projectors constrains the miniaturization of such systems. A possible solution is the utilization of OLED microdisplays with a high luminance. Since these displays are light sources themselves, there is no need for additional illumination units. The high luminance of the display and the small dimensions of the measurement setup provide sufficient brightness in the measurement field. Moreover, when using a monochrome OLED display, a chromatic correction of the projection lens is not necessary.

Within the scope of a research project, two measuring systems based on high luminance OLED microdisplays were developed /4/, /5/, /6/. In both cases a monochrome yellow display from the company eMagin /7/ was used. This display provides a luminance of up to 4000 cd/m² instead of the usual 50–150 cd/m² of other displays. The resolution is 852 x 600 pixels. One of the systems was developed for industrial measurement applications and can be directly integrated into the production line. It consists of an OLED based projector and a high resolution CMOS camera. For both components special, nearly distortionfree lenses adapted to the application were designed and manufactured. The dimensions of the whole system are 13.5 x 11 x 4.8 cm³. Figure 4 shows the system with the camera on the left and the OLED projector on the right side. The system captures a field of 12 x 9 mm² with an accuracy of 2 μm in about 2 seconds. Figure 5 shows examples of objects measured with this system.

Another system was integrated into a stereo microscope for measuring surface structures optically. The OLED display takes the place of the intermediate image in one channel of the microscope. The display is imaged onto the object in the focal plane of the microscope. A camera in the other channel captures the image of the object with the projected fringes. The angle between the two channels of the stereo microscope in object space is identical to the triangulation angle of the system. The microscope with the installed OLED microdisplay, as well as the functional principle is shown in Fig. 6. The unit containing the OLED display is implemented in such way that it can easily be swapped with one of the eyepieces of the stereo microscope. Thus the microscope can quickly be converted to a surface measuring system.

References:

- /1/ Hornbeck, L. J.: "From cathode rays to digital micromirrors, A history of electronic projection display technology", TI Technical Journal Paper 15, pp.7–46, 1998.
- /2/ Vaeth, K. M.: "OLED-display technology", Information display 19 No. 6 (2003) 12–17.
- /3/ www.nordicneurolab.com.
- /4/ Notni, G.; Riehemann, S.; Kuehmstedt, P.; Heidler, L.; Wolf, N.: "OLED microdisplays – a new key element for fringe projection systems", Proc. SPIE 5532, pp. 170–177, 2004.
- /5/ Riehemann, S.; Palme, M.; Kuehmstedt, P.; Notni, G.: "Miniaturized Projection Systems with OLED Microdisplays – Approaches for Industrial Measurements", SID 2005 Digest (ISSN/0005-0966X/05/3601-0547), pp. 547–549, 2005.
- /6/ Riehemann, S.; Lippmann, U.; Wolf, N.; Notni, G.: "System concept and optical design of miniaturized projection and imaging systems with OLED microdisplays", Proc. SPIE 5962, pp. 59620X, 2005.
- /7/ www.emagin.com.



Abb. 6a:
Stereomikroskop mit OLED-Projektionseinheit.

Fig. 6a:
Stereo microscope with OLED projection unit.

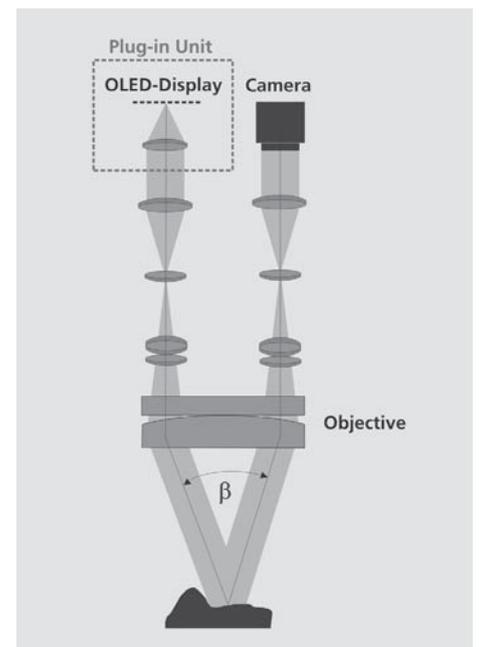


Abb. 6b:
Strahlengang im Stereomikroskop mit OLED-Projektionseinheit.

Fig. 6b:
Beam path in the stereo microscope with OLED projection unit.

Neue Ansätze für die Behandlung von Presbyopie mit Hilfe ultrakurzer Laserpulse



Stefan Nolte¹



Matthias Will¹



Thomas Peschel



Martin Palme



Stefan Riehemann



Gunther Notni

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

Presbyopie (Altersweitsichtigkeit) ist die meist altersbedingte Verringerung der Akkommodationsfähigkeit des Auges. Das Auge ist nicht mehr in der Lage sich auf unterschiedliche Sehentfernungen einzustellen. Betroffen davon sind praktisch alle Menschen ab einem Alter von ca. 40–60 Jahren. Momentan werden die Einschränkungen üblicherweise durch Sehhilfen wie Lesebrillen oder Brillen mit Gleitsichtgläsern gemildert, wodurch die Akkommodationsfähigkeit aber nicht verbessert wird.

Im Rahmen des vom BMBF geförderten Verbundprojektes »Schonendes Operieren mit innovativer Technik (SOMIT) – Kopfchirurgisches Zentrum (CoHS)« wird der Einsatz ultrakurzer Laserpulse im Femtosekundenbereich für eine gezielte Strukturierung der Augenlinse untersucht, um so die zunehmend eingeschränkte Flexibilität der Linse, die als Ursache für die Presbyopie angesehen wird, zumindest teilweise wieder aufzuheben. Durch gezielte Energiedeposition im Fokus der Laserstrahlung (Abb. 1) über Mehrphotonenabsorptionsprozesse ist dabei eine Behandlung ohne Öffnung des Auges möglich.

Diese Untersuchungen bauen auf den Erfahrungen des Einsatzes von ultrakurzen Laserpulsen für die hochpräzise Mikrostrukturierung verschiedenster Werkstoffe auf, was seit Mitte der 90er Jahre ein Forschungsschwerpunkt ist /1/. Gerade im medizinischen Bereich hat sich daraus ein großes Anwendungspotential, z. B. im Dentalbereich für die hochpräzise Fertigung von Implantaten oder auch die gezielte, schädigungsarme Entfernung kariöser Bereiche ergeben. Bereits eingesetzt werden ultrakurze Laserpulse in der Augenheilkunde für die refraktive Korrektur von Fehlsichtigkeiten (sog. LASIK).

Hier wird mit ultrakurzen Pulsen eine dünne Scheibe der Hornhaut abgeschnitten, um im darunter liegenden Gewebe gezielt abtragen und damit Fehlsichtigkeiten korrigieren zu können /2/.

Am Institut für Angewandte Physik erfolgen die experimentellen Untersuchungen zur schädigungsarmen fs-Laserchirurgie an der Augenlinse. (Abb. 2, Abb. 3). Es werden optimale Bearbeitungsparameter im Hinblick auf minimale Schädigung des Auges (Linse, Netzhaut) sowie auf maximale Akkommodationsfähigkeit bei gleichzeitig minimaler Sichtbehinderung eruiert. Begleitend erfolgen am Fraunhofer IOF Simulationen zu den optischen und mechanischen Auswirkungen auf die Leistungsfähigkeit des Auges (Abb. 4).

Literatur:

- /1/ Nolte, S.: "Micromachining", in *Ultrafast lasers: technology and applications*, Fermann, Galvanauskas, Sucha (Eds.), Decker, New York, p. 359–394 (2002), ISBN: 0-8247-0841-5.
- /2/ Dausinger, F.; Lichtner, F.; Lubatschowski, H. (Eds.): "Femtosecond Technology for Technical and Medical Applications", (Topics Appl. Phys. 96), Springer, Berlin (2004), ISBN: 3-540-20114-9.



Abb. 1: Weißlichtgenerierung im Fokusbereich der Ultrakurzpuls-Laserstrahlung verdeutlicht die gezielte Energiedeposition innerhalb eines Glasblocks.

Fig. 1: White light generation in the focal area of ultra short laser radiation shows the localized energy deposition inside the volume of a glass.

New approaches for presbyopia treatment with ultra-short laser pulses

Presbyopia is the age-related decrease in the accommodation capability of the human eye. This results in the eye being unable to focus at different distances. In principle all people aged about 40–60 years are affected by this. To date these restrictions are usually reduced with the help of spectacles, however, this does not improve the accommodation capability itself.

Within the project “Schonendes Operieren mit innovativer Technik (SOMIT) – Kopfchirurgisches Zentrum (CoHS)” founded by the BMBF, the use of laser pulses in the femtosecond range for a systematic structuring of the human lens is investigated. Specific structuring and slice cutting should help to improve the flexibility of the lens, which is considered to be the reason for presbyopia. Ultra-short laser pulses allow the precise deposition of the laser energy in the focal area by using multiphoton absorption processes (Fig. 1). As a result we have the potential for a medical treatment without surgically opening the eye.

The investigations are based on experience with the use of ultra-short laser pulses for high precision micromachining of different materials; a major field of research since the mid-nineties /1/. In medicine, particularly, there is a high potential for applications in fields like dentistry, where high precision implants are manufactured or caries are selectively removed. Currently, ultra-short laser pulses are used for the correction of long- or nearsightedness (LASIK). Here, the laser is used for cutting a thin slice off the cornea and ablating tissue behind it in order to correct the flaw /2/.

At the Institute of Applied Physics experimental investigations for eye lens structuring (Fig. 2, Fig. 3) are performed. Optimal parameters for minimal damage to the environment (lens, retina) and maximal accommodation capability with minimal sight restrictions are evaluated. Additional simulations of the optical and mechanical effects of the laser treatments are performed at the Fraunhofer IOF (Fig. 4).

References:

- /1/ Nolte, S.: “Micromachining”, in *Ultrafast lasers: technology and applications*, Fermann, Galvanauskas, Sucha (Eds.), Decker, New York, p. 359–394 (2002), ISBN: 0-8247-0841-5.
- /2/ Dausinger, F.; Lichtner, F.; Lubatschowski, H. (Eds.): “Femtosecond Technology for Technical and Medical Applications”, (Topics Appl. Phys. 96), Springer, Berlin (2004), ISBN: 3-540-20114-9.



Abb. 2: Für Bestrahlungsexperimente präparierte Augenlinse mit Ziliarmuskel.

Fig. 2: Dissected eye lens with ziliar muscle for irradiation experiments.

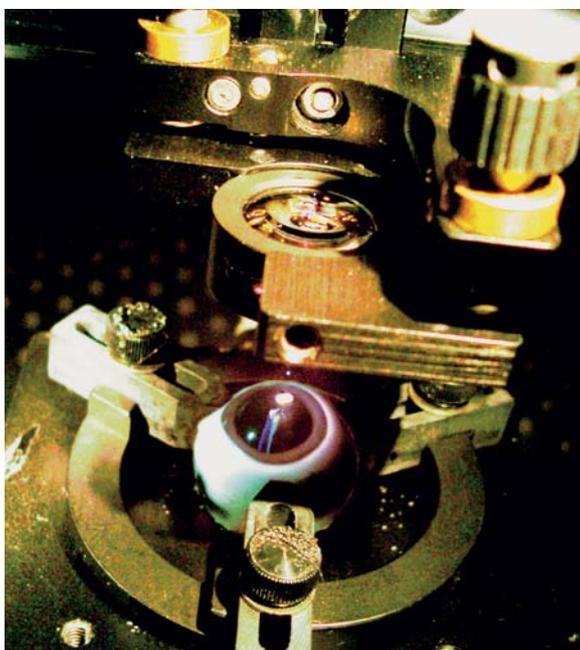


Abb. 3: Mikrostrukturierung eines Auges zur Fehlsichtigkeitskorrektur (Laborexperiment mit Schweineaugen).

Fig. 3: Microstructuring of an eye (lab-experiment with pig eyes).

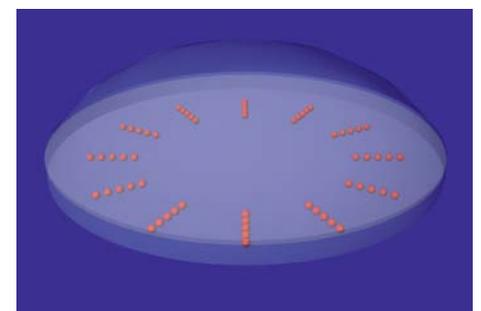


Abb. 4: Simulationsmodell einer menschlichen Augenlinse mit möglicher Presbyopie-Behandlung.

Fig. 4: Simulation model of potential presbyopia treatment of a human eye lens.

Optiken für ultrakurze Laserpulse – Analyse, Design und Herstellung



Ulrike Fuchs



Uwe Detlef Zeitner

Die außergewöhnlichen Eigenschaften ultrakurzer Laserpulse werden in verschiedensten Anwendungsgebieten, wie z. B. Mikromaterialbearbeitung, nichtlineare Mikroskopie und Spektroskopie, genutzt. Bei der Ausbreitung auftretende lineare und nichtlineare Wechselwirkungsprozesse zwischen Laserlicht und Materie sind dabei z. T. explizit gewünscht, erschweren jedoch auch die Strahlführung. Insbesondere ist die Propagation eines ultrakurzen Laserpulses durch ein optisches System unter Beibehaltung der Pulsparameter schwierig. Aus den Bedürfnissen der einzelnen Anwendungen sowie den charakteristischen Eigenschaften ultrakurzer Laserpulse ergeben sich neue Herausforderungen für das Design optischer Systeme. Von besonderem Interesse sind dabei Fokussierungsoptiken.

Mittels der Kombination von Methoden der geometrischer Optik (ray-tracing) und der Wellenoptik ist erstmals die numerische Berechnung der Propagation ultrakurzer Laserpulse durch beliebige reale optische Systeme möglich /1/. Die dabei gewonnenen Erkenntnisse über das Zusammenwirken von Aberrations-, Dispersions- und Beugungseffekten bei realen Optiken tragen wesentlich zum Verständnis der Vorgänge beim Fokussieren ultrakurzer Laserpulse bei. Zusätzlich zur Analyse der Fokussierung in Luft kann, unter Beschränkung auf lineare Materialeffekte, auch das Fokussierungsverhalten in transparenten Materialien untersucht und optimiert werden. Die numerische Umsetzung erfolgt unter Verwendung der Optikdesignsoftware ZEMAX für Berechnungen mittels geometrischer Optik und Virtual Optics Lab für die Berechnung der wellenoptischen Ausbreitung.

Aufgrund der Verwendung einer Optikdesignsoftware (ZEMAX) lassen sich zusätzlich zur Analyse der Systemeigenschaften diese auch optimieren und an die jeweilige Anwendung anpassen. Zum einen kann eine Verzerrung der Pulsfront aufgrund von Aberrationen kompensiert werden (Abb. 1). Zum anderen ist es möglich den Laserpuls gleichzeitig räumlich und zeitlich maßgeschneidert zu verformen. Hierfür bieten sich speziell diffraktive optische Elemente an, da sie sowohl verschiedene optische Funktionen gleichzeitig vereinen können, als auch aufgrund der geringen Substratdicke kaum zur Materialdispersion des optischen Systems beitragen. Des Weiteren lassen sie sich auf gekrümmten Oberflächen strukturieren, was zu einer Reduzierung der Anzahl der optischen Elemente im System beiträgt /2/.

In einem hybriden Ansatz wurde eine Asphäre diffraktiv bzgl. der chromatischen Aberrationen und der Fokussierungstiefe in Quarzglas korrigiert (Abb. 2). Durch die gewählte Kombination liegt die Materialdispersion bei der Hybridoptik deutlich unter der eines Mikroskopobjektivs. Dadurch wird die beim Mikroskop auftretende Pulsverlängerung fast vollständig vermieden.

Literatur:

- /1/ Fuchs, U.; Zeitner, U. D.; Tünnermann, A.: "Ultra-short pulse propagation in complex optical systems", Opt. Express 13 (2005) 3852–3861.
- /2/ Zeitner, U. D.; Dannberg, P.: "Double-sided hybrid microoptical elements combining functions of multistage optical systems", Proc. SPIE 4440 (2001) 44–50.

Optics for ultra-short laser pulses – analysis, design und fabrication

The extraordinary attributes of ultra-short laser pulses are utilized in various applications such as micromachining, nonlinear microscopy and spectroscopy. Linear and nonlinear interaction processes between light and material arising during the propagation, are partially desired but may also have disturbing effects on the laser pulse. It is especially difficult to maintain the parameters of an ultra-short laser pulse during propagation through an optical system. Requirements of individual applications as well as special characteristics of ultra-short laser pulses result in new challenges for optics design. Therefore, focusing optics are of special interest.

Based on a combination of ray-tracing and wave optical propagation methods, the simulation of ultra-short laser pulse propagation through arbitrary optical systems is feasible [1]. The insights gained into the influence of aberrations, dispersion and diffraction effects of real world optics contribute essentially to the understanding of the

processes occurring while focusing ultra-short laser pulses. In addition to the analysis of focusing in air, the focusing behavior in transparent material – limited to linear interaction processes – can be investigated and optimized. The numerical implementation is performed using the optics design software package ZEMAX for ray-tracing and Virtual Optics Lab for the computation of the wave optical propagation.

Because of the usage of ZEMAX the system parameters cannot only be analyzed but also optimized for an application as needed. On the one hand the distortion of the pulse front caused by aberrations can be compensated for (Fig. 1). On the other hand it is possible to shape the laser pulse spatially and temporally on demand. For this purpose diffractive optical elements (DOE) are of special interest because they can combine several optical functions at once and have negligible contribution to material dispersion of the optical system due to the low substrate thickness.

Furthermore, such elements can be structured upon curved surfaces, whereby the number of optical elements within a system is reduced [2].

With a hybrid approach an asphere has been corrected for chromatic aberrations and focused into fused silica using a DOE (Fig. 2). Due to the combination selected, the material dispersion of the hybrid optics is clearly below that one of a microscope objective. Therefore, the increase of the pulse duration occurring with the microscope objective can almost completely be avoided.

References:

- [1] Fuchs, U.; Zeitner, U. D.; Tünnermann, A.: "Ultra-short pulse propagation in complex optical systems", Opt. Express 13 (2005) 3852–3861.
- [2] Zeitner, U. D.; Dannberg, P.: "Double-sided hybrid microoptical elements combining functions of multistage optical systems", Proc. SPIE 4440 (2001) 44–50.

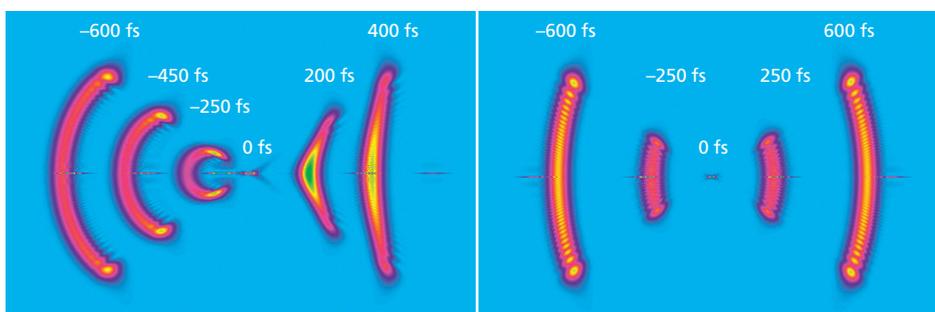


Abb. 1: Intensitätsverteilungen der Pulsfronten (Pulsdauer 50 fs) in der Fokusumgebung einer Asphäre (links) und eines hybriden Achromaten (rechts). Die bei der Asphäre auftretende Verformung der Pulsfront durch chromatische Aberrationen ist bei der Hybridoptik kompensiert.

Fig. 1: Intensity distributions of the pulse front (pulse duration 50 fs) in the vicinity of the focus of an asphere (left) and a hybrid achromatic doublet (right). The pulse front distortion appearing while focusing with the asphere is caused by chromatic aberrations, for which the hybrid optics compensates.

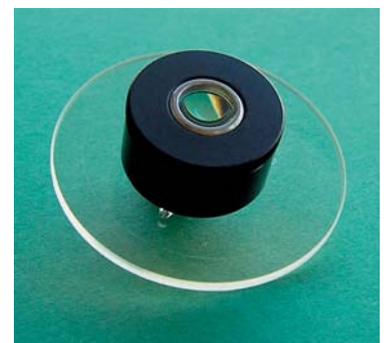


Abb. 2: Hybridoptik, bestehend aus einer Asphäre und einem diffraktiven optischen Element zur Fokussierung, in Quarzglas. Die runde Glasplatte trägt die diffraktive Struktur.

Fig. 2: Hybrid optics consisting of an asphere and a diffractive optical element for focusing into fused silica. The round glass substrate carries the diffractive structure.



Martin Bischoff



Olaf Stenzel



Dieter Gäbler



Norbert Kaiser

In einem Laserresonator ist der Einsatz dispersiver, also pulsverbreiternder Komponenten (z. B. Laserkristall) nicht zu vermeiden, sodass sich der Bedarf an zusätzlichen, dispersionskompensierenden Elementen ergibt. Neben den üblichen Verfahren, basierend auf Prismen- oder Gitterpaaren, haben sich vor allem dielektrische Vielschichtsysteme mit dispersiven Eigenschaften, die sogenannten gechirpten Spiegel /1/, durchgesetzt. Sie zeichnen sich dadurch aus, dass sie in einem breiten spektralen Bereich hochreflektierend sind und – je nach Design – unterschiedliche Materialdispersionen kompensieren können.

Die mit gechirpten Spiegeln kompensierbaren Dispersionen sind zwar im Vergleich zu Gitter- oder Prismenkompressoren gering, jedoch sind die Spiegel aufgrund ihrer Schichtstruktur nahezu verlustfrei und die Dispersionswerte lassen sich prinzipiell beliebig einstellen. Daher sind gechirpte Spiegel für die Erzeugung von ultrakurzen Pulsen im Bereich unter 10 fs als Dispersionskompensationselemente nicht mehr wegzudenken. Auch in Lasersystemen mit längerer Pulsdauer werden diese Spiegel eingesetzt, sodass in Kombination mit Prismenpaaren die Dispersionswerte zweiter, dritter und auch höherer Ordnung kompensiert werden können.

Analog zu konventionellen Bragg-Spiegeln bestehen gechirpte Spiegel aus alternierenden Paaren hoch- und niedrigbrechender dielektrischer Schichtmaterialien, jedoch liegt die Besonderheit dieser Systeme darin, dass langwellige Lichtanteile tiefer in den Schichtstapel eindringen können als kurzwellige /2/. Ein Spiegel mit dieser wellenlängenabhängigen Eindringtiefe (Abb. 1) erzeugt somit negative Dispersion.

Die Herstellung der Spiegel erfolgte mittels plasma-ionengestützter Elektronenstrahlverdampfung. Im Vergleich zur Sputter-Technik kann die dort typische hohe Präzision der Schichtdicken nicht erreicht werden und somit scheint es kaum möglich zu sein, extrem breitbandige Spiegel-Designs zu realisieren. Jedoch können die hergestellten Spiegel bei der Erzeugung von Laserpulsen mit einer Dauer von 20 fs bis 30 fs eingesetzt werden. Ein wesentlicher Vorteil der gedampften Schichtsysteme ist die mechanische Stabilität der Schichten aufgrund ihrer geringen Schichtspannung, die wiederum bei gesputterten Schichtsystemen sehr hoch ist.

Literatur:

- /1/ Szipöcs, R.; Ferencz, K.; Spielmann, C.; Krausz, F.: "Chirped multilayer coatings for broadband dispersion control in femtosecond lasers", *Opt. Lett.* 19, (1994) 201–203.
- /2/ Bischoff, M.; Stenzel, O.; Gäbler, D.; Kaiser, N.: "Properties of chirped mirrors manufactured by plasma ion assisted electron beam evaporation", *SPIE* 5963 (in print).

The use of dispersive, that is pulse broadening, elements in a laser cavity is usually unavoidable (e.g. laser crystal) and consequently additional components for dispersion compensation are required. Besides the common methods based on prism or grating pairs, multilayer coatings with special dispersive characteristics, the so called chirped mirrors /1/ are widely used. They are distinguished by their broad, high reflectivity range and can be designed to compensate any material dispersion.

Indeed, the dispersion values realized by chirped mirrors are less than those from prism- or grating-pairs, moreover, because of their dielectric layer structure, chirped mirrors are almost loss-free. Therefore, the main application for chirped mirrors is the generation of sub-10-fs pulses.

Furthermore, laser systems with longer pulse duration use this mirror technique so that when combined with prism pairs, dispersion can be compensated at the second, third, and higher orders.

Analogous to dielectric Bragg mirrors, chirped mirrors consist of alternating pairs of low-index and high-index layer materials. The layer structure for chirped mirrors is chosen in such a way that the penetration depth of the light becomes wavelength dependent (Fig. 1). Negative dispersion is generated because of the deeper penetration depth for red than for blue components /2/.

The fabrication of the mirrors was done by the Advanced Plasma Source (APS) evaporation technique. There, an electron beam evaporates the material, which is deposited on the substrates with instantaneous plasma assistance.

The high precision of the layer thickness as achieved by sputter techniques is not achievable by means of e-beam evaporation and consequently it seems impractical to fabricate broadband layer designs. However, the fabricated chirped mirrors could be used for the generation of laser pulses of 20 fs to 30 fs duration. An essential advantage of the evaporated layer designs is their mechanical stability due to the low stress of the coating, which is much higher for sputtered designs.

References:

- /1/ Szipöcs, R.; Ferencz, K.; Spielmann, C.; Krausz, F.: "Chirped multilayer coatings for broadband dispersion control in femtosecond lasers", *Opt. Lett.* 19, (1994) 201–203.
- /2/ Bischoff, M.; Stenzel, O.; Gäbler, D.; Kaiser, N.: "Properties of chirped mirrors manufactured by plasma ion assisted electron beam evaporation", *SPIE 5963* (in print).

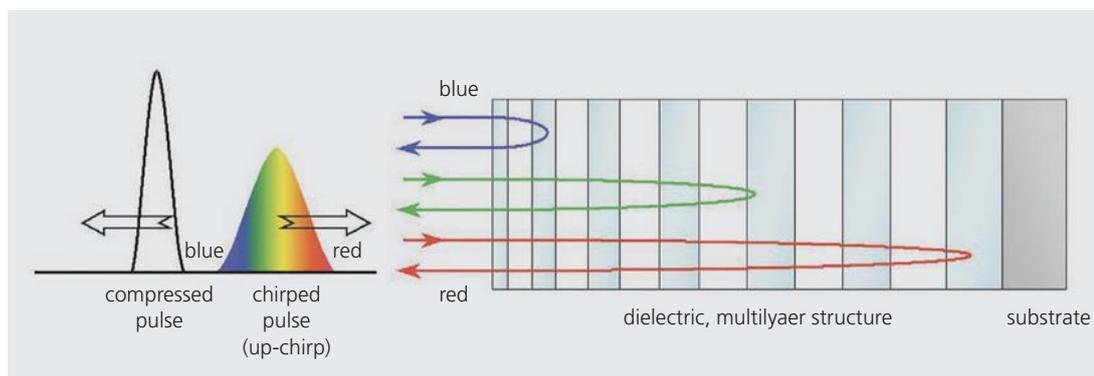


Abb. 1:
Schematischer Aufbau eines gechirpten Spiegels:
Ein spezielles Schichtsystem aus abwechselnd hoch- und niedrigbrechenden Materialien sorgt für unterschiedlich tiefes Eindringen der Spektralanteile eines Laserpulses, sodass ein einlaufender, positiv gechirpter Puls dadurch dispersionskompensiert wird und komprimiert wieder austritt.

Fig. 1:
Pattern of a chirped mirror.
A layer design with alternating high-index and low-index materials exhibits a wavelength dependent penetration depth of the particular spectral components of the laser pulse. An up-chirped pulse will be compressed after reflection on the chirped mirror.

Omnidirektionale Entspiegelungen auf Basis von Gradientenschichten



Robert Leitel



Jörg Petschulat



Olaf Stenzel



Norbert Kaiser

Entspiegelungsschichten gehören zu den am häufigsten verwendeten Oberflächenvergütungen im Bereich optischer Systeme, um die Intensität des transmittierten Lichts zu erhöhen und das Auftreten von Geisterbildern an inneren Grenzflächen zu vermeiden. Die reflexionsmindernde Wirkung konventioneller Schichtstapel ist vom Einfallswinkel des Lichts abhängig, so dass Schichtdesigns mit sehr geringer oder keiner Winkelabhängigkeit neue Anwendungsbereiche erschließen /1/. Es werden zwei Konzepte zur Realisierung verfolgt.

Zum einen werden mittels Niederdruckplasma-Ätzverfahren stochastisch verteilte Oberflächenstrukturen auf Kunststoff (PMMA) erzeugt, die in ihren lateralen Ausdehnungen deutlich kleiner sind als die Wellenlängen des sichtbaren Lichts. Diese so genannten Mottenaugen-Strukturen ähneln denen auf der Augenoberfläche nachtaktiver Insekten /2/ und können mit Hilfe eines kontinuierlichen Brechzahlgradienten beschrieben werden. Durch die stetige Abnahme der Brechzahl vom Substrat zum umgebenden Medium (Abb. 1) wird eine breitbandige Reflexionsminderung erreicht (Abb. 2), die selbst bei schrägem Lichteinfall sehr effizient ist. Die Anwendung des Prinzips auf Metalloberflächen führt zu hochwirksamen breitbandigen omnidirektionalen Absorbern /3/.

Das zweite Konzept basiert auf der Erzeugung von Brechzahlgradientenschichtsystemen durch Mischung von hoch- und niedrigbrechenden Festkörpermaterialien. Mittels gleichzeitiger Verdampfung zweier Materialien mit kontinuierlich veränderbaren Raten wird ein stetiger Brechzahlverlauf (Abb. 3) erzeugt. Diese Systeme weisen eine geringe spektrale Winkelabhängigkeit der Reflexion auf (Abb. 4) und erlauben die Ausnutzung gegenläufiger Brechzahlprofile /4/ durch die Erzeugung von Mischbrechzahlen, die zwischen den Brechzahlen der Reinmaterialien liegen. Die Kombination von klassischen homogenen Schichtstapeln und linearen Brechzahlgradienten berücksichtigt die Realisierungsmöglichkeiten moderner Beschichtungsanlagen.

Literatur:

- /1/ Poitras, D.; Dobrowolski, J. A.: "Toward perfect antireflection coatings: 2. Theory", *Appl. Opt.* 43 (2004) 1286.
- /2/ Wilson, S. J.; Hutley, M. C.: "The optical properties of moth eye antireflection surfaces", *Optica Acta* 29 (1982) 993.
- /3/ Leitel, R.; Kaless, A.; Petschulat, J.; Schulz, U.; Stenzel, O.; Kaiser, N.: "Optical properties of stochastic subwavelength surface structures", *SPIE Proc.* 5965 (2005) 511.
- /4/ Janicki, V.; Leitel, R.; Wilbrandt, S.; Stenzel, O.; Gäbler, D.; Kaiser, N.: "Design of hybrid coatings composed of homogeneous coatings and refractive index gradients", *SPIE Proc.* 5963 (2005) 397.

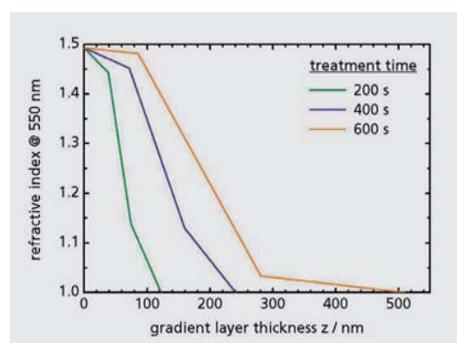


Abb. 1: Berechnetes Brechzahlprofil von Mottenaugen-Strukturen für verschiedene Plasma-Ätzeiten.

Fig. 1: Refractive index profile of moth's eye structures obtained from reverse engineering for varying plasma etching times.

Omnidirectional antireflective coatings based on graded-index films

Antireflective films are among the most frequently used coatings in the area of optical systems to improve the intensity of transmitted light and to prevent the appearance of ghost images due to multiple reflections at intrinsic surfaces. The elimination of reflection losses of conventional multilayer stacks depends on angle of incidence of illumination, so that coating designs with negligible or no angular dependency open up new areas of application /1/. Two different concepts are pursued.

On the one hand, stochastically distributed surface structures are fabricated on plastics (PMMA) with lateral dimensions that are noticeably smaller than the wavelength of the visible light. Those so-called moth's eye structures resemble the surface of the cornea of nocturnal moths /2/ and may be described by smooth refractive index gradients. Broadband antireflection (Fig. 2), efficient even at oblique incidence, is achieved by a continuous decrease of refractive index from substrate to ambient medium (Fig. 1). The application of this principle to metal surfaces leads to highly efficient broadband omnidirectional absorbers /3/.

The second idea is based on the generation of graded-index coatings by mixing high and low refractive index solid-state materials. A smooth refractive index gradient is achieved by coevaporation

of two materials with continuously changing rates (Fig. 3). Such coatings exhibit low spectral dependencies of reflection on angular variation (Fig. 4) and take advantage of gradients that profile in opposite directions /4/ generating intermixed refractive indices which have values between those of the pure materials. The combination of classical multilayer stacks and linear refractive index gradients (Fig. 3) allows for possibilities regarding the realization of modern deposition plants.

References:

- /1/ Poitras, D.; Dobrowolski, J. A.: "Toward perfect antireflection coatings: 2. Theory", Appl. Opt. 43 (2004)1286.
- /2/ Wilson, S. J.; Hutley, M. C.: "The optical properties of moth eye antireflection surfaces", Optica Acta 29 (1982) 993.
- /3/ Leitel, R.; Kaless, A.; Petschulat, J.; Schulz, U.; Stenzel, O.; Kaiser, N.: "Optical properties of stochastic subwavelength surface structures", SPIE Proc. 5965 (2005) 511.
- /4/ Janicki, V.; Leitel, R.; Wilbrandt, S.; Stenzel, O.; Gäbler, D.; Kaiser, N.: "Design of hybrid coatings composed of homogeneous coatings and refractive index gradients", SPIE Proc. 5963 (2005) 397.

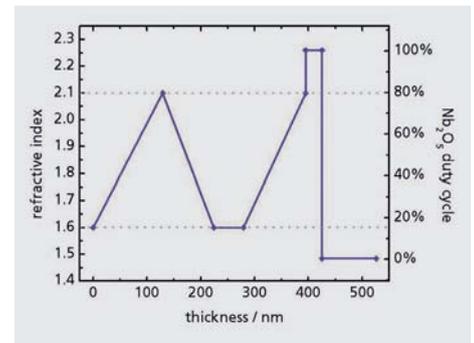


Abb. 3: Brechzahlprofil und Nb₂O₅-Füllfaktorverlauf eines hybriden Antireflexionssystems basierend auf SiO₂ und Nb₂O₅.

Fig. 3: Refractive index and Nb₂O₅ duty cycle profile of a hybrid antireflection coating composed of SiO₂ and Nb₂O₅.

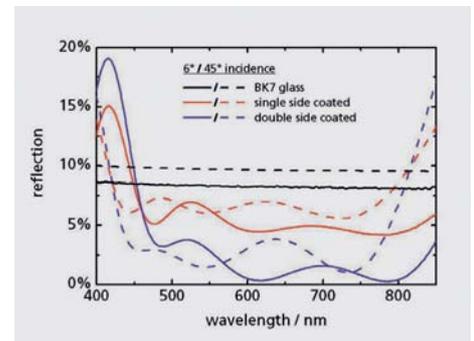


Abb. 4: Reflexionsspektren für senkrechten und schrägen Lichteinfall für einseitig und beidseitig beschichtetes BK7.

Fig. 4: Measured reflection spectra for normal and oblique incidence of single and double side coated BK7 glass.

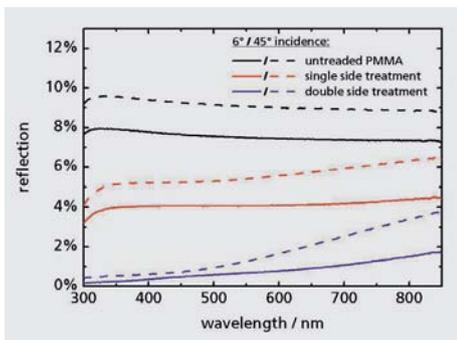


Abb. 2: Gemessene Reflexionsspektren für senkrechten und schrägen Lichteinfall für einseitig und beidseitig plasma-behandelte PMMA-Proben.

Fig. 2: Measured reflection spectra for normal and oblique incidence for single and double side plasma treated PMMA samples.

Transparenter Kratzschutz für Kunststoffoptik



Ulrike Schulz



Kerstin Lau



Norbert Kaiser

Transparente Kratzschuttschichten sind sowohl auf Kunststoff als auch auf Metall Schlüsselkomponenten zur Modifizierung der Eigenschaften der Substratoberfläche. Sie müssen neben der mechanischen Schutzfunktion dabei oft auch optische und dekorative Aufgaben erfüllen. In der Fraunhofer-Allianz Transparenter Kratzschutz bündeln die sechs Fraunhofer-Institute FEP, IFAM, IOF, ISC, IST und IWS ihr Know-how und ihre Kompetenzen auf dem Gebiet der Dünnschichttechnologien, um leistungsfähige transparente Kratzschuttschichten zu realisieren und in die Praxis zu transferieren. Neben der Weiterentwicklung bestehender Technologien verfolgt die Allianz ganz neue Ansätze auf der Basis von Nanokompositschichten. Gegenstand der Forschungen ist dabei auch die Integration zusätzlicher Schichtfunktionen.

Ein Arbeitsschwerpunkt am IOF Jena ist die Weiterentwicklung des optischen Interferenzschichtsystems AR-hard® für Kunststoffe und die Untersuchung seiner mechanischen Schutzfunktion für unterschiedliche Anwendungsbereiche. In diesem Zusammenhang wurden beschichtete Kunststoff-Optiken mittels

verschiedener Kratz- und Abriebfestigkeits-Prüfverfahren untersucht, z. B.: Ritztests (Scanning Scratch Test, Bleistift-Test) und Abriebfestigkeitsprüfgerät ABREX® sowie Radiergummitest.

Eine verbesserte Abrieb- und Kratzfestigkeit optischer Beschichtungen auf Polymersubstraten wird vor allem für Anwendungen im Bereich Brillengläser oder Displayabdeckungen und Armaturen im Automobil-Innenraum benötigt (Abb. 1).

Polymersubstrate weisen eine geringere mechanische Härte auf als die darauf abgeschiedenen dielektrischen Schichtmaterialien. Dies führt vor allem bei Prüfverfahren mit punktueller Beanspruchung der Oberfläche (z. B. Ritztests) zu einem spröden Bruch der Schichten, da sich das Substratmaterial infolge der Krafteinwirkung der Tastschpitze elastisch oder plastisch verformt. Bei geringen Schichtdicken wird das Schadensbild eher von der Härte des Kunststoffs bestimmt als von den Schichteigenschaften. Deshalb benötigt z. B. ein AR-hard®-System auf Polycarbonat eine Gesamtdicke von mehreren Mikrometern, um eine anwendungsreife Kratzfestigkeit zu gewährleisten.

Mit geringerem Auflagedruck, aber größeren Kontaktflächen simuliert man Reinigungsvorgänge, die optische Oberflächen in der Praxis bestehen müssen. Eine solche »Abriebfestigkeit« beschichteter Kunststoffe ist eher von Schichthärte und -dicke als von der Art des Kunststoffsubstrates abhängig. Bereits eine 1 µm dicke AR-hard®-Beschichtung reicht aus, um auf Polycarbonat die Simulationstests für die Abriebfestigkeit, z. B. durch das Prüfgerät ABREX®, zu bestehen (Abb. 2 und 3).

Abb. 1: Displayabdeckung aus PC für ein Autoradio der Firma Blaupunkt (oben: unbeschichtet, unten: entspiegelt mit AR-hard®), entwickelt innerhalb des vom BMBF geförderten Verbundprojektes FKZ 03N3118.



Fig. 1: Display of a car radio for the Blaupunkt company (above: pure surface, below: anti-reflective coating system AR-hard®) developed within a cooperative project supported by the German BMBF (FKZ 03N3118).

Transparent scratch-resistance for polymer optical components

Transparent scratch-resistant coatings are key elements for the modification of surface properties of polymers and metals. They have to fulfill optical and decorative requirements just as well their mechanical, protective function. In the Fraunhofer Alliance for Transparent Scratch-Resistance, the Fraunhofer Institutes FEP, IFAM, IOF, ISC, IST and IWS are cooperating in order to focus their collective expertise in thin film technology on the implementation of effective transparent scratch-resistant coatings and their transfer into industrial production.

In addition to the enhancement of modern thin film technology, this alliance is developing brand-new approaches on the basis of nano-composite coatings. One aim is to integrate additional functionalities into the coating systems, for example UV-protection or conductivity.

The Fraunhofer IOF Jena specializes in connecting the optical properties of an interference coating system, such as AR-hard® at polymer optical components, with the wear-resistance required in different practical applications. In this context several tests of wear- and abrasion-resistance have been conducted on coated polymer optical components, for instance scanning scratch tests or eraser tests. These optical coatings for enhanced wear-resistance at polymer substrates will, principally, be applicable in the fields of ophthalmic lenses, display coverings and interior fittings in cars (Fig. 1).

Polymer substrates, such as polycarbonate (PC), have considerably softer surfaces than the coating materials deposited onto them. This leads to the characteristic damage caused by point-loads, for instance as used in test procedures for scratch-tests. Under point-load pressure, the coating cracks into brittle fractures due to the elastic

or plastic deformation of the substrate material. For a low coating thickness, the damage features are determined by the hardness of the polymer substrate rather than by the coating properties. For instance in the case of the relatively soft polymer material Polycarbonate (PC), it is necessary to deposit a protective AR-hard® coating which is some microns thick in order to achieve the required scratch-resistance.

Cleaning procedures, such as those optical surfaces have to withstand in practical application, are simulated in testing methods by application of a reduced pressure across a larger contact area. The abrasion-resistance can be described as a function of the coating hardness and -thickness rather than by the properties of the polymer substrate. Optical components made of PC are well-protected by an AR-hard® coating of 1 micron (Fig. 2 and 3).



Abb. 2:
Praxisnaher Test der Abriebfestigkeit mit Prüfgerät ABREX®:
Ein Tuch wird mit definierter Auflagekraft über die Probenfläche bewegt.

Fig. 2:
Applied abrasion-resistance test procedure by ABREX® device:
grinding by standardized cloth.

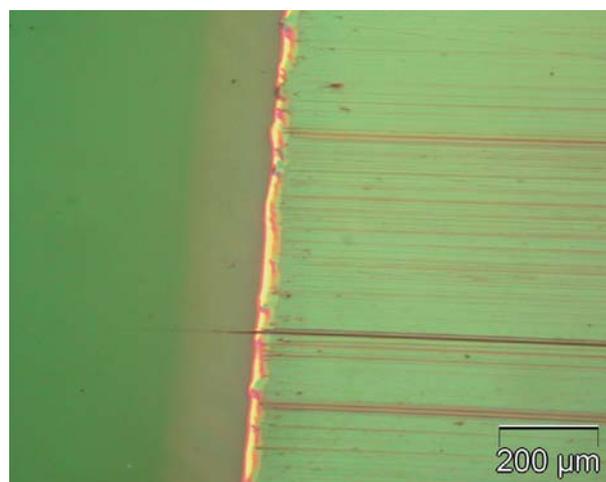


Abb. 3:
PC-Oberfläche mit und ohne Kratzschuttschicht (1 µm AR-hard®)
nach Ausführung von 500 Hüben mit Normgewebe, Kraft 10 N,
Prüfgerät ABREX®.

Fig. 3:
Polycarbonate surface with and without scratch-resistant coating
of 1 micron AR-hard® after application of 500 swings of a normal
force of 10 N by standardized cloth with ABREX® testing device.

Streulicht-Messverfahren für Gitter und diamantgedrehte Oberflächen



Stefan Gliech



Ronny Wendt



Angela Duparré

Die rasanten Entwicklungen in der Mikro- und Nanotechnologie stellen neuartige Herausforderungen an die Oberflächen-Messtechnik. Dies gilt besonders auch für eine sensitive, effiziente und vor allem funktionsrelevante Bewertung von Oberflächen mit anisotropen Mikro- und Nanostrukturen. Das können gewollte Strukturen sein, wie z. B. bei Gittern. Im anderen Fall entstehen bei der Ultrapräzisions (UP)-Bearbeitung von Oberflächen z. B. durch Diamantdrehen ungewollte Struktureffekte als Abweichung von der beabsichtigten superglatten Fläche. Mit den am Fraunhofer IOF entwickelten Streulichttechniken /1/, /2/ wurden Verfahren zur Messung anisotroper Strukturen realisiert, die diesen Forderungen entsprechen.

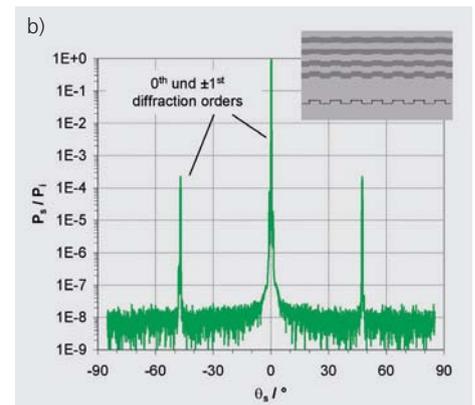
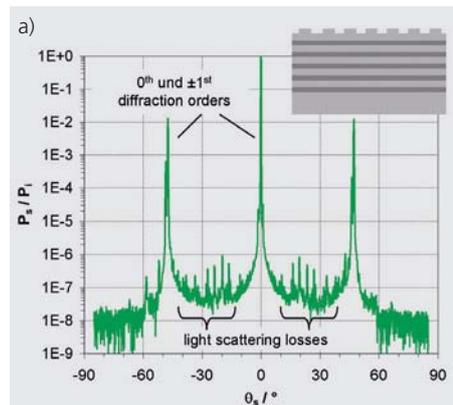
Abbildung 1 zeigt beispielhaft das Ergebnis für die Optimierung eines verlustarmen Hochleistungsgitters für die Gravitationswellen-Astronomie bei 1064 nm /3/. Der notwendige Dynamikbereich der Messung lag bei acht Größenordnungen, die erforderliche Winkelauflösung bei 0,01°.

Profilometrische Messungen an UP-bearbeiteten optischen Funktionsflächen liefern Informationen über Rauheiten zunächst ohne Bezug zu deren Wirkung (Abb. 2). Das streulichtbasierte Verfahren des Fraunhofer IOF ermöglicht dagegen die Bestimmung von Rauheitsanteilen direkt entsprechend ihres Einflusses. Beispielhaft offenbaren winkelaufgelöste Streulichtmessungen an einer diamantgedrehten Nickeloberfläche /4/ in Abb. 3, dass die deutliche Rillenstruktur nicht automatisch die dominierende Rauheit bedeutet, sondern sowohl »Jitter« (Rattermarken) als auch isotrope Grundrauheit in Betracht zu ziehen sind. Darüber hinaus verdeutlicht eine flächenhafte totale Streulichtmessung die radiale Inhomogenität der Strukturen (Abb. 4).

Auf diese Weise können dann in Zusammenhang mit der jeweiligen optischen Spezifikation »Rangfolgen« für die Optimierung des Herstellungsprozesses definiert und die Rauheitsbeiträge gezielt reduziert werden.

Abb. 1:
Winkelaufgelöste Streulichtmessung an Gitterstrukturen (strukturierte Schichtsysteme als Cavity-Koppler für die Gravitationswellen-Astronomie bei 1064 nm).
a) vor der Optimierung, b) danach.

Fig. 1:
Angle resolved scatter measurement of grating structures (structured thin film systems for cavity copplers for gravitational wave astronomy at 1064 nm).
a) prior to optimization, b) afterwards.



Scatter measurement techniques for gratings and diamond turned surfaces

The tremendous development of micro- and nanotechnologies has resulted in novel challenges for surface measurement techniques. This holds in particular for a sensitive, efficient and functional assessment of surfaces with anisotropic micro- and nanostructures. Such structures can be deliberately produced, e. g. for gratings. In the opposite case, e. g. in ultraprecision surface finish processes like diamond turning, undesirable structures occur as deviations from the intended supersmooth surface. With the scatter techniques developed at the Fraunhofer IOF in Jena /1/, /2/, the required measurements of anisotropic structures have become possible.

Figure 1 shows an example of optimization of low-loss high-performance gratings for use in gravitational wave astronomy at 1 064 nm /3/. For this type of measurement, a dynamic range of 8 orders of magnitude was necessary along with an angle resolution of 0.01°.

Profilometric measurements of ultra-precision optical surfaces provide roughness parameters without reference to their optical effect (Fig. 2). The scatter based method of the Fraunhofer IOF however enables the determination of roughness contributions directly according to their influence. Angle resolved scatter measurements of a diamond turned nickel surface /4/ reveal an interesting effect (Fig. 3): the obvious groove structure is not tantamount to dominating roughness; jitter as well as isotropic background roughness must also be taken into account. In addition, area scanning total scatter measurement illustrated the radial inhomogeneity of the surface structures (Fig. 4).

Based on such investigations and the optical specifications, "rank orders" for the optimization of the fabrication process can be defined and the roughness contributions can be deliberately reduced.

References:

- /1/ Glich, S.; Duparré, A.: "Light Scatter Technique for Application in Optics, Nanotechnology, and Engineering", VDI-Berichte Nr. 1844 (2004) 31–37.
- /2/ Duparré, A.: "Scattering from Surfaces and thin Films", Encyclopedia of Modern Optics, eds. R. D. Guenther et al. Elsevier, Oxford (2004) 314–321.
- /3/ Clausnitzer, T.; Kley, E.-B.; Tünnermann, A.; Bunkowski, A.; Burmeister, O.; Danzmann, K.; Schnabel, R.; Glich, S.; Duparré, A.: "Ultra low-loss low-efficiency diffraction gratings", Optics express 13 (2005) 4370–4378.
- /4/ Fabrication: A. Gebhardt, R. Steinkopf, Fraunhofer IOF Jena.

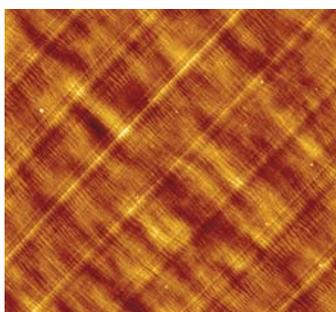


Abb. 2:
Oberflächenprofil einer diamantgedrehten Nickeloberfläche.
AFM-Messung, 10 x 10 μm²,
Höhenskala: 10 nm.

Fig. 2:
Surface profile of a diamond turned nickel surface.
AFM measurement, 10 x 10 μm²,
height scale: 10 nm.

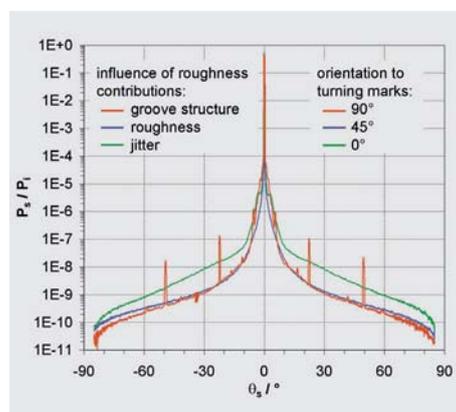


Abb. 3:
Winkelaufgelöste Streulichtmessungen (633 nm)
an der diamantgedrehten Nickeloberfläche
aus Abb. 2.

Fig. 3:
Angle resolved scatter measurements (633 nm) of
the diamond turned nickel surface of Fig. 2.

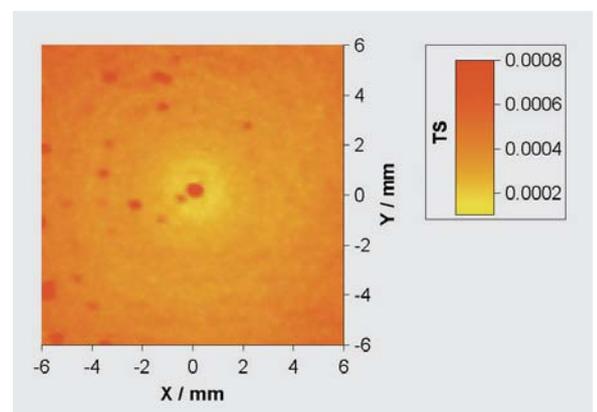


Abb. 4:
Totale Streulichtmessung (633 nm) an der diamantgedrehten
Nickeloberfläche aus Abb. 2.

Fig. 4:
Total scatter measurement (633 nm) of the diamond turned
nickel surface of Fig. 2.

3-D-Zahndigitalisierer »hiScanµ« – Die dritte Gerätegeneration



Peter Kühmstedt



Matthias Heinze



Gunther Notni



Josef Hintersehr¹



Peter Brakhage²



Christoph Munkelt



Michael Himmelreich



Roland Geller²

CAD Technologien sind ein Wachstumsmarkt in der Dentalbranche zur Herstellung von Zahnersatz. Voraussetzung für den Einsatz der CAD-Technologien sind digital vorliegende Daten der Gebissmodelle. Für die Gewinnung dieser Daten entwickelt das IOF die Scannertechnologie. Aufgrund der ständig steigenden Anforderungen und Wünsche bzgl. Messgenauigkeit, Handhabbarkeit/Bedienbarkeit, Messzeit und Herstellungskosten wurde ein völlig neues Konzept erarbeitet. Dies mündete in der inzwischen dritten Generation von am IOF entwickelten Zahndigitalisierern, dem »hiScanµ« (Abb. 1). Das dentale Know-how und den Auftrag hierfür gab die Hint-ELs GmbH Griesheim, wie auch schon für die Geräte der ersten und zweiten Generation. Unter Mitarbeit der Firmen IVB GmbH Jena/Hint-ELs GmbH wurden am Fraunhofer IOF der neue Zahndigitalisierer »hiScanµ« entwickelt und Prototypen gefertigt.

Das Messprinzip beruht auch bei der neuen Systemtechnik auf Streifenlichtprojektion. Neu ist die Verwendung des Prinzips der flexiblen Phasogrammetrie /1/ zur kompletten Erfassung der Zahngeometrie. Es kommen insgesamt drei Kameras zum Einsatz. Durch die Selbstkalibrierung in Verbindung mit der Phasogrammetrie werden alle Teilergebnisse in einem globalen Koordinatensystem berechnet. Die Vollständigkeit bei der Erfassung schwer zugänglicher Oberflächenbereiche des Messobjektes (z. B. Unterschnitte und Inlaystrukturen) wurde durch eine Spiegelanordnung (siehe Abb. 2) wesentlich verbessert.

Durch die Anwendung neu entwickelter Verfahren zur Korrektur von Objektivverzeichnungen und neuer Kalibrierstrategien konnte eine neue Qualität bei der Messgenauigkeit, der Vollständigkeit der Oberflächenerfassung und einem benutzerfreundlichen Handling erzielt werden. Die Gesamtmesszeit für einen Gebissabdruck beträgt momentan zwischen drei und fünf Minuten. In Abb. 3 werden zwei Messbeispiele gezeigt.

Die Serienproduktion, die mit Unterstützung durch das Fraunhofer IOF von der Firma IVB umgesetzt wurde, hat im 4. Quartal 2005 mit der Auslieferung von 15 Geräten für den Export begonnen. Die exklusive Vermarktung der Geräte erfolgt durch die Hint-ELs GmbH. Neben der Anwendung im Dentalbereich ist das Gerät für die Vermessung kleiner Objekte bis zu einer Größe von Durchmesser 90 mm x Höhe 30 mm im technischen Bereich prädestiniert und bietet das Potential, in anderen Bereichen wie Qualitätssicherung und Rapid-Prototyping angewendet zu werden.

Literatur:

- /1/ Notni G.; Kühmstedt P.; Heinze M.; Himmelreich M.: »Phasogrammetrische Messsysteme und deren Anwendung zur Rundumvermessung«, Th. Luhmann (ed.): Photogrammetrie, Laserscanning, Optische 3D-Messtechnik (Beiträge der Oldenburger 3D-Tage 2003), Wichmann 2003, 21–32.

¹ Hint-ELs® GmbH Griesheim

² IVB GmbH Jena

3D dental digitizer "hiScanμ" – the third generation of devices

CAD Technologies are gaining more and more importance in the field of dental applications. At its most basic level, this technology is used to digitize models of teeth. The Fraunhofer IOF is developing the scanning technology for teeth digitization. Because of the continuously increasing demands and desires concerning measuring accuracy, handling, measuring time and costs with the device "hiScanμ" (see fig.1) a completely new concept was developed. The device "hiScanμ" is already the third generation of dental scanners. The dental know-how and request for this technology was given by Hint-ELs GmbH Griesheim, which is also the initiator of the first two generations of this device. In collaboration with the enterprises IVB GmbH and Hint-ELs GmbH the dental digitizer was developed and the first prototypes were produced at the IOF.

The measuring principle is based on fringe projection as before. However, the use of the principle of flexible phasogrammetrie /1/ enables the complete detection of dental geometry. There are three cameras used in all. All partial results are computed with a common co-ordinate system by using self calibration together with phasogrammetry. The complete detection of hidden surface areas (e. g. undercuts and inlay structures) was improved by the use of a special mirror arrangement (see fig. 2). Figure 3 shows two application examples.

By application of newly developed methods for distortion correction and new calibration strategies a new quality could be achieved concerning measuring accuracy, completeness, and handling. The complete measuring time for one dental impression is between three and five minutes. The serial production realised by IVB and supported by the IOF started in the fourth quarter of 2005 with the export of 15 devices.

The devices are sold exclusively by Hint-ELs GmbH. Besides the application in the dental field the device is ideal for measurements of small technical objects up to 90 mm in diameter and 30 mm in height. Of course, the system can be used in other application fields such as rapid prototyping and quality assurance.

References:

/1/ Notni G.; Kühmstedt P.; Heinze M.; Himmelreich M.: »Phasogrammetrische Messsysteme und deren Anwendung zur Rundumvermessung«, Th. Luhmann (ed.): Photogrammetrie, Laserscanning, Optische 3D-Messtechnik (Beiträge der Oldenburger 3D-Tage 2003), Wichmann 2003, 21–32.

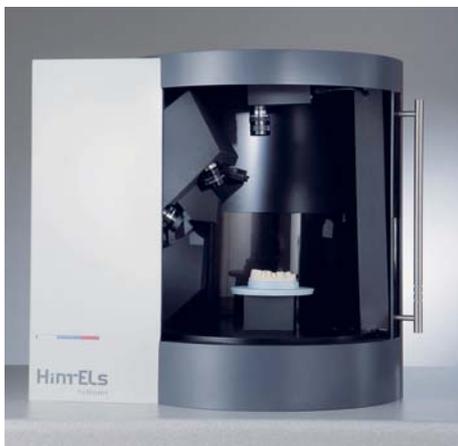


Abb. 1: 3-D-Zahndigitalisierer »hiScanμ«.

Fig. 1: 3D dental digitizer "hiScanμ".

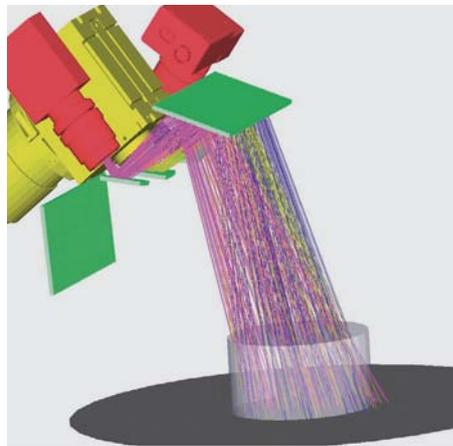


Abb. 2: Schematischer Aufbau »hiScanμ« mit Projektor und Kameras.

Fig. 2: Scheme of "hiScanμ" with projector und cameras.



Abb. 3: Inlay und Gesamtgebiss.

Fig. 3: Inlay and complete jaw.

FEM-Simulation des Laserstrahl­lötprozesses zum Fügen optischer Bauteile



Henrik Banse



Thomas Peschel



Christoph Schenk

Das Laserstrahl­löten von Optikauteilen wird als eine neue Fügetechnologie im Rahmen der Montage hybrider optischer Systeme eingesetzt, um hochwertige optische Systeme für hohe Anforderungen bezüglich der UV-Beständigkeit und Langzeitstabilität zu qualifizieren. Durch die thermo-mechanischen Bauteil- und Loteigenschaften können während des Lötprozesses für optische Materialien kritische Zugspannungen im Bereich der Füge­stelle entstehen. FEM-Simulationen werden unter diesem Aspekt zur Gestaltung und Optimierung des Lötprozesses verwendet.

Im Rahmen der auf dem Fügeprozess Laserstrahl­löten basierenden Montage einer miniaturisierten Spiegelbaugruppe aus Zerodur® wurde ein grundlegendes Simulationsmodell entwickelt (Abb. 1) /1/. Für die thermische Rechnung wurden folgende Annahmen getroffen:

- zylinderförmige Körper mit planaren, vollständig metallisierten Fügeflächen
- 2-D-Modell entsprechend der Axial­symmetrie der Körper (Abb. 2)
- eutektisches 80Au20Sn Lot, jeweils 3 µm dicke Schicht auf jedem Bauteil
- Laserstrahlung als stationäre Oberflächen­wärmequelle mit gaussförmiger Intensitätsverteilung /2/
- abgeschätzter Wärmeübergangswert für nicht verbundene Bereiche
- idealer thermischer Kontakt zwischen Lotschichten nach dem Aufschmelzen durch zusätzliche, zu aktivierende, 0,2 µm dicke Schicht
- Wärmetransport im Modell als reine Wärmeleitung
- adiabatische äußere Randbedingungen des Modells.

Für die Berechnung des Phasenüberganges (Schmelzen des Lotes) wird die Enthalpie zur Ermittlung der Wärmekapazität genutzt.

Abbildung 3 zeigt die Temperaturverteilung am Pulsende. Es wird ein lokal eng begrenzter Bereich erwärmt. Die Maximaltemperatur beträgt 438 °C.

Die Anwendung des Temperaturfeldes als Lastvektor für eine strukturelle mechanische Simulation ermöglicht die Charakterisierung der entstehenden mechanischen Belastungen. Das beschriebene Modell wird dazu modifiziert:

- Veränderung der Elementtypen
- elastisches und plastisches Materialverhalten des Lotes (bilinear kinematisches Modell)
- temperaturabhängige Materialdaten für Wärmeausdehnung, E-Modul und Fließgrenze
- zusätzliche Drucklast.

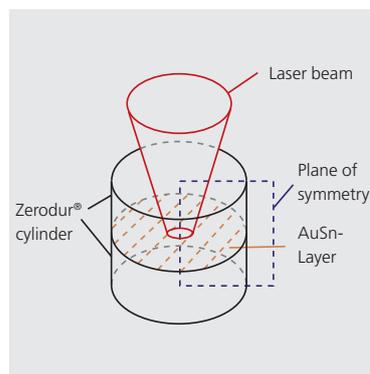
Abbildung 4 zeigt die Zugspannung (S_1) in der Fügezone im Zerodur® 3,5 s nach Prozessbeginn. Diese stellt für Gläser und Glaskeramiken das relevante Versagenskriterium dar. Das Ergebnis verdeutlicht mit 62 MPa maximaler Zugspannung eine ertragbare, lokal begrenzte mechanische Belastung der gelöteten Baugruppe, die durch rissfreie Lötverbindungen von Zerodur®-Bauteilen verifiziert werden konnte. Basierend auf dem vorgestellten Modell ist es möglich, Auswirkungen veränderter Prozessparameter des Laserstrahl­lötprozesses, wie z. B. der Fokusgeometrie, auf die Temperaturfeldverteilung zu berechnen sowie deren Auswirkung auf die Spannungsbelastung der Füge­stelle realitätsnah abzuschätzen.

Literatur:

- /1/ Banse, H.: »Laserstrahl­löten – Technologie zum Aufbau optischer Systeme«, Dissertation, Mensch & Buch Verlag, Berlin 2005.
- /2/ Beyer, E.; Wissenbach, K.: »Oberflächenbehandlung mit Laserstrahlung«, Springer Verlag, 1998

Abb. 1: Modell des Laserstrahl­lötprozesses.

Fig. 1: Model of the laser beam soldering process.



FEM-simulation of the laser beam soldering process for joining optical components

Laser beam soldering of optical components is used as joining technology during the assembly of hybrid optical systems that have to meet the requirements of UV-stability and long term stability for high quality optical systems. Because of the thermo-mechanical properties of the components and the solder, critical tensile stress can built up during the soldering process inside the region being joined. With this aspect in mind, FEM-simulations were applied to analyse and optimise the soldering process.

With regards to the laser beam soldering based assembly of a miniaturized mirror module made of Zerodur®, a basic simulation model was developed (Fig. 1) /1/. For the thermal calculation the following restrictions were assumed:

- cylindrically shaped components with planar, completely metallised joining areas
- 2D-modell according to the axial symmetry of the components (Fig. 2)
- eutectic 80Au20Sn solder, with 3 µm layers on each component
- laser radiation by means of a stationary surface heat flux with Gaussian intensity distribution /2/
- estimated coefficient of heat conduction of regions not to be joined
- ideal thermal contact between layers after melting by means of an additional 0.2 µm thick layer, to be activated after melting temperature
- heat transport within the model by means of pure heat conduction
- adiabatic boundary conditions of the model.

For calculation of the phase transition (melting the solder) enthalpy is used for the estimation of the heat capacity. Figure 3 shows the temperature distribution at the end of the laser pulse. A locally restricted region is heated up. The maximum temperature is 438 °C.

For characterisation of the mechanical stress the temperature distribution is used as a load vector for the mechanical simulation. Consequently, the described model has to be modified as regards:

- change in the element types
- elastic and plastic material properties (bilinear cinematic model)
- temperature dependent material properties in terms of thermal expansion, young's module and yield point
- additional pressure load.

Figure 4 shows the tensile stress S1 in the joining region within the Zerodur® 3.5 s after starting the process. This stress is the most significant failure criteria for glasses and glass ceramics. The results clearly illustrate that at a maximum tensile stress of 62 MPa, the stress load on the soldered assembly is both very low and restricted: a conclusion which is experimentally verified through the persistence stable and crack free joints of Zerodur®-components.

Based on the discussed model it is possible to calculate the impact of changed process parameters of the soldering process, e. g. focus geometry, on the temperature distribution and to estimate its effect on the stress load of the joining region in a realistic way.

References:

- /1/ Banse, H.: »Laserstrahlöten – Technologie zum Aufbau optischer Systeme«, Dissertation, Mensch & Buch Verlag, Berlin 2005.
- /2/ Beyer, E.; Wissenbach, K.: »Oberflächenbehandlung mit Laserstrahlung«, Springer Verlag, 1998

Abb. 4: Spannungskomponente S1 im Zerodur® (Fügezone) nach 3,5 s, $S1_{max} = 62$ MPa.

Fig. 4: Stress S1 in Zerodur® (joining region) after 3.5 s, $S1_{max} = 62$ MPa

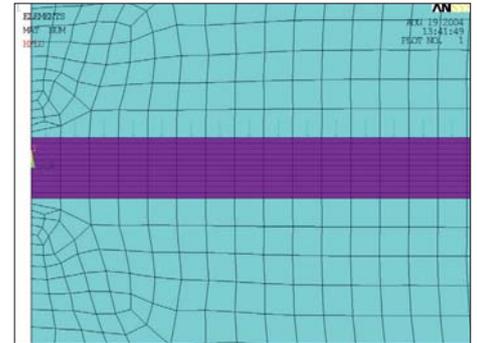


Abb. 2: Ausschnitt der vernetzten 2-D-Symmetrieebene im Bereich des Strahlencentrum mit Lastvektor Oberflächenwärmequelle (HFLU).

Fig. 2: Detail of the meshed plane of symmetry in the region of the beam centre with load vector heat flux (HFLU).

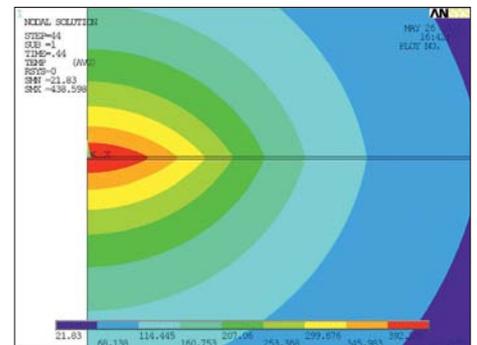
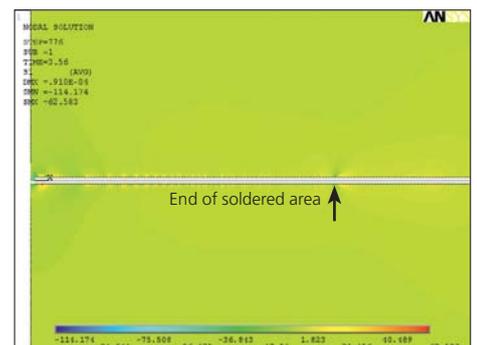


Abb. 3: Temperaturfeld der gelöteten Zerodur® Körper nach 0,44 s, $T_{max} = 438$ °C, Ausschnitt der Symmetrieebene.

Fig. 3: Temperature distribution of soldered Zerodur® pieces after 0.44 s, $T_{max} = 438$ °C, detail plane of symmetry.





Erik Beckert



Frank Wippermann



Ramona Eberhardt



Frank Buchmann¹

¹ Askion GmbH, Gera

Für Anwendungen in der medizinischen Analysetechnik wurde die Bereitstellung einer geeigneten Laserlichtquelle der Wellenlänge 635 nm für streifenden Einfall einer Linie mit den Abmessungen 5 mm x 70 µm und einer optischen Leistung von maximal 10 mW gefordert. Ein dafür geeignetes Optikdesign zeigt Abb. 1. Die Linie wird dabei durch zahlreiche, sich überlagernde Laserspots gebildet, die von zwei mikrooptischen ORMOCER-Zylinderlinsen-Arrays in Verbindung mit einer Kollimations- und Fokusoptyk für eine Laserdiode erzeugt werden. Zusätzlich ist ein Monitorkanal integriert, um die Lichtleistung der Quelle schnell und mit hoher Auflösung regeln zu können.

Die Systemplattform /1/ zur Montage der optoelektronischen Baugruppe zeigt Abb. 2. Ausgewählt wurde ein keramischer Schaltungsträger aus Aluminiumoxid, in dem Fassungsstrukturen zur Aufnahme der optischen Bauelemente und Leiterbahnen zur Ansteuerung von Laser- und Monitordiode integriert sind. Eine zusätzlich vorgesehene Temperaturregelung mittels Sensor und Peltierkühlung ermöglicht, die emittierte Wellenlänge der Laserdiode exakt einzustellen. Die In-Situ-Ansteuerung und Temperierung der Laserlichtquelle von der Systemplattform aus führte zu einer einfachen und flexiblen Montage (Abb. 3) der Baugruppe und darüber hinaus zu einem kostengünstigen Aufbau für den angestrebten mittleren Stückzahlbereich /2/. Verwendet wurden ein hoch auflösendes 6-Achs-Positioniersystem und ein kamera-basiertes Strahlprofilometer.

Neben dem Kleben als gegenwärtige Fügetechnologie bietet die Dickschichtmetallisierung auf der Systemplattform in Verbindung mit haftfesten Benetzungsschichten auf den optischen Bauelementen langfristig das Potential, das langzeit- und thermisch stabile Fügeverfahren Löten zu etablieren /3/.

Optik, Elektronik und Thermomechanik, gemeinsam integriert auf einer multifunktionalen und intelligenten Plattform, bilden in der vorgestellten Baugruppe ein komplexes und miniaturisiertes optoelektronisches System (Abb. 4), dessen Aufbaukonzept auch an viele andere Applikationen adaptiert werden kann.

Literatur:

- /1/ Beckert, E.: Ebene Keramiksubstrate und neue Montagetechnologien zum Aufbau hybrid-optischer Systeme, Dissertation, Technische Universität Ilmenau, 2005.
- /2/ Beckert, E.; Wippermann, F.; Eberhardt, R.; Buchmann, F.: Multifunctional optoelectronic systems on ceramic platforms, *Microsystems Technologies* 11, 2005, S. 360–367.
- /3/ Banse, H.; Eberhardt, R.; Beckert, E.; Stöckl, W.: Laser Beam Soldering – a New Assembly Technology for Microoptical Systems, *Microsystems Technologies* 11, 2005, S. 186–193.

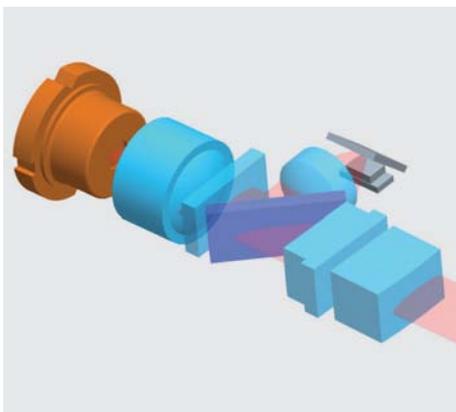


Abb. 1:
Optikdesign der Laserlinie.

Fig. 1:
Optical design of the laserline device.

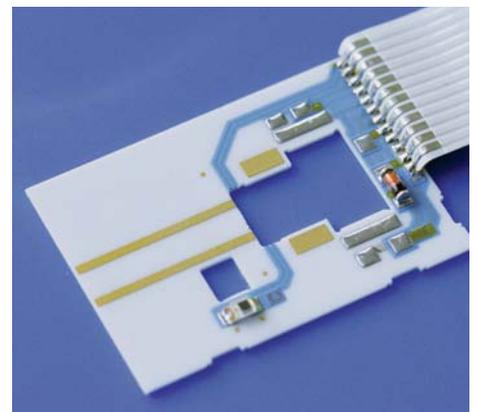


Abb. 2:
Systemplattform aus Al₂O₃-Schaltungsträger.

Fig. 2:
System platform made from an alumina PCB.

For medical and health care applications, there is a demand for a laserlight source with a wavelength of 635 nm and power of 10 mW with a beam dimension of 5 mm x 70 μm for large angles of incidence. The design of such an optical system is shown in figure 1. The line is formed by many overlapping laser spots which are, in turn, produced by two micro-optical cylindrical lens arrays together with a collimating and focusing optic for a laserdiode. In addition to this, a monitoring channel is integrated that enables fast and high resolution control of the output power from the source.

The system platform /1/ for the assembly of the optical and electrical elements is shown in figure 2. A ceramic Printed Circuit Board made of alumina was used. Within this PCB, mechanical structures to mount the optical elements and printed wire

structures to drive both the laser- and the monitoring diode are integrated. Closed loop control with sensor and peltier cooling enables exact temperature adjustment for the laserdiode and thus precise wavelength control. The in-situ driving and temperature control of the laserdiode makes for an easy and flexible assembly (figure 3) of components and consequently for cost-effective construction of the small and medium-sized quantities /2/ which are aimed for in the long term. During assembly a 6-axis positioning system and a camera based beamprofiler were used.

While adhesive bonding is currently the primary technology used for joining, in the future thickfilm metallization on the system platform together with metallized wetting surfaces on the optical elements will allow laserbeam soldering to be used as a longterm, temperature-stable joining alternative /3/.

Optics, electronics and thermomechanics, integrated together on a multifunctional and intelligent platform, in this way form a complex and miniaturized optoelectronic system (figure 4) based on a design concept that can also be used for many other applications.

References:

- /1/ Beckert, E.: Ebene Keramiksubstrate und neue Montagetechnologien zum Aufbau hybrid-optischer Systeme, Dissertation, Technische Universität Ilmenau, 2005.
- /2/ Beckert, E.; Wippermann, F.; Eberhardt, R.; Buchmann, F.: Multifunctional optoelectronic systems on ceramic platforms, *Microsystems Technologies* 11, 2005, S. 360–367.
- /3/ Banse, H.; Eberhardt, R.; Beckert, E.; Stöckl, W.: Laser Beam Soldering – a New Assembly Technology for Microoptical Systems, *Microsystems Technologies* 11, 2005, S. 186–193.

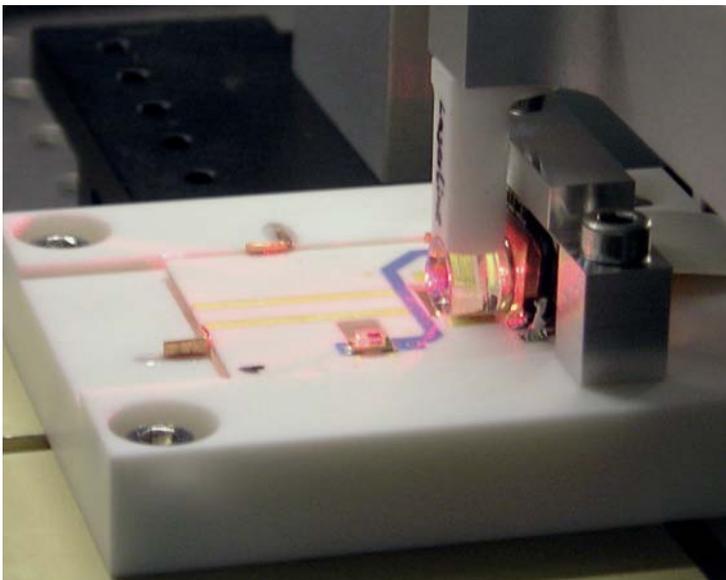


Abb. 3:
Montage der Baugruppe.

Fig. 3:
Assembly of the device.

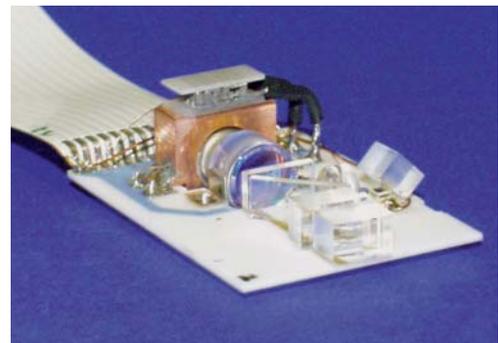


Abb. 4:
Komplexes und miniaturisiertes optoelektronisches System.

Fig. 4:
Complex and miniaturized optoelectronic system.

Entwicklung von automatischen Vorrichtungen zur innovativen Handhabung von Haaren



Matthias Mohaupt



Ramona Eberhardt



Gerd Harnisch



Michael Rudolph



Knut Meinert¹



Gerhard Schanz¹

¹ Wella Service GmbH, Darmstadt

Für die Beurteilung der Eigenschaften neuer Haarpflegeprodukte ist es notwendig, umfangreiche Untersuchungen an Haarproben durchzuführen. Es werden sowohl mechanische (z. B. Zugfestigkeit, Reißkraft, Elastizitätsmodul) als auch physikalische (z. B. Reflektivität, Glanz) und chemische (Wechselwirkung der Pflegeprodukte) Eigenschaften untersucht. Über die quantitative Beschreibung der Kenngrößen werden die getesteten Produkte objektiv bewertet. Die steigende Anzahl der Tests und damit verbunden die steigende Anzahl der zu handhabenden Einzelhaare generierte bei der Firma Wella Service GmbH den Bedarf einer automatisierten Handhabung und die Motivation für ein gemeinsames Projekt. Das Fraunhofer IOF hat umfangreiche Erfahrungen auf dem Gebiet der Faserhandhabung. Optische Fasern und Haare weisen handhabungstechnisch betrachtet ähnliche Eigenschaften auf! Zunächst wurde die Prozesskette ganzheitlich betrachtet und darauf aufbauend für die risikvollsten Aufgaben automatisierte Vorrichtungen entwickelt.

Die Haarbündel (ca. 100 Haare) werden in einer Halterung in die Vorrichtung eingelegt und durch mechanische Halteelemente in Form von Irisblenden in eine definierte Position gebracht (Abb. 1). Ein Greifer mit strukturierten Greiferbacken in Form einer speziell auf die Geometrie von Haaren abgestimmten Nut greift »blind« in das Haarbündel und separiert ein Einzelhaar /1/. Durch die Messung des elektrischen Widerstandes bei geschlossenen metallischen Greifbacken ist es möglich, ein gegriffenes Haar zu detektieren und an nachgelagerte Prozesse zu übergeben.

Konfektionieren eines Haares bedeutet an die Enden eines Einzelhaares einer definierten Länge jeweils eine so genannte »Crimphülse« anzubringen. Die Crimphülsen bestehen aus Messing und verfügen über eine Seele aus Kunststoff. Die benötigte Crimpkraft beträgt ca. 5 kN pro Hülse. Im Rahmen der Aufgabenstellung wurde eine Vorrichtung entwickelt, die das automatische Anbringen von Crimphülsen an Einzelhaare ermöglicht (Abb. 2). Die Crimphülsen werden über einen Wendelförderer zugeführt und mittels Greifer im geforderten Abstand mit einer Toleranz von weniger als 0,5 mm zueinander ausgerichtet. Die zugeführten Einzelhaare werden von speziell adaptierten neuen Haargreifern gegriffen, in die bereitgestellten Crimphülsen eingezogen, mittels Hydraulikzylinder definiert verpresst und in ein Magazin abgelegt. Die geforderte Zentriergenauigkeit der Haare in den Crimphülsen von 0,1 mm wurde erreicht.

Die Produktivität bei Verwendung der Vorrichtungen ist bei der Firma Wella Service GmbH um den Faktor zehn gegenüber der bisherigen manuellen Probenkonfektionierung angestiegen.

Literatur:

- /1/ Deutsche Patentanmeldung 10 2005 030 029.4
Vorrichtung zum Entnehmen jeweils eines einzelnen Haars/Faser aus einem Büschel mittels einer Greifeinrichtung, (eingereicht 27.06.2005).

Automatic handling of hairs for measuring geometrical and mechanical properties

For the characterization of new hair care products, a multitude of measurements must be carried out on hair samples. The mechanical properties of the hairs, such as tensile strength, tear-out force and Young's modulus and optical properties such as brilliance and reflectivity are used as decision criteria for evaluation. The quantitative description of the measured properties allows an objective characterization of the tested products. The large number of samples can only be coped with by an automatic handling system during the measuring processes at Wella Service GmbH and the need for such automation has resulted in a corporate project with Fraunhofer IOF. At the Fraunhofer IOF, there is a wealth of profound experience in fiber handling available and optical fibers show very similar handling characteristics to hairs. The process at Wella was analysed and two devices for the automatic handling of the hairs were realized by IOF.

Prior to all measurements, single hairs must be separated from a bundle of about 100 hairs. For this task, a device was developed, which effects an automatic separation. The hair bundle is put into the handling device and orientated to a well defined position by mechanical fixation elements that are similar to an "Iris-Aperture" (Fig. 1). A gripper with structured gripper jaws, including a V-nut geometry with a depth adapted to the diameter of the hairs, grasps "blindly" into the bundle of hairs and separates out one single hair [1]. By measuring the electrical conductivity between the closed metallic gripper jaws, it is possible to detect a single gripped hair. In the next process step, the gripped hair can be transferred to the following handling devices.

In this case, tailoring of the single hair means that two crimp sleeves are mounted on the single hair of a defined length. The crimp sleeves are made of brass and have a plastic core. The necessary crimping force is 5 kN per sleeve. For this task, a device was developed that effects the mounting of the crimping sleeves on the hairs (Fig. 2). The sleeves are supplied and positioned in the device with a tolerance of less than 0.5 mm regarding their set distance. The fed in hair is grasped by a newly developed "hair gripper" and inserted into the crimping sleeves. The sleeves are crimped onto the hair by a hydraulic cylinder and, after that, the confectioned sample is automatically stored in a magazine. The required centring accuracy for the hairs within the crimp sleeves was safely met and verified to be 0.1 mm.

Using these two devices, productivity in handling of hair samples has been increased by a factor of ten compared to previously used manual assembly.

References:

- [1] German patent application nb. 10 2005 030 029.4
Vorrichtung zum Entnehmen jeweils eines einzelnen Haars/Faser aus einem Büschel mittels einer Greifeinrichtung, submitted on 06/27/2005.



Abb. 1:
Vorrichtung zur Vereinzelung von Haaren aus einem Haarbündel.

Fig. 1:
Device for separation of single hairs.

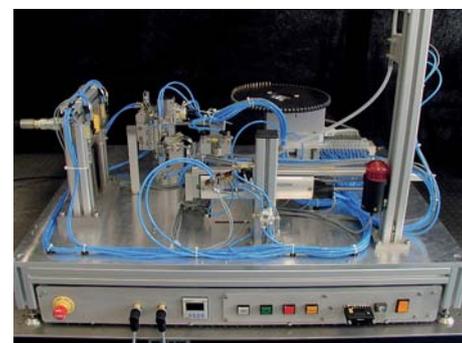


Abb. 2:
Vorrichtung zum Konfektionieren von Einzelhaaren.

Fig. 2:
Device for tailoring single hairs.

PCR auf dem Chip – Schnellere Analysen in den Life Sciences mit einem innovativen Ansatz



Claudia Gärtner



Thomas Clemens¹



Regina Hartung²



Stefanie Kirsch³



Richard Klemm³



Michael Köhler²



Ines Twers³

Ein neues Konzept für die PCR erlaubt die Vervielfältigung von DNA in weniger als 10 min im Vergleich zu mehr als einer halben Stunde in konventionellen Systemen. PCR – die Polymerrasekettenreaktion: Die Amplifikation von Nukleinsäuren mit einem hitzestabilen Enzym ist eine der dominierenden Technologien in den Life Sciences seitdem diese Reaktion im Jahr 1993 zu Nobel-Preis-Ehren gelangte. Das zugrunde liegende Konzept der PCR ist die Nutzung von drei verschiedenen Temperaturzonen: In der ersten Zone – der so genannten Denaturierungszone – wird die doppelsträngige DNA in zwei Einzelstränge getrennt, in der nächsten Temperaturzone – Annealing Zone – werden kleine Stücke komplementärer DNA – die so genannten Primer – an den DNA-Einzelstrang angelagert. In der dritten Temperaturzone – Elongationszone – arbeitet das Enzym Polymerase, um von den beiden Einzelsträngen zwei Doppelstränge zu erhalten. Dieser Zyklus wird 15–40 Mal durchlaufen, jedes Mal mit einer Verdopplung der DNA-Zielmoleküle.

In konventionellen Systemen wird die komplette Probe einschließlich des Reaktionsgefäßes hochgeheizt und heruntergekühlt, wobei die Wärmezu- und -abführung der zeitlimitierende Schritt ist. In dem Lab-on-a-Chip-PCR-System wird die Probe durch drei unterschiedliche, aber konstante Temperaturzonen gepumpt, die in dem entsprechenden Betriebsgerät, dem Thermocycler, vorgehalten werden. In diesem Fall wird die Probe, die ein sehr viel kleineres Volumen besitzt, lediglich hochgeheizt und heruntergekühlt, was deshalb deutlich schneller erfolgt. Ein Chipdesign arbeitet im kontinuierlichen Fluss /1/ mit einem Fluidsystem, das bereits die Anzahl der PCR-Zyklen vorgibt. Die PCR-Lösung wird mit kontinuierlichem Fluss durch den Chip gefördert. Abbildung 1 (links) zeigt

diesen Chip. Eine andere Möglichkeit zur Durchführung der Chip-PCR ist, die PCR-Lösung von einer zur nächsten Temperaturzone zu pumpen und nach dem Durchlaufen eines Zyklus wieder zurück zu saugen, um mit dem nächsten Zyklus zu starten. Mit diesem Chip-Typ, s. Abb. 1 (rechts), kann die Anzahl der Zyklen für jede Reaktion frei gewählt werden.

Um die PCR auf dem Chip in der Handhabung einfach zu gestalten, sind die Fluidanschlüsse, das Chip-to-world-Interface, direkt auf den Chip integriert, der kostengünstig mittels Mikrospritzguss gefertigt wird.

Speziell für die Lab-on-a-Chip-Anwendungen wurde ein neuer Thermocycler entwickelt, der nicht nur die Möglichkeit bietet, die Temperaturzonen auf gleichbleibender Temperatur zu belassen, sondern auch unabhängig voneinander zu cyclen. In dem im kontinuierlichen Fluss arbeitenden PCR-Chip aus Polycarbonat wurden Amplifikationen von DNA erfolgreich durchgeführt. Die Ergebnisse sind in Abb. 3 dokumentiert. Die Banden aus Spalte 4–6 wurden bei unterschiedlichen PCR-Bedingungen erhalten. Die Kombination von PCR-Chip und Thermocycler ermöglicht einen innovativen Weg zur Durchführung der PCR. Insbesondere ist durch das Chip-Prinzip die Integration weiterer vor- oder nachgeschalteter Prozesse auf dem Chip möglich, was der größte Vorteil der Chip-PCR ist.

Ein Teil der Ergebnisse stammt aus den Projekten μ Flubak und Zellex.

Literatur:

- /1/ Poser, S.; Schulz, T.; Dillner, U.; Baier, V.; Köhler, J. M.: "Chip elements for fast thermocycling", EuroSensors X–The 10th European Conference on Solid-State Transducers, Leuven, Belgium, 1996, 4, pp. 1197–1199.

PCR-on-a-chip – An innovative tool to speed up in life sciences

The novel concept of carrying out PCR on a chip allows the replication of DNA to be speeded up a process lasting more than half an hour in conventional systems to much less than 10 minutes in the new PCR system. PCR – Polymerase Chain Reaction: the amplification of nucleic acids by a thermostable enzyme has been one of the dominating technologies in the life sciences since its Nobel Prize winning year 1993. The underlying concept of PCR is the use of three different temperature zones, where in the first – so called denaturation zone – the double stranded DNA is separated, in the second – annealing zone – small pieces of complementary DNA, the primers, attach to the single DNA strands. Finally, during the elongation zone the enzyme polymerase generates two double strands of DNA, each one consisting of one original template and one newly replicated single strand. This cycle is carried out 15–40 times, each time doubling the number of target DNA molecules. In conventional systems the complete reaction vessel is heated up and cooled down and the

heat transfer is the time limiting step. In the new system, the sample is moved through three different but constant temperature zones on an instrument called a thermocycler. In this case only the sample is heated up and cooled down, which having a much smaller volume can therefore undergo much faster temperature changes. One chip works in continuous flow /1/ mode with a fluidic system which already defines the number of PCR-cycles. The PCR solution is pumped in a continuous flow through the whole chip. This chip is shown in Fig. 1 (left). Another way to run PCR on the chip is to pump the PCR solution from one temperature zone to the next, and after each complete temperature cycle the solution is sucked back to start the temperature cycle once again. With this chip type, see Fig. 1 (right), the number of cycles can be freely defined for each reaction.

To make these PCR chips easy to use, the fluidic interface – the chip-to-world-interface – is directly integrated into the microfluidic chips and moreover, this system can be realized in a cost-efficient way by injection molding.

A novel thermocycler specially adapted to Lab-on-a-chip applications was developed that, not only allows the temperature zones to be kept at constant temperatures, but also permits the individual control of their cycling. With the continuous flow PCR-chip the amplification is carried out in a chip made from polycarbonate. Successful amplification is documented in Fig. 3 where lanes 4–6 represent different PCR conditions which led to an amplification of the DNA in the continuous flow chip. The package PCR-chip and thermocycler offers an innovative way to carry out PCR. In particular this system offers the potential to combine further steps before or after the PCR on the chip. This is the outstanding advantage of chip-PCR for further systems.

Parts of the work have been carried out within the projects μ Flubak and Zellex.

References:

- /1/ Poser, S.; Schulz, T.; Dillner, U.; Baier, V.; Köhler, J. M.: "Chip elements for fast thermocycling", Eurosensors X–The 10th European Conference on Solid-State Transducers, Leuven, Belgium, 1996, 4, pp. 1197–1199.

Abb. 1: Chip für die PCR im kontinuierlichen Fluss (links) und Chipdesign für das Pumpen und Zurücksaugen der PCR-Lösung (rechts).



Fig. 1: PCR-chip for continuous flow PCR (left) and chip design for pumping the PCR solution forwards and backwards (right).

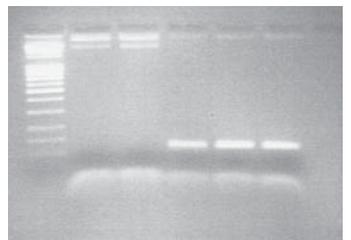
Abb. 2: Thermocycler mit drei verschiedenen Temperaturzonen, die unabhängig voneinander temperiert werden können.



Fig. 2: Thermocycler with three temperature zones for individual cycling of each zone.

Abb. 3: DNA-Gel mit DNA-Standard (Spalte 1), PCR-Ansätzen ohne erfolgreiche PCR (Spalte 2 und 3) und PCR-Ansätze mit unterschiedlichen Protokollen mit guter Amplifikation der DNA.

Fig. 3: DNA gel with standard (lane 1), PCR attempts where no amplification occurred (lanes 2 and 3), and PCR under conditions which led to a good amplification of the DNA template.



Internationale Gäste International Guests

Dr. Jean M. Bennett
Naval Air Warfare Center,
China Lake/California, USA

Dr. Bruno Berge
Varioptic, Lyon, France

Luis Brissot
ATMEL, Grenoble, France

Dr. Gencho Danev
Bulgarian Academy of Sciences, Sofia, Bulgaria

Paul Dubois
Botschafter Kanadas in Deutschland

Dr. Peter de Groot
Zygo Corporation, Connecticut, USA

Dr. Jean Luc Jaffard
STMicroelectronics, Grenoble, France

Prof. Dr. Toshikuni Kaino
Tohoku University, Sendai, Japan

Eisaku Kakiuchi, Hirohiko Morikawa
Toyota, Zaventem, Belgium

**Yohei Kurashima, Ryuichi Kurosawa,
Takeshi Miyashita, Akira Makabe**
Seiko Epson Corporation, Fujimi, Japan

Prof. Dr. Francesco Michelotti
Universita' degli Studi di Roma "La Sapienza",
Rome, Italy

Dr. Roger Netterfield
CSIRO, Lindfield NSW, Australia

Prof. Dr. Ken Oh
University Taipei, Taipei, Taiwan

Prof. Dr. Olivier Parriaux
University St. Etienne, St. Etienne, France

**Prof. Dr. Lyon Son Pu,
Dr. Shinichiro Tamura, Ho Nyeon Lee**
SAIT Samsung, Suwon, Korea

Ch. Ratnajee Rao
Speck Systems Ltd., India

Dr. Ir. Theo A.M. Ruijl
PHILIPS CFT, Eindhoven, The Netherlands

Dr. Vitaly Stelmashuk
Institute of Plasma Physics, Prag, Czech Republic

Dr. Lin Shen
Institute of Optics & Electronics Chinese Academy
of Sciences, Chengdu Sichuan, China

Dr. John Stover
The Scatter Works, Tucson / Arizona, USA

Prof. Alexander Tikhonravov
Moscow State University, Moscow, Russia

Dr. Reinhard Völkel
SUSS Microoptics, Neuchâtel, Switzerland

Peter Zung
VisEra, Taipei, Taiwan

Internationale Kooperationen International Co-operations

Austria:
Universität Innsbruck,
Institut für Experimentalphysik,
Prof. Rainer Blatt, Prof. Hans K. Pulker

ARC Seibersdorf Research GmbH,
Dr. Ana Almansa-Martin

IMS-Ionen Mikrofabrikations Systeme GmbH,
Dr. Ernst Haugender

France:
University St. Etienne,
Prof. Oliver Parriaux

Greece:
Foundation for Research and Technology - Hellas
(FO.R.T.H.),
Prof. Ioannis Papamastorakis

Ireland:
Trinity College Dublin,
Prof. Werner Blau

Israel:
Technion, Haifa,
Prof. Abraham Marmor

Italy:
ENEA Rome,
Dr. Enrico Nichelatti, Dr. Angela Piegari

University "La Sapienza", Rome,
Prof. Francesco Michelotti

Poland:
Warsaw University of Technology,
Prof. K. J. Kurzydowski

Portugal:
University Aveiro,
Prof. Nikolai Sobolev

Universidade de Coimbra,
Prof. M. H. Gil

Russia:
Moscow State University,
Prof. Alexander Tikhonravov

Switzerland:
IMT University Neuchâtel,
Prof. Hans-Peter Herzig

EMPA St. Gallen,
Dr. Arie Bruinink

Ukraina:
National Technical University
"Kharkov Polytechnic Institute",
Prof. Valery V. Kondratenko

USA:
Naval Air Warfare Center, China Lake,
Dr. Jean M. Bennett

University of Wisconsin,
Prof. Roxann L. Engelstad

Messebeteiligungen 2005 Fairs Participations 2005

Photonics West
22.1.–27.1., San Jose, USA

SEMICON Europa
12.4.–14.4, Munich, Germany

Control
26.4.–29.4., Sinsheim, Germany

SID
24.5.–26.5., Boston, USA

Laser
13.6.–16.6., Munich, Germany

Biotechnica
18.10.–20.10., Hannover, Germany

Vision
8.11.–10.11., Stuttgart, Germany

Productronica
15.11.–18.11., Munich, Germany

Medica/ComPaMed
16.11.–18.11., Düsseldorf, Germany

Euromold
30.11.–3.12., Frankfurt/M, Germany

Messeexponate 2005 Fair Exhibits 2005

EUV Schwarzschild objective
Metrology unit for the lithography
Electrostatic chuck for 12 inch
Tabletop digitizer "Flex mini"
3D dental digitizer "hiScanµ"
3D measurement system "kolibri-flex"
3D face scanner "gscan"
Compact 3D sensor with OLED display
OLED projection systems
Optics for displays + micro displays
Microdisplay based projectors
Optical coatings for laser applications
Optical coatings on plastics
EUV multilayer optics
OPTIMON: Broad Band Monitoring
Design and characterization
of optical components
Refractive and diffractive elements for hybrid
integrated micro-optical systems
High-brightness LED illumination system
Fiber lasers – from ultra-short pulse
amplification to supercontinuum generation
Ultra-thin vision system
based on artificial compound eyes
Laser beam soldering of
microoptical components
Optoelectronics on ceramic substrates
Design and machining of
ultra-precision devices
Microfluidic systems
for life science applications
Chip-PCR – Chip and Thermocycler

Preise 2005 Awards 2005

Best Student Paper Award
an Dr. Thomas Schreiber, Fabian Roeser,
Dr. Andreas Liem, Dr. Holger Zellmer,
Prof. Dr. Andreas Tünnermann
Januar 2005, Photonics West, San Jose

**Thüringer Forschungspreis
für Angewandte Forschung 2004**
an Dr. Jaques Duparré, Dr. Peter Dannberg,
Dr. Peter Schreiber, Dr. Andreas Bräuer
3. Februar 2005, Schmalkalden

nano tech Award 2005
an Fraunhofer ISC und IOF
Februar 2005, Tokyo

Gottfried Wilhelm Leibniz-Preis 2004 der DFG
an Prof. Dr. Andreas Tünnermann
2. März 2005, Berlin

**Preis der Wissenschaftlichen Gesellschaft
für Lasertechnik 2004**
an Dr. Uwe Detlef Zeitner
2. März 2005, Stuttgart

**"Judson C. Hickey Writing Award 2004"
of the Journal of Prosthetic Dentistry
"Optical modeling of extraoral defects",
J. of Prosthetic Dentistry, 91(2004)80-84**
an Dr. Gunther Notni und Matthias Heinze
Mai 2005

**Fakultätspreis der
Physikalisch-Astronomischen Fakultät
der FSU Jena für die beste Diplomarbeit
an Ulrike Fuchs**
3. Juni 2005, Jena

MOC contribution award 2005
an Prof. Dr. Wolfgang Karthe
2. November 2005, Tokyo

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, Diplomanden und 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.

Workshops

6. IOF-Winterschule Optische Schichten
17.–18. Februar 2005, Oberhof

**Workshop Optopackaging
Workshop von OptoNet e.V. und Silicon
Saxony e.V.**
3. März 2005, Fraunhofer IOF, Jena

**OptoNet-Workshop
Lithography for Photonics**
15. April 2005, Fraunhofer IOF, Jena

**1. Sino-German Workshop
on Optical Coatings**
17.–21. Mai 2005, Shanghai

**SPIE-Symposium
Optical Systems Design 2005**
12.–16. September 2005, FSU, Jena

**Japanese-German Industrial Workshop
on Advanced Organic Photonic Applications**
13.–14. Oktober 2005, Fraunhofer IOF, Jena

**Jenaer Schule
Theorie und Anwendung optischer Schichten**
21.–22. November 2005, Fraunhofer IOF, Jena

**OptoNet-EFDS-AK Plasma Workshop 2005
Optische Schichten:
Trends – Herausforderungen – Zukunft**
23. November 2005, Fraunhofer IOF, Jena

**Statusseminar Rugate-Filter:
Innovative Technologien für optische Filter
der nächsten Generation**
24. November 2005, Fraunhofer IOF, Jena

**Seminar mit Praktikum
Optische 3-D-Messtechnik
für die Qualitätssicherung in der Produktion**
8.–9. Dezember 2005, Fraunhofer IOF, Jena

Vorlesungen Lectures

Dr. Ramona Eberhardt
Optikmontage / Fertigung spezieller Bauteile
Fachhochschule Jena

Dr. Norbert Kaiser
Beschichtungstechnik
Fachhochschule Jena
Nanooptik
Fachhochschule Jena

Prof. Dr. Andreas Tünnermann
Grundlagen der Laserphysik
Friedrich-Schiller-Universität Jena
**Experimentelle Methoden
der Atom- und Molekülphysik**
Friedrich-Schiller-Universität Jena
Angewandte Photonik
Seminar für Doktoranden FSU Jena,
Fraunhofer IOF

Dr. Uwe Detlef Zeitner
Optik ultrakurzer Pulse
Friedrich-Schiller-Universität Jena
**Mikrostrukturtechnik für die
Mikro- und Nanooptik**
Friedrich-Schiller-Universität Jena

Diplomarbeiten Diploma Theses

Martin Bischoff
**Design und Herstellung gechrpter Spiegel
zur Kontrolle von fs-Pulsen**
Friedrich-Schiller-Universität Jena, 09/05

Nancy Bollwahn
**Untersuchungen zur Feuchteabsorption
transparenter Polymere und zur
Barrierewirkung anorganischer Schichten**
Fachhochschule Jena, 12/05

Stefan Buschmann
**Grundlagenuntersuchungen zur
Charakterisierung aerostatischer
Gaslagererelemente unter
Hochvakuumbedingungen**
Fachhochschule Jena, 12/05

Christian Dietzel
**Entwicklung eines Greifers
zur Handhabung einer Laserdiode**
Fachhochschule Jena, 07/05

Alexander Fehn
**Entwicklung von Baugruppen zur
automatisierten Montage von
Strahlformungsoptiken**
Fachhochschule Jena, 12/05

Matthias Grünewald
**Verwendung von Zielmarken zur
Orientierung von Streifenprojektor-
aufnahmen in einem optischen
3D-Messsystem**
Technische Universität Dresden, 11/05

Andreas Grützmann
**Fehlertolerante und fehlerkorrigierende
Phasenauswerteverfahren für einen
optischen 3D-Digitalisierer**
Friedrich-Schiller-Universität Jena, 09/05

Dimitri Heumann
**Untersuchung der Messauflösung
eines phasogrammetrischen
Mehrbild-3D-Digitalisierers**
Friedrich-Schiller-Universität Jena, 08/05

Mathias Kamprath
**Methoden zur Bestimmung der
Grenzflächen- und Volumenstreuung
optischer Komponenten bei 193 nm**
Fachhochschule Jena, 11/05

Vivien Müller
**Entwicklung und Erprobung einer Klebe-
technologie für die Oberflächenmontage
optischer Komponenten**
Fachhochschule Jena, 01/05

Christian Paetz
**Entwicklung numerischer Routinen zur
Charakterisierung von Mikrolinsenarrays
anhand von Profilmessdaten**
Fachhochschule Jena, 05/05

Jörg Petschulat
**Herstellung, Charakterisierung und theore-
tische Behandlung von metallbeschichteten
Mottenaugenstrukturen**
Friedrich-Schiller-Universität Jena, 09/05

Kai Pömpner
**Entwicklung, Konstruktion und Test eines
Präzisionsspannsystems zur lagegenauen
Fixierung von Baugruppen**
Fachhochschule Jena, 02/05

Daniela Radtke
**Theoretische und experimentelle
Untersuchungen an
Speckle-Verschiebungssensoren**
Friedrich-Schiller-Universität Jena, 02/05

Anett Rast
**Entwicklung eines 3D-Messverfahrens zur
Analyse von Fußabdrücken in Trittschaum**
Friedrich-Schiller-Universität Jena, 07/05

Franziska Scharf
**Spin-offs aus der öffentlichen Forschung.
Eine empirische Analyse der
Konfliktpotenziale bei Ausgründungen**
Fachhochschule Jena, 07/05

Nancy Wolf
**Eignung von OLED-Mikrodisplays für
Streifenprojektionssysteme**
Fachhochschule Jena, 01/05

Henry Zirm
**Untersuchungen zur zentrierten Herstellung
von Diamantwerkzeugen zum ultrapräzisen
Einzahnprofilbohren**
Fachhochschule Jena, 02/05

Master

Michael Himmelreich
**Einsatz eines modularen LCoS-Projektors
in dem phasogrammetrischen Messgerät
»Dent-Flex«**
Fachhochschule Jena, 11/05

Dissertationen Dissertations

Dr.-Ing. Henrik Banse
**Laserstrahllöten – Technologie
zum Aufbau optischer Systeme**
Friedrich-Schiller-Universität Jena, 05/05

Dr.-Ing. Erik Beckert
**Ebene Keramiksubstrate und neue
Montagetechnologien zum Aufbau
hybrid-optischer Systeme**
Technische Universität Ilmenau, 11/05

Dr. rer. nat. Alexander Büttner
**Untersuchung experimenteller Verfahren zur
resonatorinternen Modenformung**
Friedrich-Schiller-Universität Jena, 04/05

Dr. rer. nat. Jacques Duparré
Microoptical artificial compound eyes
Friedrich-Schiller-Universität Jena, 06/05

Dr. rer. nat. Petra Heger
**Spektrale Eigenschaften nanostrukturierter
dielektrischer und metallischer Dünnschicht-
systeme**
Friedrich-Schiller-Universität Jena, 12/05

Dr. rer. nat. Ulrich Streppel
**Selbstorganisierte Strukturbildung
in UV-sensitiven optischen Polymeren**
Friedrich-Schiller-Universität Jena, 04/05

Patents

Deutsche Patentanmeldungen 2005 Patent Applications 2005

- (A1)
Damm, C.; Risse, S.; Peschel, T.; Gebhardt, A.; Rohde, M.; Schenk, C.; Elster, T. (Leica); Döring, H.-J. (Leica); Schubert, G. (Leica)
Elektrostatisches Ablensystem für Korpuskularstrahlung
Anmelde-Az.: 10 2005 005 801
- (A2)
Damm, C.; Figulla, H. R. (Klinikum FSU Jena); Ferrari, M. (Klinikum FSU Jena)
Vorrichtung zur Implantation und Befestigung von Herzklappenprothesen
Anmelde-Az.: 10 2005 051 849
- (A3)
Damm, C.; Figulla, H. R. (Klinikum FSU Jena); Ferrari, M. (Klinikum FSU Jena); Ottma, R. (JEN.meditec); Moszner, R. (JENmeditec)
Katheder für transvaskuläre Implantation von Herzklappenprothesen
Anmelde-Az.: 10 2005 003 632
- (A4)
Duparré, J.; Völkel, R. (SUSS); Knop, K. (CSEM)
Einrichtung zur optischen Verschlüsselung, Einrichtung zur optischen Entschlüsselung und Verschlüsselung-/Entschlüsselungs-System
Anmelde-Az.: 10 2005 016 818
- (A5)
Gebhardt, A.; Peschel, T.; Damm, C., Rohloff, R.-R. (MPIA)
Spiegelträger für einen optischen Spiegel
Anmelde-Az.: 10 2005 026 418
- (A6)
Kaiser, N.; Schulz, U.; Fuchs, H. J. (IAP FSU Jena); Kley, E.-B. (IAP FSU Jena); Petrasch, R. (IAP FSU Jena)
Verfahren zur Erzeugung einer Nanostruktur und optisches Element mit einer Nanostruktur
Anmelde-Az.: 10 2005 049 280
- (A7)
Palme, M.
Intraorales Kamerasystem
Anmelde-Az.: 10 2005 043 402
- (A8)
Riehemann, S.; Palme, M.; Notni, G.
Adaptives Beleuchtungssystem
Anmelde-Az.: 10 2005 021 808

- (A9)
Schreiber, P.; Buss, W.; Egloff, T.; Brückner, A.
Optischer Sensor und Verfahren zur optischen Abstands- und/oder Farbmessung
Anmelde-Az.: 10 2005 043 627
- (A10)
Schreiber, P.; Kudaev, S.; Moffat, A. (CZJ); Groetsch, S. (Osram OS)
Lichtemittierendes Modul insbesondere zur Verwendung in einem optischen Projektionsgerät und optisches Projektionsgerät
Anmelde-Az.: 10 2005 041 319
- (A11)
Tünnermann, A.; Limpert, J. (IAP FSU Jena); Ortec, B. (IAP FSU Jena); Schreiber, T. (IAP FSU Jena); Nielsen, C.K. (Uni Arthus, Denmark)
Faserlaser
Anmelde-Az.: 10 2005 042 073
- (A12)
Tünnermann, A.; Kley, E.-B. (IAP FSU Jena); Erdmann, T. (IAP FSU Jena)
Optischer Schalter
Anmelde-Az.: 10 2005 021 809
- (A13)
Tünnermann, A.; Kley, E.-B. (IAP FSU Jena); Kämpfe, T. (IAP FSU Jena)
Dielektrisches Pinhole zur Ortsfrequenzfilterung von Laserstrahlen
Anmelde-Az.: 10 2004 058 044
- (A14)
Yulin, S.; Feigl, T.; Kaiser, N.; Kozhevnikov, I.
Transmissionsfilter für den EUV-Spektralbereich
Anmelde-Az.: 10 2005 016 591

Deutsche Patenterteilungen 2005 Patent Assignment (Germany)

(P1)

Damm, C.; Peschel, T.; Weber, C.;
Ferrari, M. (Klinikum FSU Jena);
Figulla, H. R. (Klinikum FSU Jena)
**Vorrichtung zur Befestigung und
Verankerung von Herzklappenprothesen**
Veröffentlichungsnummer: DE 100 10 074

(P2)

Damm, C.; Weber, C.;
Figulla, H. R. (FSU Klinikum); Ferrari, M.
(FSU Klinikum); Lang, K. (FSU Klinikum)
**Verankerungsstütze für eine
Herzklappenprothese und ein Verfahren
zu deren Herstellung**
Veröffentlichungsnummer: DE 198 57 887

(P3)

Damm, C.; Dörrer, P.; Harnisch, G.; Mohaupt, M.;
Risse, S.; Weber, C.; Figulla, H. R. (FSU Klinikum);
Ferrari, M. (FSU Klinikum); Lang, K. (FSU Klinikum)
**Verankerung für
implantierbare Herzklappenprothese**
Veröffentlichungsnummer: DE 100 10 073

(P4)

Duparré, J.; Bräuer, A.; Dannberg, P.; Schreiber, P.;
Völkel, R. (SUSS)
**Bilderfassungssystem
und dessen Verwendung**
Veröffentlichungsnummer: DE 10 2004 003 013

(P5)

Guyenot, V.; Damm, C.; Gebhardt, A.;
Siebenhaar, C.; Peschel, T.
**Verfahren und Vorrichtung zur Herstellung
von Referenzflächen an Fassungen optischer
Elemente durch eine spanende Bearbeitung
sowie damit hergestellte optische Elemente**
Veröffentlichungsnummer: DE 103 22 587

(P6)

Kaiser, N.; Gäbler, D.
**Bauelement mit ultrapräziser Oberfläche und
Verfahren zu seiner Herstellung**
Veröffentlichungsnummer: DE 101 34 157

(P7)

Kaiser, N.; Heber, J.; Mühlig, C. (IPHT);
Triebel, W. (IPHT)
**Optisches Element, Verfahren zu einer
Herstellung und zur Bestimmung
seiner optischen Eigenschaften**
Veröffentlichungsnummer: DE 102 13 088

(P8)

Kalkowski, G.; Damm, C.; Beckert, E.;
Leitel, A. (Zeiss Jena)
Optisches Element
Veröffentlichungsnummer: DE 102 28 054

(P9)

Munzert, P.; Scheler, M.; Kaiser, N.;
Schulz, U.; Uhlig, H.
**Verfahren zur Reduzierung der
Grenzflächenreflexion von Kunststoff-
substraten sowie derart modifiziertes
Substrat und dessen Verwendung**
Veröffentlichungsnummer: DE 102 41 708

(P10)

Munzert, P.; Kaiser, N.; Schulz, U.; Hofmann, W.
(Fresnel Optics); Bitzer, M. (Fresnel Optics);
Gebhardt, M. (Fresnel Optics)
**Verfahren und Werkzeug zur Herstellung
transparenter optischer Elemente
aus polymeren Stoffen**
Veröffentlichungsnummer: DE 103 18 566

(P11)

Yulin, S.; Feigl, T.; Kaiser, N.; Kuhlmann, T.
**Verfahren zur Herstellung
eigenspannungsfreier reflektierender
optischer Schichtsysteme auf Substraten**
Veröffentlichungsnummer: DE 101 26 038

(P12)

Notni, G.; Palme, M.; Lippmann, U.;
Riehemann, S.
**Transmissiometer
mit mehreren spektralen Kanälen**
Veröffentlichungsnummer: DE 10 2004 030 029

Ausländische Patenterteilungen 2005

Foreign Patent Assignment

(P13)

Zeitner, U. D.;
Güther, R. (Ferdinand Braun Institut)
**Laserresonatoren mit
modenselektierenden Phasenstrukturen**
Veröffentlichungsnummer: US 6,920,160

(P14)

Glöckner, S.; Göring, R.; Schreiber, P.; Groß, M.
(Bodenseewerk Gerätetechnik GmbH);
Tholl, H.-D. (Bodenseewerk Gerätetechnik GmbH)
**Schaltbares mikrooptisches
Strahlumlenksystem**
Veröffentlichungsnummer: EP 0 916 971

(P15)

Wächter, C.; Lederer, F. (FSU Jena);
Peschel, U. (FSU Jena)
**Anordnung zur Strahlumlenkung
in Wellenleitergeometrien**
Veröffentlichungsnummer: EP 1 334 386

(P16)

Damm, C.; Guyenot, V.; Müller, E. (Klinikum FSU
Jena); Figulla, H. R. (Klinikum FSU Jena);
Ferrari, M. (Klinikum FSU Jena)
**Vorrichtung zur Implantation und
Befestigung von Herzklappenprothesen**
Veröffentlichungsnummer: EP 1 469 797

Scientific Publications

Bücher Books

Banse, H.

Laserstrahllöten – Technologie zum Aufbau optischer Systeme, Dissertation (2005) ISBN 3-89820-960-1

Braun, A.; Karthe, W.; Mauroner, O.; Slama, A.
Optische Technologien – Die Beherrschung von Licht in all seinen Eigenschaften

Fokus Innovation Kräfte bündeln – Prozesse beschleunigen, S. 185–211, ISBN 3-446-40588-7

Kaiser, N.; Feigl, T.; Stenzel, O.; Schulz, U.

Schichtsysteme für optische Anwendungen
Jahrbuch Oberflächentechnik
Band 61 (2005) S. 93–103, ISBN 3-87480-213-2

Kaiser, N.; Lauth, H.; Bernitzki, H.

Optical Coatings for Excimer Laser Applications
Excimer Laser Technology (2005) p. 119–126, ISBN-10 3-540-20056-8

Schulz, U.

Coating on plastics
Handbook of Plastic Optics (2005) p. 149–180, ISBN 3-527-40424-4

Stenzel, O.

The Physics of Thin Film Optical Spectra: An Introduction
Springer Series in Surface Sciences, Vol. 44 (2005), ISBN 3-540-23147-1

Zeitschriften Journals

Augustin, M.; Iliew, R.; Etrich, C.; Schelle, D.; Fuchs, H.-J.; Peschel, U.; Nolte, S.; Tünnermann, A.

Self-guiding of infrared and visible light in photonic crystal slabs
Applied Physics B: Lasers and Optics 81 (2005) 2-3 p. 313–319, ISSN 0340-3793

Banse, H.; Beckert, E.; Eberhardt, R.; Stöckl, W.; Vogel, J.

Laser beam soldering - a new assembly technology for microoptical systems
Microsystem Technologies 11 (2005) 2-3 p. 186–193, ISSN 0946-7076

Barkusky, F.; Peth, C.; Mann, K.; Feigl, T.; Kaiser, N.

Formation and direct writing of color centers in LiF using a laser-induced extreme ultraviolet plasma in combination with a Schwarzschild objective
Review of Scientific Instruments 76 (2005) p. 105102-1–105102-5, ISSN 0034-6748

Beckert, E.; Banse, H.; Eberhardt, R.; Dusi, M.; Schreiber, P.

Hybride Integration elektro-optischer Systeme auf Keramiksubstraten
Elektronik (2004) 25 S. 54–58, ISSN 0013-5658

Benoit, N.; Yulin, S.; Feigl, T.; Kaiser, N.

Radiation stability of EUV Mo/Si multilayer mirrors
Physica B: Condensed Matter 357 (2005) 1-2 Special Issue p. 222–226, ISSN 0921-4526

Büttner, A.; Zeitner, U. D.; Kowarschik, R.

Folded diffractive laser resonator with super Gaussian fundamental mode
Applied Physics B 81 (2005) 5 p. 601–606, ISSN 1432-0649

Büttner, A.; Zeitner, U. D.; Kowarschik, R.

Design Considerations on High-Brightness Diffractive Broad Area Lasers
Journal of the Optical Society of America B (JOSA B) 22 (2005) 4 p. 796–806, ISSN 0740-3224

Clausnitzer, T.; Kley, E.-B.; Tünnermann, A.; Bunkowski, A.; Burmeister, O.; Danzmann, K.; Schnabel, R.; Gleich, S.; Duparré, A.

Ultra low-loss low-efficiency diffraction gratings
Optics Express 13 (2005) 12 p. 4370–4378, ISSN 1094-4087

Duparré, A.; Flemming, M.; Notni, G.; Tünnermann, A.

Nanorauheit statt Lotusstruktur: Chancen für ultrahydrophobe optische Oberflächen
Photonik 37 (2005) 2 S. 62–65, ISSN 1432-9778

Duparré, J.; Wippermann, F.; Dannberg, P.; Reimann, A.

Chirped arrays of refractive ellipsoidal microlenses for aberration correction under oblique incidence
Optics Express 13 (2005) 26 p. 10539–10551, ISSN 1094-4087

Duparré, J.; Dannberg, P.; Schreiber, P.; Bräuer, A.; Tünnermann, A.

Thin compound eye camera
Applied Optics - Optics Technology 44 (2005) 15 p. 2949–2956, ISSN 0003-6935

Duparré, J.; Schreiber, P.; Matthes, A.; Pshenay-Severin, E.; Tünnermann, A.; Völkel, R.; Eisner, M.; Scharf, T.

Microoptical telescope compound eye
Optics Express 13 (2005) 3 p. 889–903, ISSN 1094-4087

Dziomba, T.; Flemming, M.; Duparré, A.; Koenders, L.; Wilkening, G.

Entwicklung einer Kalibrierrichtlinie für Rastersondenmikroskope
tm-Technisches Messen 72 (2005) 5 p. 295–307, ISSN 0171-8096

Feigl, T.

EUV Schwarzschild-Objektiv
Photonik 37 (2005) 3 S. 18, ISSN 1432-9778

Feigl, T.; Yulin, S.; Benoit, N.; Kaiser, N.

Multilayer optics for the EUV and soft X-Rays
Optics and Precision Engineering 13 (2005) 4 p. 421–428, ISSN 1004-924X

Ferrari, M.; Figulla, H. R.; Schlosser, M.; Tenner, I.; Frerichs, I.; Damm, C.; Guyenot, V.; Werner, G. S.; Hellige, G.

Transarterial aortic valve replacement with a self expanding stent in pigs
Heart 90 (2004) Nov. p. 0326–1331, ISSN 1355-6037

Fuchs, U.; Zeitner, U. D.; Tünnermann, A.
Ultra-short pulse propagation in complex optical systems
Optics Express 13 (2005) 10 p. 3852–3861, ISSN 1094-4087

Gorelik, T.; Kaiser, U.; Kuhlmann, Th.; Yulin, S.; Richter, W.

Structural characterization of ultra-thin Cr and Sc films for soft X-ray mirrors
Applied Surface Science 230 (2004) 1, p. 1–7, ISSN 0169-4332

Harz, M.; Danz, N.; Schäfer, B.

Miniaturisiertes SPR-Analysesystem
BioWorld, online erschienen im April 2005 (www.bioworld.ch)

Heger, P.; Stenzel, O.; Kaiser, N.

Design und Herstellung selektiver Dünnschichtabsorber auf Silberinselbasis
Vakuum in Forschung und Praxis 17 (2005) 4 S. 199–203, ISSN 0947-076X

Helm, R.; Mauroner, O.

New Firms from Research-based Spin-offs
University of Jena, Faculty of Economics, Jenaer Schriften zur Wirtschaftswissenschaft, (2005) 8 ISSN 1611-1311

- Iliew, R.; Etrich, C.; Peschel, U.; Lederer, F.; Augustin, M.; Fuchs, H.-J.; Schelle, D.; Tünnermann, A.
Diffractionless propagation of light in a low-index photonic-crystal film
Applied Physics Letters 85 (2005) 24 p. 5854–5856, ISSN 0003-6951
- Janicki, V.; Wilbrandt, S.; Stenzel, O.; Gäbler, D.; Kaiser, N.; Tikhonravov, M.; Amotchkina, T.
Hybrid optical coating design for omnidirectional antireflection purposes
Journal of Optics A: Pure and Applied Optics 7 (2005) 8 L9-L12, ISSN 1464-4258
- Kaiser, N.
Optical coatings - trends and challenges for the present and the future
Glass Coatings (2005) 3 p. 44–49
- Kaiser, N.; Feigl, T.; Stenzel, O.; Schulz, U.; Yang, M.
Optical Coatings: Trends and challenges
Optics and Precision Engineering 13 (2005) 4 p. 389–396, ISSN 1004-924X
- Kaless, A.; Munzert, P.; Schulz, U.; Kaiser, N.
Nano-motheye antireflection pattern by plasma treatment of polymers
Surface & Coating Technology 200 (2005) 1–4 p. 58–61, ISSN 0257-8972
- Leitel, R.; Stenzel, O.; Wilbrandt, S.; Gäbler, D.; Janicki, V.
Fabrication and characterization of rugate structures composed of SiO₂ and Nb₂O₅
Optics and Precision Engineering 13 (2005) 4 p. 505–511, ISSN 1004-924X
- Limpert, J.; Deguil-Robin, N.; Manek-Hönninger, I.; Salin, F.; Schreiber, T.; Liem, A.; Röser, F.; Zellmer, H.; Tünnermann, A.; Courjaud, A.; Hönninger, C.; Mottay, E.
High-power picosecond fiber amplifier based on nonlinear spectral compression
Optics Letters 30 (2005) 7 p. 714–716, ISSN 0146-9592
- Limpert, J.; Deguil-Robin, N.; Manek-Hönninger, I.; Salin, F.; Röser, F.; Liem, A.; Schreiber, T.; Nolte, S.; Zellmer, H.; Tünnermann, A.; Broeng, J.; Petersson, A.; Jakobsen, C.
High-power rod-type photonic crystal fiber laser
Optics Express 13 (2005) 4 p. 1055–1058, ISSN 1094-4087
- Michaelis, D.; Abdullaev, F. Kh.; Darmanyan, S. A.; Lederer, F.
The Ising-Bloch transition in the parametric Ginzburg-Landau equation with rapid perturbations
Physical Review E 71 (2005) 5 p. 056205, ISSN 1539-3755
- Munzert, P.; Schulz, U.; Kaiser, N.
Haftfeste Beschichtungen zur Entspiegelung von Polymethylmethacrylat
Merck Patinal Newsletter (2004)
- Nejadmalayeri, A. H.; Herman, P. R.; Burghoff, J.; Will, M.; Nolte, S.; Tünnermann, A.
Inscription of optical waveguides in crystalline silicon by mid-infrared femtosecond laser pulses
Optics Letters 30 (2005) 9 p. 964–966, ISSN 0146-9592
- Nielsen, C. K.; Ortac, B.; Schreiber, T.; Limpert, J.; Hohmuth, R.; Richter, W.; Tünnermann, A.
Self-starting self-similar all-polarization maintaining Yb-doped fiber laser
Optics Express 13 (2005) 23, 9346–9351, ISSN: 1094-4087
- Nolte, S.; Blömer, D.; Burghoff, J.; Szameit, A.; Will, M.; Tünnermann, A.
Ultrafast laser processing – novel options for photonic device production
Glass science and technology 78 C (2005) p. 141, ISSN 0946-7475
- Nolte, S.; Will, M.; Burghoff, J.; Tünnermann, A.
Ultrafast laser processing: New options for 3D photonic structures
Journal of Modern Optics 51 (2004) 16–18 p. 2533–42, ISSN 0950-0340
- Schreiber, P.; Kudaev, S.
Mikrooptik für LED-Lichtquellen
Photonik 37 (2005) 3 S. 80–82, ISSN 1432-9778
- Schreiber, T.; Schultz, H.; Schmidt, O.; Röser, F.; Limpert, J.; Tünnermann, A.
Stress-induced birefringence in large-mode-area micro-structured optical fibers
Optics Express 13 (2005) 10 p. 3637–3646, ISSN 1094-4087
- Schreiber, T.; Andersen, T. V.; Schimpf, D.; Limpert, J.; Tünnermann, A.
Novel details of supercontinuum generation in photonic crystal fibers
Optics Express 13 (2005) 23 p. 9556–9569, ISSN 1094-4087
- Schröder, S.; Gliech, S.; Duparré, A.
Streulichtanalyse für die Nanotechnik
Photonik 37 (2005) 1 S. 65–66, ISSN 1432-9778
- Schröder, S.; Gliech, S.; Duparré, A.
Measurement system to determine the total and angle resolved light scattering of optical components in the deep-ultraviolet and vacuum-ultraviolet spectral regions
Applied Optics 44 (2005) 29 p. 6093–6107, ISSN 0003-6935
- Schulz, U.; Munzert, P.; Kaiser, N.
Optical coating on transparent plastics
Vacuum's Best, Special Issue of the German journal "Vacuum in Research and Practice" (2005), p. 26–29
- Schulz, U.; Munzert, P.; Kaiser, N.
Optische Schichten für transparente Kunststoffe
Vakuum in Forschung und Praxis 16 (2004) 4 S. 183–186, ISSN: 0947-076X
- Schulz, U.; Munzert, P.; Kaless, A.; Kaiser, N.
Optical coating and nanostructuring on plastics
Optics and Precision Engineering 13 (2005) 4 p. 459–464, ISSN 1004-924X
- Streppel, U.; Michaelis, D.; Kowarschik, R.; Bräuer, A.
Modulational instability in systems with integrating nonlinearity
Physical Review Letters 95 (2005) 7 p. 1–4, ISSN 0031-9007
- Tünnermann, A.
High-power fiber lasers – present and future
Laser-Technik-Journal 2 (2005) 2 p. 54, ISSN 1613-7728
- Tünnermann, A.; Höfer, S.; Liem, A.; Limpert, J.; Reich, M.; Röser, F.; Schreiber, T.; Zellmer, H.; Peschel, T.; Guyenot, V.
Power scaling of high-power fiber lasers and amplifiers
Laser Physics 15 (2005) 1 p. 107–117, ISSN 1054-660X
- Tünnermann, A.; Schreiber, T.; Röser, F.; Liem, A.; Höfer, S.; Zellmer, H.; Nolte, S.; Limpert, J.
The renaissance and bright future of fibre lasers
Journal of Physics B: Atomic, Molecular and Optical Physics 38 (2005) 9 p. S681–S693, ISSN 0953-4075
- v. Hulst, F.; Geelen, P.; Gebhardt, A.; Steinkopf, R.
Diamantwerkzeuge für die Fertigung von mikrooptischen Bauelementen
IDR - Industrie Diamanten Rundschau 39 (2005) 1 S. 32–38, ISSN 0935-1469
- Wilbrandt, S.; Stenzel, O.; Gäbler, D.; Kaiser, N.
A hybrid algorithm for reengineering the refractive index profile for inhomogeneous coatings from optical in-situ broadband monitoring data
Optics and Precision Engineering 13 (2005) 4 p. 487–491, ISSN 1004-924X

Wise, S.; Quetschke, V.; Deshpande, A. J.; Mueller, G.; Reitze, D. H.; Tanner, D. B.; Whiting, B. F.; Chen, Y.; Tünnermann, A.; Kley, E.-B.; Clausnitzer, T.
Phase effects in the diffraction of light: Beyond the grating equation
Physical Review Letters 95 (2005) 1 p. 1–4, ISSN 0031-9007

Yang, M.; Gatto, A.; Kaiser, N.
Research and development of VUV optical coatings for micro mirrors applications
Optics and Precision Engineering 13 (2005) 4 p. 465–470, ISSN 1004-924X

Zeitner, U. D.; Dannberg, P.
On-axis diffractive elements with improved signal quality in the presence of fabrication errors and wavelength tolerances
Journal of Modern Optics 52 (2005) 15 p. 2051–2059, ISSN 0950-0340

Zeitner, U. D.
Laserlithografie für Mikrooptik auf gekrümmten Oberflächen
Laser Magazin (2005) 4 S. 25–26

Eingeladene Vorträge Invited Papers

Bräuer, A.
Mikrooptische Bilderfassungssysteme
Otti Profiforum »Design und Herstellung optischer Komponenten und Systeme aus Glas und Kunststoff«,
16.–17.11.2005, Regensburg, Deutschland

Gärtner, C.
Herstellung von Mikrofluidik-Chips – Anforderungen an die Messtechnik
AMA Praktiker-Seminar »Sensorik in der Mikro-Bauelemente-Fertigung«,
27.4.2005, Frankfurt, Deutschland

Gärtner, C.
Polymermikrotechnik – Anforderungen an die Messtechnik
PhotonicNet Forum »Mikrooptische Sensorik für die Fertigungsmesstechnik«,
30.6.2005, Göttingen, Deutschland

Kaiser, N.
Design optischer Schichtsysteme
Otti Profiforum »Schichten auf Glas«,
10.3.2005, Regensburg, Deutschland

Kaiser, N.
Optische Schichten – Trends und Herausforderungen
Materialforum, Umicore AG & Co. KG,
10.1.2005, Hanau-Wolfgang, Deutschland

Kaiser, N.
Schichtsysteme für kurze und extrem kurze Wellenlängen
Otti Profiforum »Schichten auf Glas«,
11.3.2005, Regensburg, Deutschland

Kaiser, N.; Stenzel, O.
Latest Advances in the Area of New Optical Film Systems
20th Congress of International Commission for Optics, 21.–26.8.2005, Changchun, China

Kley, E.-B.; Tünnermann, A.
Micro- and nano optics: design, manufacturing and application
4th Sino-German Symposium on Micro and Nano Technologies,
18.–20.4.2005, Braunschweig, Germany

Schulz, U.
Schichtdesign für Kunststoffoptik
Otti Profiforum »Design und Herstellung optischer Komponenten und Systeme aus Glas und Kunststoff«,
16.11.2005, Regensburg, Deutschland

Schulz, U.
Kratzfeste Antireflexbeschichtungen für Kunststoffe in der Optik
Süddeutsches Kunststoffzentrum, Seminar »Kratzfeste Beschichtungen auf Kunststoffen«,
2.3.2005, Peine, Deutschland

Schulz, U.; Munzert, P.; Kaless, A.; Kaiser, N.
Procedures to reduce reflection on polymer surfaces
Optics & Photonics,
31.7.–4.8.2005, San Diego, USA,
SPIE Proceedings Vol. 5872 (2005) p. 1–10, ISBN 0-8194-5877-5

Tünnermann, A.
Advanced micro and nano-optics
New frontiers in Optical Technologies,
15.–20.8.2005, Tampere, Finland

Tünnermann, A.
High power fiber lasers
New frontiers in Optical Technologies,
15.–20.8. 2005, Tampere, Finland

Tünnermann, A.
Faserlaser
Neueste Entwicklungen in der Lasertechnik,
Volkswagen AG,
20.–21.9.2005, Wolfsburg, Deutschland

Tünnermann, A.
Status and perspectives of fiber lasers and amplifiers
Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO-Europe),
12.–17.6.2005, München, Germany

Tünnermann, A.
Status and perspectives of fiber lasers and amplifiers
Sino-German Workshop: Advances in Diodes and Diode Pumped Lasers,
25.–30.9.2005, Beijing, China

Tünnermann, A.; Limpert, J.
High power ultrashort pulse fiber amplifiers
OptoNet-Workshop: Neue Laserstrahlquellen,
11.5.2005, Jena, Deutschland

Tünnermann, A.
Optische Technologie: Historie und Bedeutung in Deutschland
Licht im Norden,
18.8.2005, Neumünster, Deutschland

Tünnermann, A.
Photonische Nanostrukturen in Natur und Technik
Innovationsforum Photonik,
3.5.2005, Goslar, Deutschland

Uhlig, H.
Messung der Transmission und Reflexion optischer Schichten mit einem VN-Einsatz zum Lambda 900
9. Arbeitstreffen des AK DUV/VUV-Optik, Heraeus Quarzglas,
29.9.2005, Hanau, Deutschland

Zeitner, U. D.; Gräßler, C.
Optical Microstructures on Non-Planar Surfaces
DGG-Symposium Novel Optical Technologies Würzburg, Glass Science and Technology 78 C,
24.–25.5.2005, Würzburg, Germany
Novel optical technologies: proceedings of the 3rd DGG symposium held at the 79th annual meeting of the Deutsche Glastechnische Gesellschaft (2005) p. 131–136, ISBN 3-921089-42-5

Vorträge, Poster, Konferenzen Lectures, Posters, Conferences

Banse, H.; Eberhardt, R.; Beckert, E.
Laserstrahllöten - Technologie zum Aufbau optischer Systeme
50. Internationales Wissenschaftliches Kolloquium der TU Ilmenau,
19.–23.9.2005, Ilmenau, Deutschland, Proceedings und DVD S. 339–340, ISBN 3-932633-98-9

Banse, H.; Eberhardt, R.; Beckert, E.
Laser beam soldering - packaging technology for optical systems
Proceedings MICROSYSTEMS Technologies,
5.–6.10.2005, München, Germany, p. 118–125, ISBN 3-7723-7040-3

- Bayer, A.; Barkusky, F.; Peth, C.; Töttger, H.; Mann, K.; Feigl, T.; Kaiser, N.;
Imaging properties of different optics for EUV radiation
SPIE Europe International Symposium on Optical Systems Design, 12.–16.9.2005, Jena, Germany, SPIE Proceedings Vol. 5962 (2005), p. 223–234, ISBN 0-8194-5980-1
- Becker, H.; Gärtner, C.
Mail-Order Microfluidics – Initiating Novel Customers by Off-The-Shelf Products
COMS – Commercialization of Micro and Nano-Systems Conference, 21.–25.8.2005, Baden-Baden, Germany
Proceedings COMS – Commercialization of Micro and Nano-Systems Conference, 21.–25.8.2005, Baden-Baden, Germany
- Beckert, E.; Wippermann, F.; Eberhardt, R.; Buchmann, F.
Multifunctional optoelectronic systems on ceramic platforms
Proceedings Microsystems Technologies, 5.–6.10.2005, München, Germany
- Beckert, E.; Eberhardt, R.; Wippermann, F.
Ebene Keramiksubstrate für den Aufbau hybrid-optischer multifunktionaler Systeme
5. GMM/ITG/GI-Workshop »Multi-Nature Systems«: Optoelektronische, mechatronische und andere gemischte Systeme, 18.2.2005, Dresden, Deutschland, Tagungsband S. 69–73
- Beckert, E.; Eberhardt, R.; Wippermann, F.
Systemintegration optoelektronischer Baugruppen auf keramischen Substraten
Proceedings und DVD 50. Internationales Wissenschaftliches Kolloquium der TU Ilmenau, 19.–23.9.2005, Ilmenau, Deutschland, ISBN 3-932633-98-9
- Bischoff, M.; Stenzel, O.; Gäbler, D.; Kaiser, N.
Properties of chirped mirrors manufactured by plasma assisted electron beam evaporation
SPIE Europe International Symposium on Optical Systems Design, 12.–16.9.2005, Jena, Germany
- Bonati, G.; Hennig, P.; Wolff, D.; Voelckel, H.; Gabler, T.; Krause, U.; Tünnermann, A.; Liem, A.
High-power diode laser bars as pump sources for fiber lasers and amplifiers
SPIE Proceedings Vol. 5709 (2005) p. 78–87, ISBN 0-8194-5683-7
- Böhme, S.; Beckert, E.; Mohaupt, M.; Blank, G.; Schmidt, M.
Automatisiertes Greifen und Positionieren eines ultradünnen Interferenzfilterelements zur Integration in einem Optohybrid
Tagungsband Mikrosystemtechnik Kongress 2005, 10.–12.10.2005, Freiburg, Deutschland, S. 839–842, ISBN 978-3-8007-2926-5
- Bräuer, A.
Microoptical Systems
RICOH Atsugi und EPSON, 2.–4.3.2005, Tokyo, Japan
- Bräuer, A.
Primär- und Sekundäroptiken für LED-Strahlformung
GMM-Workshop, 2.–3.2.2005, Karlsruhe, Deutschland
- Bräuer, A.; Streppel, U.; Michaelis, D.; Kowarschik, R.
Self-organized pattern formation in UV-sensitive polymers
5th International Symposium on Modern Optics and its Applications (ISMOA 2005) 15.–19.08.2005, Bandung, Indonesia
- Bräuer, A.
Technologies at Fraunhofer IOF combining microoptical elements (μ OE) and MEMS
Fraunhofer Symposium, 19.10.2005, Sendai, Japan
- Bräuer, A.; Schreiber, P.; Duparré, J.; Dannberg, P.
Neue mikrooptische Sensoren zur Positions- und Objektbestimmung
17. Internationale Wissenschaftliche Konferenz der Hochschule Mittweida, 3.–4.11.2005, Mittweida, Deutschland
- Bräuer, A.; Tünnermann, A.
Glas-Mikrooptiken mit Nanometer-Präzision
Innovationsforum »Strukturierung von Gläsern«, 14.–15.2.2005, Barleben, Deutschland
- Bräuer-Burchardt, C.
Correcting lens distortion in 3D measuring systems using fringe projection
SPIE Europe International Symposium on Optical Systems Design, 12.–16.9.2005, Jena, Germany
SPIE Proceedings Vol. 5962 (2005) p. 155–165, ISBN 0-8194-5980-1
- Bräuer-Burchardt, C.
A new Methodology for Determination and Correction of Lens Distortion in 3D Measuring Systems Using Fringe Projection
27. DAGM-Symposium, 31.8.–2.9.2005, Wien, Austria
Lecture Notes in Computer Science Vol. 3663 (2005) p. 200–207
- Burghoff, J.; Will, M.; Nolte, S.; Tünnermann, A.; Nejdmalayeri, A. H.; Herman, P. R.
Photonics in silicon using mid-IR femtosecond pulses
SPIE Proceedings Vol. 5714 (2005) p. 245–252, ISBN 0-8194-5688-8
- Burkert, A.; Muehlig, Ch.; Triebel, W.; Keutel, D.; Natura, U.; Parthier, L.; Gliech, S.; Schroeder, S.; Duparre, A.
Investigating the ArF laser stability of CaF₂ at elevated fluences
Optics & Photonics 2005, 31.7.–4.8.2005, San Diego, USA
SPIE Proceedings Vol. 5878 (2005) p. 125–132, ISBN 0-8194-5883-X
- Buß, W.; Schreiber, P.; Brode, W.; Heymel, A.; Müller, E.; Barnitzek, F.; Pawlowski, B.; Kaschlik, K.
LTCC-Based Optical Elements for Opto-Electronic Applications
IMAPS-Conference, 12.–15.6.2005, Brugge, Belgium
- Duparré, J.; Bräuer, A.; Wippermann, F.
Mikrooptische Systeme für Bildaufnahmeverfahren – Funktionalität und Prototyping
Mikrosystemtechnik Kongress, 10.–12.10.2005, Freiburg, Deutschland
- Duparré, J.; Dannberg, P.; Bräuer, A.; Völkel, R.; Scharf, T.
Microoptical artificial compound eyes – two different concepts for compact imaging systems
11th Microoptics conference (MOC05), 30.10.–2.11.2005, Tokyo, Japan
Proceedings 11th Microoptics conference (MOC05), 30.10.–2.11.2005, Tokyo, Japan, L3 p.290–291
- Duparré, J.; Wippermann, F.; Dannberg, P.; Schreiber, P.; Bräuer, A.; Völkel, R.; Scharf, T.
Microoptical artificial compound eyes: from design to experimental verification of two different concepts
SPIE Europe International Symposium on Optical Systems Design, 12.–16.9.2005, Jena, Germany
- Duparré, J.; Wippermann, F.; Dannberg, P.; Schreiber, P.; Bräuer, A.; Völkel, R.; Scharf, T.
Microoptical artificial compound eyes – A promising approach for next generation ultra-compact machine vision
EOS Conference on Industrial Imaging and Machine Vision, 13.–15.6.2005, München, Germany, p. 9–10
- Duparré, J.; Wippermann, F.; Dannberg, P.; Schreiber, P.; Bräuer, A.; Völkel, R.; Scharf, T.
Microoptical artificial compound eyes: from design to experimental verification of two different concepts
SPIE Proceedings Vol. 5962 (2005) p. 704–715, ISBN 0-8194-5980-1
- Eberhardt, R.; Beckert, E.; Wippermann, F.; Banse, H.
Packaging of optoelectronic systems on ceramic platforms
Optonet workshop »Optopackaging«, 3.3.2005, Jena, Germany

- Eberhardt, R.; Steinkopf, R.; Gebhardt, A.
Mikrozerspanung zur Erzeugung finish-bearbeiteter Flächen
Interdisziplinäres Kooperationsforum, 16.3.2005, Gera, Deutschland
- Feigl, T.; Yulin, S.; Benoit, N.; Kaiser, N.
Multilayer optics for the EUV and soft X-rays
Sino-German High Level Expert Symposium on Optical Coatings, 17.–21.5.2005 Shanghai, China
- Feigl, T.; Yulin, S.; Benoit, N.; Kaiser, N.
XUV multilayer optics
Photonics Forum, Laser 2005, 16.06.2005, München, Deutschland
- Feigl, T.; Yulin, S.; Benoit, N.; Kaiser, N.
Laterally graded EUV multilayers
SPIE Europe International Symposium on Optical Systems Design, 12.–16.9.2005, Jena, Germany
- Feigl, T.; Yulin, S.; Benoit, N.; Kaiser, N.
EUV multilayer optics
MNE 2005 - international conference on micro- and nano-engineering, 19.–22.9.2005, Vienna, Austria
- Feigl, T.; Yulin, S.; Benoit, N.; Kaiser, N., Böwering, N.; Ershov, A.; Viatella, J.; Bruzzone, K.; Fomenkov, I.; Myers, D.
High-temperature multilayer coating of source collector mirror
Fourth International Extreme Ultra Violet Lithography (EUVL) Symposium, 7.–10.11.2005, San Diego, USA
- Feigl, T.; Yulin, S.; Benoit, N.; Kaiser, N.
Optische Komponenten für den XUV Spektralbereich
OptoNet Workshop Optische Schichten, 23. November 2005, Jena, Deutschland
- Flemming, M.; Roder, K.; Duparré, A.
Scanning force microscopy for optical surface metrology
SPIE Europe International Symposium on Optical Systems Design, 12.–16.9.2005, Jena, Germany
SPIE Proceedings Vol. 5965 (2005) p. 90–99, ISBN 0-8194-5983-6
- Fuchs, U.; Zeitner, U. D.; Tünnermann, A.
Optics for focusing of ultra-short laser pulses
SPIE Europe International Symposium on Optical Systems Design, 12.–16.9.2005, Jena, Germany
- Gärtner, C.
Innovative medical devices: challenges and opportunities
Medical Device Technology, Nanotechnology Workshop, 16.–17.2.2005, Birmingham, UK
- Gärtner, C.
Polymer-based microfluidic in-vitro-diagnostic chip as an example for a standardized fluidic platform
Microfluidics, BioMEMS and Medical Microsystems II, 25.–27.1.2005, San Jose, USA
- Gatto, A.; Heber, J.; Yang, M.; Benoit, N.; Yulin, S.; Feigl, T.; Kaiser, N.
New challenges for VUV-XUV radiation resistant coatings
SPIE Proceedings Vol. 5647 (2005) p. 1–8, ISBN 0-8194-5607-1
- Hofmann, A.; Götz, S.; Magdolen, U.; Schmitt, M.; Danz, N.; Diehl, P.
Charakterisierung von Implantationsoberflächen mittels SPR
Auftaktveranstaltung zum Programm »Nano for Life« des BMBF/VDI, 26.1.2005, Düsseldorf, Deutschland
- Janicki, V.; Lappschies, M.; Görtz, B.; Schallenberg, U.; Stenzel, O.; Kaiser, N.
Comparison of Gradient Index and Classical Designs of a Narrow Band Notch Filter
SPIE Europe International Symposium on Optical Systems Design, 12.–16.9.2005, Jena, Germany
- Kaiser, N.
Latest Advances in the Area of New Optical Film Systems
Universität Konstanz, CAP, 21.4.2005, Konstanz, Germany
- Kaless, A.; Schulz, U.; Kaiser, N.
Entspiegelung von PMMA durch einen Plasma-Ionenprozess
XII. Erfahrungsaustausch, Workshop »Oberflächentechnologie mit Plasma- und Ionenstrahlprozessen«, 16.–18.3.2005, Mühlleiten/Vogtland, Deutschland
- Kaless, A.; Schulz, U.; Kaiser, N.
Self-organized antireflective nanostructures on PMMA by ion etching
SPIE Europe International Symposium on Optical Systems Design, 12.–16.9.2005, Jena, Germany
SPIE Proceedings Vol. 5965 (2005) p. 525–533, ISBN 0-8194-5983-6
- Kalkowski, G.; Risse, S.
Precision Electrostatic Chucks for Future Lithography Tools
Optonet workshop "Lithography for Photonics", 14.–15.4.2005, Jena, Germany
- Kalkowski, G.; Risse, S.; Müller, S.; Harnisch, G.
Electrostatic Chucks for EUV masks
International conference on micro-and nano-engineering (MNE) 19.–22.9.2005, Vienna, Austria
- Kärcher, B.; Plischke, N.; Schreiber, P.; Radtke, D.; Buß, W.; Rosenberger, R.; Fischer, A.; Woldt, G.; Fritzlär, St.; Schwarz, O.
Mikrooptischer Positionssensor
Mikrosystemtechnik Kongress 2005, 10.–12.10.2005, Freiburg, Deutschland
- Kudaev, S.; Schreiber, P.
Automated optimization of non-imaging optics for luminaires
SPIE Europe International Symposium on Optical Systems Design, 12.–16.9.2005, Jena, Germany
SPIE Proceedings Vol. 5962 (2005) p. 87–95, ISBN 0-8194-5980-1
- Kudaev, S.; Schreiber, P.
Optimization of symmetrical free-shape non-imaging concentrators for LED light source applications
Optics & Photonics 2005, 31.7.–4.8.2005, San Diego, USA
SPIE Proceedings Vol. 5942 (2005) p. 82–91, ISBN 0-8194-5947-X
- Kühmstedt, P.
Bedeutung der Datenaufbereitung in der Prozesskette der 3D-Messung
Fachtagung »Innovation Werkzeug- und Formenbau«, 11.–12.5.2005, TU Darmstadt, Deutschland
- Kühmstedt, P.; Notni, G.; Bauer, N.; Berndt, D.
"Visionarium" - Distributed Virtual Linked 3D-Measurement Workplaces at Fraunhofer Institute IMEKO Symposium, 21.–24.9.2005, Ilmenau, Germany
- Kühmstedt, P.; Bräuer-Burchardt, C.; Palme, M.; Notni, G.
Optimised projection lens for the use in digital fringe projection
FRINGE'05 5. International Workshop on Automatic Processing of Fringe Patterns, 11.–14.9.2005, Stuttgart, Germany
Proceedings FRINGE'05 (2005) p. 676–681, ISBN 3-540-26037-4
- Kühmstedt, P.; Heinze, M.; Himmelreich, M.; Bräuer-Burchardt, C.; Brakhage, P.; Notni, G.
Optical 3D sensor for large objects in industrial application
SPIE International Symposium "Optical Metrology", 12.–16.6.2005, München, Germany
SPIE Proceedings Vol. 5856 (2005) p. 118–127, ISBN 0-8194-5856-2
- Lau, K.; Schulz, U.; Kaiser, N.
Organically modified SiO₂ coatings on polycarbonate
SPIE Europe International Symposium on Optical Systems Design 2005, 12.–16.9.2005, Jena, Germany

- Leitel, R.; Stenzel, O.; Wilbrandt, S.; Gäbler, D.; Janicki, V.
Fabrication and characterization of rugate structures composed of SiO₂ and Nb₂O₅
Sino-German High Level Expert Symposium on Optical Coatings, 17.–21.5.2005 Shanghai, China
- Leitel, R.; Janicki, V.; Gäbler, D.; Wilbrandt, S.; Stenzel, O.; Kaiser, N.
Design and fabrication of hybrid coatings composed of homogeneous layers and linear refractive index gradients
SPIE Europe International Symposium on Optical Systems Design, 12.–16.9.2005, Jena, Germany
- Leitel, R.; Kaless, A.; Petschulat, J.; Schulz, U.; Stenzel, O.; Kaiser, N.
Optical properties of stochastic subwavelength surface structures
SPIE Europe International Symposium on Optical Systems Design, 12.–16.9.2005, Jena, Germany, SPIE Proceedings Vol. 5965 (2005) p. 534–543, ISBN 0-8194-5983-6
- Mann, K.; Barkusky, F.; Bayer, A.; Peth, C.; Töttger, H.; Feigl, T.; Kaiser, N.
Compact source and beam delivery system for EUV radiation
SEMATECH Source Workshop, 27.02.05, San Jose, USA
- Mann, K.; Barkusky, F.; Bayer, A.; Peth, C.; Töttger, H.; Feigl, T.; Kaiser, N.
Compact source and beam delivery system for EUV radiation using a Schwarzschild objective
Laser-Generated, Synchrotron, and Other Laboratory X-Ray and EUV Sources, Optics, and Applications II, 31.7.–4.8.2005, San Diego, USA
SPIE Proceedings Vol. 5918 (2005) p. 114–128, ISBN 0-8194-5923-2
- Mauroner, O.; Scharf, F.
Spin-offs aus der öffentlichen Forschung. Eine empirische Analyse möglicher Konflikte zwischen Inkubator und Spin-off
G-Forum Jahreskonferenz 2005, 9. Interdisziplinäre Jahreskonferenz zur Gründungsforschung, 10.–11.11.2005, Jena, Deutschland
- Michaelis, D.; Streppel, U.; Kowarschik, R.; Bräuer, A.
Modulational Instability Due to an Irreversible, Nonlinear Process
CD Proceedings Nonlinear Guided Waves and Their Applications, OSA Technical Digest, Meeting Edition (Optical Society of America, Washington DC, 2005), Dresden, Germany, (2005) TuB3, ISBN 1-55752-791-1
- Mohaupt, M.; Eberhardt, R.; Damm, C.; Peschel, T.; Tünnermann, A.; Döring, H.-J.; Haugeneder, E.; Brandstätter, C.
Assembly of an Aperture Plate System for Projection Mask-Less Lithography (PML2)
International Conference on Micro- and Nano-Engineering, 19.–22.9.2005, Vienna, Austria
- Mohaupt, M.; Eberhardt, R.; Damm, C.; Peschel, T.; Tünnermann, A.; Döring, H.-J.; Haugeneder, E.; Brandstätter, C.
Assembly of an Aperture Plate System for Projection Mask-Less Lithography (PML2)
Workshop "Lithography for Photonics" IOF, 15.4.2005, Jena, Germany
- Munkelt, C.; Kühmstedt, P.; Heinze, M.; Süße, H.; Notni, G.
How to detect object-caused illumination effects in 3D
SPIE International Symposium "Optical Metrology", 12.–16.6.2005, München, Germany
SPIE Proceedings Vol. 5856 (2005) p. 632–639, ISBN 0-8194-5856-2
- Nagel, T.; Gajovi-Eichelmann, N.; Danz, N.; Bier, F.
A new polymer coating for SPR Chips
GBM Herbsttagung, 18.–21.9.2005, Berlin/Potsdam, Germany
- Notni, G.; Kühmstedt, P.
Triangulationsbasierte Verfahren - Lichtschnitt und Streifenprojektionstechniken
VDI-Wissensforum Optische 3D-Messtechnik für die Qualitätssicherung, 30.6.–1.7.2005, Magdeburg, Deutschland
- Notni, G.; Kühmstedt, P.; Heinze, M.; Munkelt, C.; Himmelreich, M.
Self calibrating fringe projection setups for industrial use
FRINGE'05 5. International Workshop on Automatic Processing of Fringe Patterns, 11.–14.9.05, Stuttgart, Germany
FRINGE'05, Proceedings (2005) p. 436–441, ISBN 3-540-26037-4
- Peschel, T.; Banse, H.; Damm, C.
Mounting an EUV Schwarzschild microscope lens
SPIE Europe International Symposium on Optical Systems Design, 12.–16.9.2005, Jena, Germany
- Ratteit, J.; Schröder, S.; Gliech, S.; Duparré, A.
Texture analysis of ultra-precision optical surfaces
SPIE Europe International Symposium on Optical Systems Design, 12.–16.9.2005, Jena, Germany
- Reich, M.; Liem, A.; Zellmer, H.; Tünnermann, A.
High-power fiber lasers and amplifiers - Perspectives and limitations
SPIE Proceedings Vol. 5777 (2005) p. 398–403, ISBN 0-8194-5760-4
- Reichel, V.; Mörl, K.; Unger, S.; Jetschke, S.; Müller, H.-R.; Kirchhof, J.; Sandrock, T.; Harschack, A.; Liem, A.; Limpert, J.; Zellmer, H.; Tünnermann, A.
Fiber-laser power scaling beyond the 1-kilowatt level by Nd:Yb co-doping
SPIE Proceedings Vol. 5777 (2005) p. 404–407, ISBN 0-8194-5760-4
- Riehemann, S.; Palme, M.; Kühmstedt, P.; Notni, G.
Miniaturized Projection Systems with OLED Microdisplays-Approaches for Industrial Measurement
Proceedings SID International Symposium, 22.–27.5.2005, Boston, USA, p. 547–549, ISSN 0005-0966X
- Riehemann, S.; Palme, M.; Lippmann, U.; Wolf, N.; Notni, G.
System concept and optical design of miniaturized projection and imaging systems with OLED microdisplays
SPIE Europe International Symposium on Optical Systems Design, 12.–16.9.2005, Jena, Germany, SPIE Proceedings Vol. 5962 (2005) p. 270–279, ISBN 0-8194-5980-1
- Risse, S.
Sphärische Luftlager - Präzision für den optischen Gerätebau
50. Internationales Wissenschaftliches Kolloquium der TU Ilmenau, 19.–23.9.2005, Ilmenau, Deutschland
Proceedings und DVD (2005) S. 97–98, ISBN 3-932633-98-9
- Rohde, M.; Risse, S.
Automatisierte Höchstpräzisionsfertigungstechnologie für Mikrooptik-Baugruppen
50. Internationales Wissenschaftliches Kolloquium der TU Ilmenau, 19.–23.9.2005, Ilmenau, Deutschland
Proceedings und DVD (2005) S. 69–70, ISBN 3-932633-98-9
- Rudisill, J. E.; Duparré, A.; Schröder, S.
Determination of scattering losses in ArF* excimer laser all-dielectric mirrors for 193 nm microlithography application
SPIE Proceedings Vol. 5647 (2005) p. 9–22, ISBN 0-8194-5607-1
- Schenk, C.; Risse, S.
Investigation on gas bearings operable in high vacuum environment for engineering at nanoscale
5th international conference and 7th annual general meeting, 8.–11.5.2005, Montpellier, France
Proceedings euspen 5th international conference and 7th annual general meeting, 8.–11.5.2005, Montpellier, France (2005) p. 121–124, ISBN 92-990035-0-5

- Schenk, C.; Risse, S.
Untersuchungen an ebenen aerostatischen Gaslagerelementen für hochvakuum-taugliche Präzisionsführung
50. Internationales Wissenschaftliches Kolloquium der TU Ilmenau, Deutschland
19.–23.9.2005, Ilmenau, Deutschland
Proceedings und DVD S. 63–64,
ISBN 3-932633-98-9
- Schreiber, P.
Optische Anwendungen transmittiver Keramik
Interdisziplinäres Kooperationsforum,
16.3.2005, Gera, Deutschland
- Schreiber, P.; Höfer, B.; Dannberg, P.; Zeitner, U. D.
High-brightness fiber-coupling schemes for diode laser bars
Optics & Photonics 2005,
31.7.–4.8.2005, San Diego, USA
- Schreiber, P.; Dannberg, P.; Höfer, B.; Beckert, E.
Chirped microlens arrays for diode laser beam circularization and beam expansion
Optics & Photonics,
31.7.–4.8.2005, San Diego, USA
- Schreiber, P.; Kudaev, S.; Dannberg, P.; Zeitner, U. D.
Homogeneous LED-illumination using microlens arrays
Optics & Photonics 2005,
31.7.–4.8.2005, San Diego, USA
SPIE Proceedings Vol. 5942 (2005) p. 188–196,
ISBN 0-8194-5947-X
- Schreiber, T.; Liem, A.; Roeser, F.; Zellmer, H.; Tünnermann, A.; Limpert, J.; Deguil-Robin, N.; Manek-Honninger, I.; Salin, F.; Courjaud, A.; Honninger, C.; Mottay, E.
High-power picosecond pulses by SPM-induced spectral compression in a fiber amplifier
SPIE Proceedings Vol. 5709 (2005) p. 32–36,
ISBN 0-8194-5683-7
- Schreiber, T.; Roeser, F.; Liem, A.; Limpert, J.; Zellmer, H.; Tünnermann, A.
High-average power femtosecond parabolic pulse fiber amplifier (Best Student Paper Award)
SPIE Proceedings Vol. 5709 (2005) p. 27–31,
ISBN 0-8194-5683-7
- Schröder, S.; Gliech, S.; Duparré, A.
Sensitive and flexible light scatter techniques from the VUV to IR regions
SPIE Europe International Symposium on Optical Systems Design, 12.–16.9.2005, Jena, Germany
SPIE Proceedings Vol. 5965 (2005) p. 424–432,
ISBN 0-8194-5983-6
- Schröder, S.; Kamprath, M.; Duparré, A.
Scatter analysis of optical components from 193 nm to 13.5 nm
Optics & Photonics,
31.7.–4.8.2005, San Diego, USA
SPIE Proceedings Vol. 5878 (2005) p. 232–240,
ISBN 0-8194-5883-X
- Schröder, S.; Ratteit, J.; Gliech, S.
Surface texture investigation of ultra-precision optical components
Optics & Photonics 2005,
31.7.–4.8.2005, San Diego, USA
SPIE Proceedings Vol. 5878 (2005) p. 304–311,
ISBN 0-8194-5883-X
- Schröder, S.; Uhlig, H.; Duparré, A.; Kaiser, N.
Nanostructure and optical properties of fluoride films for high-quality DUV/VUV optical components
SPIE Europe International Symposium on Optical Systems Design,
12.–16.9.2005, Jena, Germany
SPIE Proceedings Vol. 5963 (2005) p. 231–240,
ISBN 0-8194-5981-X
- Schulz, U.
Scratch resistant coatings AR-hard® for plastic lenses
Manufacturers Forum - The Congress
20.10.2005, Paris, France
- Schulz, U.
Mechanische Eigenschaften von Antireflexschichten AR-hard® auf Kunststoffen
Congress Industrielle Oberflächentechnik,
22.2.2005, Braunschweig, Deutschland
- Schulz, U.
Optical coating on plastics
SPIE Europe International Symposium on Optical Systems Design 2005,
12.–16.9.2005, Jena, Germany
- Schulz, U.
Optical coating on plastics
Laser 2005, 14.6.2005, München, Germany
- Schulz, U.; Kaless, A.; Leitel, R.; Kaiser, N.
Oberflächenmodifizierung von PMMA durch Ionenätzen
13. Ndvak (Neues Dresdner Vakuumtechnisches Kolloquium),
13.–14.10.2005, Dresden, Deutschland
Proceedings 13. Ndvak, S. 82–85
- Schulz, U.; Munzert, P.; Kaless, A.; Kaiser, N.
Optical coating and nanostructuring on plastics
Sino-German High Level Expert Symposium on Optical Coatings,
17.–21.5.2005 Shanghai, China
- Sidorin, Y.; Wächter, C. (Editors)
Integrated Optics: Devices, Materials, and Technologies IX
SPIE Proceedings Vol. 5728 (2005)
ISBN 0-8194-5702-7
- Stenzel, O.; Heger, P.; Bischoff, M.; Wilbrandt, S.; Kaiser, N.
Novel optical coating concepts
Nanomeeting, 24.–27.5.2005 Minsk, Belarus
Proceedings Nanomeeting,
24.–27.5.2005 Minsk, Belarus, p. 28–35,
ISBN 981-256-288-5
- Streppel, U.; Michaelis, D.; Bräuer, A.; Kowarschik, R.
Self-organized pattern formation in UV sensitive polymers
ICOPE 2005 & ICONO 8,
7.–11.3.2005, Sendai, Japan
- Streppel, U.; Michaelis, D.; Bräuer, A.; Trompeter, H.; Peschel, U.; Pertsch, T.; Lederer, F.
Experimental and theoretical investigations in inhomogeneous polymer waveguide arrays
8th International Conference on Frontiers of Polymers and Advanced Materials (ICFPAM),
22.–28.4.2005, Cancun, Quintana Roo, Mexico
- Streppel, U.; Michaelis, D.; Bräuer, A.; Kowarschik, R.
Impact of modulational instability of partially coherent light in photosensitive optical polymers on the fabrication of optical microstructures
SPIE Proceedings Vol. 5724 (2005) p. 50–61,
ISBN 0-8194-5698-5
- Thielsch, R.; Heber, J.; Uhlig, H.; Kaiser, N.
Optical, structural, and mechanical properties of gadolinium tri-fluoride thin films grown on amorphous substrates
SPIE Europe International Symposium on Optical Systems Design, 12.–16.9.2005, Jena, Germany
SPIE Proceedings Vol. 5963 (2005) p. 211–222,
ISBN 0-8194-5981-X
- Trompeter, H.; Streppel, U.; Michaelis, D.; Bräuer, A.; Peschel, U.; Pertsch, T.; Lederer, F.
Experimental and theoretical investigations on localized states in waveguide arrays
SPIE Proceedings Vol. 5728 (2005), p. 44–53,
ISBN 0-8194-5702-7
- Trompeter, H.; Michaelis, D.; Streppel, U.; Peschel, U.; Pertsch, T.; Bräuer, A.; Lederer, F.
Inhomogeneous Waveguide Arrays
12th European Conference on Integrated Optics ECIO, 6.–8.4.2005, Grénoble, France
Proceedings 12th European Conference on Integrated Optics 2005, ECIO Technical Digest, Grenoble, France, WeB1-3

- Trompeter, H.; Peschel, U.; Pertsch, T.; Lederer, F.; Streppel, U.; Michaelis, D.; Bräuer, A.
Photonic Zener tunnelling
Conference on Lasers and Electro-Optics 2005 (CLEO), 23.–27.5.2005, Baltimore, USA
Proceedings Conference on Lasers and Electro-Optics CLEO 2005, OSA Technical Digest, QFA2, ISBN 0-7803-6319-3
- Tünnermann, A.; Röser, F.; Schreiber, T.; Limpert, J.; Liem, A.; Reich, M.; Höfer, S.; Zellmer, H.; Burghoff, J.; Will, M.; Nolte, S.
Micro- and nano-structured optical fibers - Artificial media for amplification of light
Materials Research Society Symposium Proceedings Vol. 850 (2005) p. 79–87
- Tünnermann, A.; Höfer, S.; Liem, A.; Limpert, J.; Reich, M.; Röser, F.; Schreiber, T.; Zellmer, H.
High-power fiber lasers and amplifiers
SPIE Proceedings Vol. 5620 (2004) p. 137–143, ISBN 0-8194-5573-3
- Tünnermann, A.; Nolte, S.; Zellmer, H.
Fiber lasers and amplifiers: novel avenues to real world applications of ultrashort lasers
SPIE Proceedings Vol. 5662 (2004) p. 488–495, ISBN 0-8194-5623-3
- Tünnermann, A.; Risse, S.; Peschel, T.; Eberhardt, R.
Opto-mechanische Systeme in höchster Präzision für Luft- und Raumfahrtanwendungen
Steinbeis-Tag 2005, Symposium Mikro- und Nanotechnologie, 30.9.2005, Stuttgart, Deutschland
- Uhlig, H.; Thielsch, R.; Heber, J.; Kaiser, N.
Lanthanide tri-fluorides: a survey of the optical, mechanical and structural properties of thin films with emphasis of their use in DUV-VUV-spectral range
SPIE Europe International Symposium on Optical Systems Design, 12.–16.9.2005, Jena, Germany
SPIE Proceedings Vol. 5963 (2005) p. 199–210, ISBN 0-8194-5981-X
- Wächter, C.
New Developments in R&D
Photonics made in Germany - International Business Luncheon, 21.1.2005, Photonics West San José, USA
- Wächter, C.; Bräuer, A.
Mikrooptische Systeme in der Sensorik
GMM-Workshop, 2.–3.2.2005, Karlsruhe, Deutschland
- Wächter, C.; Michaelis, D.
Modelling of high-index waveguide coupling
International Workshop on Optical Waveguide Theory and Numerical Modeling OWTNM, 8.–9.4.2005, Grénoble, France
- Wächter, C.; Benkenstein, T.; Höfer, B.; Matthes, A.; Michaelis, D.
Fiber-chip coupling with silicon micro-lenses
SPIE Proceedings Vol. 5728 (2005) p. 54–59, ISBN 0-8194-5702-7
- Wächter, C.; Michaelis, D.
Analysis of fiber-chip coupling for general high index contrast waveguides
SPIE Proceedings Vol. 5579 (2005) p. 266–276, ISBN 0-8194-5528-8
- Wilbrandt, S.; Stenzel, O.; Gäbler, D.; Kaiser, N.
Re-engineering of inhomogeneous coatings based on in-situ optical broadband monitoring data
SPIE Europe International Symposium on Optical Systems Design, 12.–16.9.2005, Jena, Germany
- Wilbrandt, S.; Stenzel, O.; Gäbler, D.; Kaiser, N.
A hybrid algorithm for reengineering the refractive index profile for inhomogeneous coatings from optical in-situ broadband monitoring data
Sino-German High Level Expert Symposium on Optical Coatings, 17.–21.5.2005, Shanghai, China
- Will, M.; Burghoff, J.; Nolte, S.; Tünnermann, A.; Wunderlich, F.; Goetz, K.
Detailed investigations on femtosecond induced modifications in crystalline quartz for integrated optical applications
SPIE Proceedings Vol. 5714 (2005) p. 261–270, ISBN 0-8194-5688-8
- Wippermann, F.; Duparré, J.; Schreiber, P.; Dannberg, P.
Design and fabrication of a chirped array of refractive ellipsoidal micro-lenses for an apposition eye camera objective
SPIE Proceedings Vol. 5962 (2005) p. 723–733, ISBN 0-8194-5980-1
- Wippermann, F.; Duparré, J.; Schreiber, P.; Dannberg, P.
Design and fabrication of a chirped array of refractive ellipsoidal micro-lenses for an apposition eye camera objective
SPIE Europe International Symposium on Optical Systems Design, 12.–16.9.2005, Jena, Germany
- Yang, M.; Gatto, A.; Kaiser, N.
Metal enhanced highly reflecting optical coatings for the spectral range from Vacuum UV to Near IR
20th Congress of International Commission for Optics 21.–26.8.2005, Changchun, China (2005) 1100-100
- Yang, M.; Gatto, A.; Kaiser, N.
Research development of VUV optical coatings for micro mirrors application
Sino-German High Level Expert Symposium on Optical Coatings, 17.–21.5.2005 Shanghai, China
- Yang, M.; Gatto, A.; Kaiser, N.; Schmidt, J. U.; Sandner, T.; Heber, J.; Schenk, H.; Lakner, H.
VUV optical coatings for the next-generation micro-mechanical mirrors
SPIE Proceedings Vol. 5963 (2005) p. 576–582, ISBN 0-8194-5981-X
- Yang, M.; Gatto, A.; Kaiser, N.
Aluminium-enhanced optical coatings for the VUV spectral range
SPIE Europe International Symposium on Optical Systems Design, 12.–16.9.2005, Jena, Germany
- Yang, M.; Gatto, A.; Kaiser, N.
VUV spectroscopy for photo masks characterization at 193 nm
SPIE Europe International Symposium on Optical Systems Design, 12.–16.9.2005, Jena, Germany
- Yulin, S.; Benoit, N.; Feigl, T.; Kaiser, N.
High-temperature multilayers
SPIE 30th International Symposium Microlithography 26.2.–4.3.2005, San Jose, USA
SPIE Proceedings Vol. 5751 (2005) p. 1155–1162, ISBN 0-8194-5983-6
- Yulin, S.; Benoit, N.; Feigl, T.; Kaiser, N.
Interface-engineered EUV multilayer mirrors
SPIE Europe International Symposium on Optical Systems Design, 12.–16.9.2005, Jena, Germany
SPIE Proceedings Vol. 5965 (2005) p. 253–259, ISBN 0-8194-5983-6
- Yulin, S.; Feigl, T.; Kaiser, N.
High-performance Cr/Sc multilayers for the soft x-ray range
SPIE Europe International Symposium on Optical Systems Design, 12.–16.9.2005, Jena, Germany
SPIE Proceedings Vol. 5965 (2005) p. 528-534, ISBN 0-8194-5983-6
- Yulin, S.; Benoit, N.; Feigl, T.; Kaiser, N.; Böwering, N.; Viatella, J.; Ershov, A.
High-temperature multilayer coatings for EUVL condenser optics
4th Annual EUVL Symposium on the technology and infrastructure of EUV lithography, 7.11.2005, San Diego, USA
- Yulin, S.; Feigl, T.; Benoit, N.; Kaiser, N.
Interface-engineered EUV multilayer coatings
MNE 2005 - international conference on micro- and nano-engineering, 19.–22.9.2005, Vienna, Austria
- Zeitner, U. D.
Micro-Structured Laser Optics
Laser 2005 World of Photonics, 13.–16.6.2005, München, Germany

Der Weg zu uns

How to reach us

Der Weg zu uns

Bahn/Busverbindung

(ca. 20 Minuten inkl. Gehweg)

Ab Bahnhof Jena-Paradies (Nord-Südverbindung) ca. 5 Minuten Fußweg in die Innenstadt. Von dort aus ab Teichgraben mit den Linien 10, 13 oder 40 in Richtung Burgau oder Winzerla. An der Haltestelle »Beutenberg Campus« aussteigen und der Ausschilderung folgen.

Ab Westbahnhof (Ost-Westverbindung) ca. eine Minute zur Haltestelle Magdelstieg, dann die gleiche Busverbindung nutzen.

Auto

Autobahn A 4 bis Abfahrt Jena-Göschwitz. Auf der Bundesstraße B 88 stadteinwärts, links in Richtung Winzerla, entlang der Winzerlaer Straße immer der Ausschilderung »Fachhochschule – Beutenberg Campus« folgen. Auf der linken Seite liegt dann sichtbar das Fraunhofer IOF. Benutzen Sie die Einfahrt Beutenberg Campus, von dort aus folgen Sie der Ausschilderung.

Flugzeug

Ab Flughafen Leipzig/Halle auf der Autobahn A 9 nach Süden bis zum Hermsdorfer Kreuz und dann auf die A 4 Richtung Frankfurt wechseln; diese dann bei Jena-Göschwitz verlassen, weiter siehe Auto. Oder ab Flughafen Erfurt auf der Autobahn A 4 Richtung Dresden bis Abfahrt Jena-Göschwitz.

How to reach us

By train

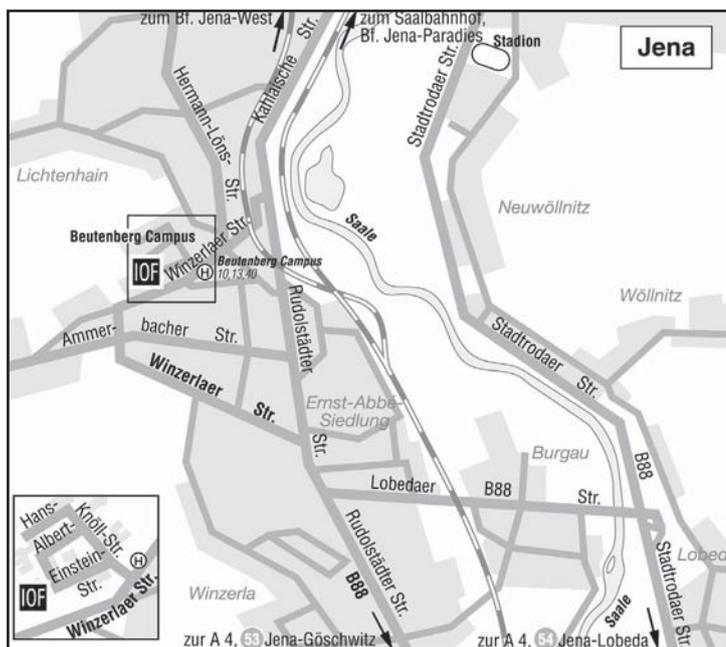
(app. 20 minutes with footpath) Jena have four stations. If you take the route from north to south you will arrive at the station Jena-Paradiesbahnhof. Please go to the bus stop on Teichgraben (5 minutes into the city) and take the Number 10, 13 or 40 direction Burgau or Winzerla. Step off the bus at "Beutenberg Campus" und follow the direction sign to Fraunhofer IOF. If you take the route from west to east, leave the train at Jena-Westbahnhof. After the bridge on the right hand you will see the bus stop Magdelstieg. Use the same lines to Beutenberg-Campus.

By car

Leave the A4 motorway at the exit Jena-Göschwitz, follow the federal highway B 88 into town, turn off left toward Winzerla, along Winzerlaer road always the direction sign "Fachhochschule – Beutenberg Campus". On the left side you will see the Fraunhofer IOF. Use the gateway Beutenberg Campus and follow the direction sign.

By airplane

Starting from airport Leipzig/ Halle on the A 9 motorway to the south (direction Munich) up to the Hermsdorfer Kreuz. Here you have to change the motorway, follow the A 4 motorway westward (direction Frankfurt) and leave it at the exit Jena-Göschwitz, further see car. Or starting from airport Erfurt on the A4 motorway direction Dresden to exit Jena Göschwitz.



Herausgeber/Editor

Fraunhofer-Institut für
Angewandte Optik und Feinmechanik
Beutenberg Campus
Albert-Einstein-Straße 7
07745 Jena
Telefon: +49 (0) 36 41/8 07-0
Fax: +49 (0) 36 41/8 07-6 00
E-Mail: info@iof.fraunhofer.de
Internet: www.iof.fraunhofer.de

Institutsleiter/Director

Prof. Dr. Andreas Tünnermann
Telefon: +49 (0) 36 41/8 07-2 01
E-Mail: andreas.tuennermann@iof.fraunhofer.de

Strategie/Marketing/Koordination Strategy/Marketing/Coordination

Dr. Brigitte Weber
Telefon: +49 (0) 36 41/8 07-4 40
E-Mail: brigitte.weber@iof.fraunhofer.de

Redaktion/Editorial staff

Dr. Brigitte Weber
Sylvia Bathke

Gestaltung und Druck/ Graphic design and Print

Schneider Media GmbH
Haarbergstraße 47
99097 Erfurt

Bildnachweis/ Photo acknowledgments:

Seite 6:

Linke Spalte, 2. Bild von oben:
FSU Jena, IAP

Oben, von links nach rechts (1.–4. Bild):
FSU Jena, IAP

Seite 7:

Oben, von links (3.–5. Bild):
FSU Jena, IAP; DFG, Fotostudio Querbach;
FSU Jena, IAP

Rechte Spalte, von oben nach unten:
DFG, Fotostudio Querbach;
Photonik, Eva Rosenthal; Fraunhofer IOF;
FSU Jena, Physikalisch-Astronomische Fakultät

Seite 8:

Linke Spalte unten (4. Bild):
FSU Jena, IAP

Seite 10:

Linke Spalte, 3. Bild von oben:
OptoNet e.V.

Oben, 1. Bild von links:
OptoNet e.V.

Seite 15:

Rechte Spalte, 1. Bild von oben:
FSU Jena, IAP

Seite 20:

von links nach rechts:
Fraunhofer FEP; Fraunhofer ILT; Fraunhofer IOF

Seite 21:

von links nach rechts:
Fraunhofer IPM; Fraunhofer IST; Fraunhofer IWS

Seite 51:

Abb. 1 und Abb. 2: FSU Jena, IAP

Seite 53:

Abb. 2: FSU Jena, IAP

Seite 56:

Abb. 1: FSU Jena, IAP

Seite 57:

Abb. 2: FSU Jena, IAP

Seite 58:

Abb. 3: FSU Jena, IAP

Seite 68:

Abb. 2: FSU Jena, IAP

Seite 69:

Abb. 1 und Abb. 3: FSU Jena, IAP

Seite 76:

Abb. 1: Blaupunkt GmbH

Alle anderen Bilder/all of the other pictures:
Fraunhofer IOF

