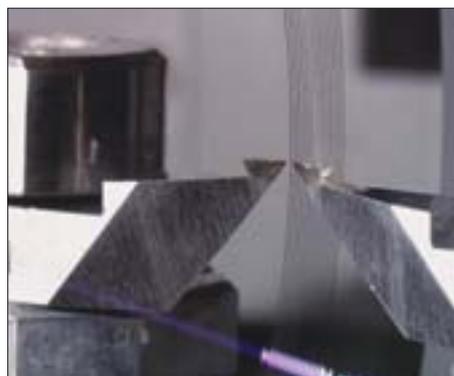
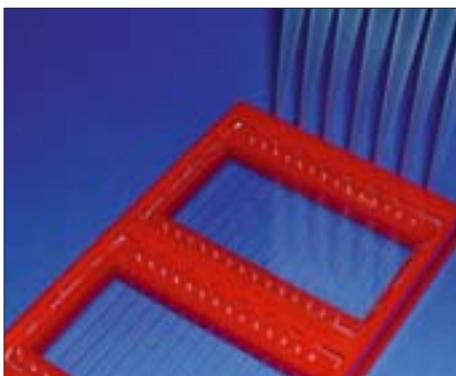
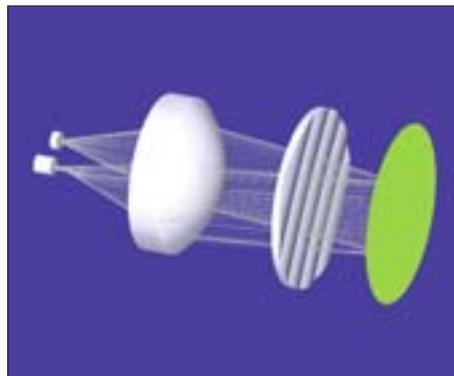
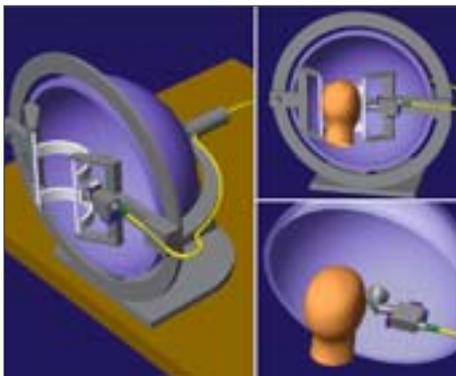




Fraunhofer Institut
Angewandte Optik
und Feinmechanik

Jahresbericht Annual Report 2003



Jahresbericht 2003
Fraunhofer-Institut
für Angewandte Optik
und Feinmechanik

Annual Report 2003
Fraunhofer Institute
for Applied Optics and
Precision Engineering

Inhalt

Vorwort	4
Institutsprofil	6
Kuratorium	8
Organisationsstruktur/Kontakte	10
Kernkompetenzen des Fraunhofer IOF und Fraunhofer IOF Statistik	12
Wichtige Ereignisse und Auszeichnungen im Jahr 2003	14
Die Fraunhofer-Gesellschaft	16
Ausgewählte Ergebnisse	18
Diamantdrehen mikrooptischer Strukturen	20
Geprägte Glaskeramik für optische und optoelektronische Anwendungen	26
Entwicklung einer Spezialsputteranlage für EUV-Optiken	30
Beschichtungen für Mikrospiegelarrays	34
Rugatefilter für den nahen infraroten und visuellen Spektralbereich	38
AR-hard® – Beschichtung mit einstellbarer spektraler Bandbreite für Kunststoffoptik	42
Maßschneidern geführter Wellen in Wellenleiterarrays	46
Hybride Integration optischer Systeme auf miniaturisierten keramischen Substraten	50
Elektrostatistischer Chuck mit integriertem Wafer-Lift	54
Der Mikrofluidik-Baukasten – Konzepte für die Standardisierung und fluidische Schnittstellen	58
Metrologie für die Nanotechnik	62
Flexible Phasogrammetrie – eine neue Methodik zur 3-D-Rundumvermessung	68
Hochauflösende Streulichtanalyse an optischen Komponenten im VUV bis IR	74
Miniaturisiertes markierungsfreies Detektionssystem	80
Optisches Mikrofon	84
Mechanik und Optik vereint – Langzeitarchivierung von farbigen Bildern auf Mikrofilm	88
Kuppelprojektor	94
Hochleistungs-Faser- und Wellenleiterlaser	100
Namen, Daten, Ereignisse	104
Patente	108
Bildungsaktivitäten	110
Messebeteiligungen	111
Wissenschaftliche Publikationen	112
Der Weg zu uns	120

Contents

Preface	5
Institute profile	7
Advisory Committee	9
Organisational Structure/Contact Persons	10
Competences of Fraunhofer IOF and Fraunhofer IOF Statistics	12
Highlights and honors in the year 2003	14
The Fraunhofer-Gesellschaft	17
Selected results	19
Diamond turning of micro-optical structures	21
Embossing of glass-ceramics (LTCC) for optical and opto-electronic applications	27
Development of a large area sputtering system for EUV optics	31
Coatings for micro-mirror arrays	35
Rugate filters for the near infrared and visible spectral regions	39
AR-hard® – coating with adjustable spectral bandwidth for plastic optics	43
Tailoring Guided Modes in Waveguide Arrays	47
Hybrid Integration of optical Systems on miniaturized ceramic Substrates	51
Electrostatic chuck with integrated wafer lift	55
The microfluidic toolbox – Standardization Concepts and Fluidic Interfaces	59
Metrology for Nanotechnologies	63
Flexible phasogrammetry – a new method for whole body 3-D measurement	69
High-sensitivity light scattering analysis of optical components from the VUV to IR	75
Miniaturized labelfree detection system	81
Optical microphone	85
Mechanics and Optics united – long time archival storage of colored pictures on microfilms	89
Dome projector	95
High power fiber and waveguide lasers	101
Names, Dates, Activities	104
Patents	108
Educational Activities	110
Science Fair Participation	111
Scientific Publications	112
Direction of Fraunhofer IOF	121



Liebe Leser,

„Heute schon tun, woran andere erst morgen denken, denn nur beständig ist der Wandel!“ Mit diesem Ausspruch von Heraklit aus dem Jahre 480 v. Chr. versinnbildlichte der Präsident der Fraunhofer-Gesellschaft, Prof. Dr. H.-J. Bullinger, die Aufgaben der Gesellschaft anlässlich des Ehrenkolloquiums für Prof. Dr. Wolfgang Karthe im September vergangenen Jahres. Diesem Motto fühlen wir uns am Fraunhofer IOF verpflichtet, ist doch die Weiterentwicklung von Wissenschaft und Technik Hauptanliegen unserer Arbeit.

Prominente Beispiele für Weiterentwicklungen am IOF im Jahr 2003 betreffen neuartige Schichtsysteme zur Oberflächenvergütung von Kunststoff-optiken, die neben spezifischen optischen verbesserte mechanische Eigenschaften zeigen, oder Faserlasersysteme, die im kontinuierlichen und gepulsten Betrieb weltweit einzigartige Strahleigenschaften aufweisen und damit neue Anwendungsfelder für Lasersysteme erschließen helfen.

Die besondere Wertschätzung dieser Arbeiten in Wissenschaft und Technik wird deutlich durch die Auszeichnungen mit dem Fraunhofer-Preis und dem Otto-Schott-Preis des Jahres 2003. Nicht weniger bedeutend für das IOF ist aber der erfolgreiche Transfer von Forschungsergebnissen in die Industrie, ein Beispiel betrifft die Entwicklung einer Prozesstechnik zur Herstellung von Mask-Blanks für die EUV-Lithographie.

Das Jahr 2003 war ein Jahr der Veränderungen innerhalb des Fraunhofer IOF. So schied Prof. Karthe als Institutsleiter aus, die Amtsgeschäfte wurden an mich übertragen. Als Mann der „ersten Stunde“ hat Prof. Karthe das Institut maßgeblich inhaltlich geprägt und strategisch ausgerichtet. Auf der Grundlage dieser Ausrichtung gelang es, das IOF innerhalb weniger Jahre zu einem der erfolgreichsten Fraunhofer-Institute zu entwickeln. Hierfür gebührt ihm – auch im Namen aller Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter – unser herzlicher Dank. Wir werden auch in Zukunft daran arbeiten, den in uns gesetzten Erwartungen gerecht zu werden.

Veränderungen bergen Chancen. Durch den Wechsel in der Institutsleitung entstand eine engere Vernetzung mit der Friedrich-Schiller-Universität Jena. Insbesondere die Kooperation mit dem Institut für Angewandte Physik, dessen Leiter ich in Personalunion bin, konnte intensiviert werden. Durch die Verbindung der beiden Institute ist eine national und international herausragende Kompetenz auf dem Gebiet der mikro- und nano-strukturierten Optik geschaffen worden, die eine Grundvoraussetzung für die optische Systemtechnik darstellt. Sie ist die technologische Plattform für die Herstellung und hybride Integration von aktiven und passiven miniaturisierten optischen Elementen.

Sie eröffnet den Schritt von diskreten optischen Bauelementen hin zu optischen Systemen – analog der Situation in der Elektronik Mitte der sechziger Jahre, als die technologische und wirtschaftliche Schwelle zur Mikroelektronik überschritten wurde. Unsere Aufgabe besteht in den nächsten Jahren darin, dieses Potenzial effizient zu nutzen und die Entwicklung der modernen Optik mitzugestalten.

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

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

Prof. Dr. Andreas Tünnermann
Institutsleiter

Dear reader,

„Do today what others only think of doing tomorrow, for only change is constant!“ Based on this quotation from Heraklit (480 BC), Prof. Dr. H.-J. Bullinger, president of the Fraunhofer-Gesellschaft, embodied the aims of the organization at the honorary colloquium for Prof. Dr. Wolfgang Karthe in September of last year. We at Fraunhofer IOF are committed to this motto because the advancement of science and engineering is our primary objective.

In the year 2003 the IOF has made significant and prominent contributions in the field of science and engineering, illustrations of which are: new coating systems for plastic optics with specific optical as well as improved mechanical characteristics and fiber laser systems with worldwide unique beam characteristics in both continuous and pulsed operation opening up new fields of application for laser systems.

The award of the 2003 Fraunhofer-Prize and Otto-Schott-Prize manifestly shows that this work is both outstanding and appreciated.

Equally important for IOF is the successful transfer of our research results to industry. One example of such transfer is the development of a process technology for the production of mask blanks for EUV-Lithography.

2003 has been a year of changes at IOF. Prof. Karthe retired as director of the institute and his official responsibilities were handed over to me. Prof. Karthe has been the director of the IOF since its inauguration and has significantly stamped the strategy and orientation of the institute. Based on his guidelines the IOF has become one of the most successful Fraunhofer institutes within only a few years. Thanks are due to him in the name of all staff members. We will continue the endeavors to live up to expectations of our customers and partners.

Changes hold chances. The change in the institute's leadership has led to a closer relationship with the Friedrich Schiller University Jena. In particular, cooperation with the Institute for Applied Physics, of which I am also the director, has been intensified. The resultant collaboration between these institutes has created a nationally and internationally outstanding level of competence in the field of micro- and nano-structured optics, which is a basic requirement for optical systems technology. It is the technological base for the production and hybrid integration of both active and passive, miniaturized optical elements.

It allows for the transition of discrete optical elements into optical systems, similar to the technological and economical breakthrough of microelectronics in the mid 1960's. Over the next few years we will try to use this potential effectively to influence the development of modern optics.

I would like to thank our partners in industry and science for their excellent collaborative work and also: the German federal ministry of education and research, Thuringia's ministry for science, research and the arts and the Deutsche Forschungsgemeinschaft for their ongoing support.

I pay tribute to all my colleagues and thank them for their outstanding results and commitment. Their work forms the foundation for the continuous progress of the IOF.



Prof. Dr. Andreas Tünnermann
Director

Das Fraunhofer-Institut für Angewandte Optik und Feinmechanik erforscht, konzipiert und entwickelt Verfahren der optischen Messtechnik und Fertigungstechnik, Beschichtungsverfahren sowie optische und feinmechanische Module und Systeme. Schwerpunkte sind optische Schichten, optische Messsysteme, mikro- und integriert-optische Systeme einschließlich Laserbaugruppen sowie feinmechanische Präzisionsbaugruppen und -systeme. Zentrale Kompetenz und Grundlage aller Arbeiten am Institut ist das Know-how auf den Gebieten Optik- und Mechanik-Design.

Für die Entwicklung von ultrastabilen Schichtsystemen für höchste Ansprüche im sichtbaren und ultravioletten Spektralbereich bis unter 10 nm und Energiedichten bis 30 J/cm² stehen die zugehörigen Herstellungsverfahren zur Verfügung. Die im Fraunhofer IOF entwickelten und hergestellten mikro- und nano-optischen Elemente sowie Bauelemente der integrierten Optik auf der Basis von Kunststoffen, Glas und

Silizium finden Einsatz in der Industrie. Anwendungsbereiche miniaturisierter opto-mechanischer Systeme, wie z. B. Strahlablesysteme, schnelle Vielschalter und Modulatoren sowie passive und aktive mikrooptische Bauelemente, liegen in Tele- und Datenkommunikation, Sensorik, Fertigungs-, Medizin- und Umwelttechnik.

Industriell genutzt werden die Verfahren zur berührungslosen 3-D-Koordinatenmessung und Defekterkennung an Oberflächen. Nach den Erfordernissen der Industriepartner werden Verfahren der Optikmontage wie Präzisionskleben, Laserstrahllöten und Plattformkonzepte für die AVT sowie Fertigungsmanipulatoren vorwiegend für miniaturisierte Optiken und Präzisionsbaugruppen für Ausrüstungen der Mikroelektronik entwickelt. Die Auftragsbearbeitung bezieht geräteinterne Mess- und Prüftechnik, Prototypenentwicklung und Testserienfertigung mit ein.

Die Auftraggeber des Fraunhofer IOF kommen überwiegend aus Klein- und mittelständischen Unternehmen aber auch aus Unternehmen der Großindustrie, sowohl national als auch international. Das Institut erhält Fördermittel aus öffentlichen Projekten des Bundesministeriums für Bildung und Forschung, des Thüringer Ministeriums für Wissenschaft, Forschung und Kunst sowie der Europäischen Union.

Am Fraunhofer IOF sind mehr als 100 Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter beschäftigt. Seit 2002 ist der Sitz des Instituts in einem modernen Neubau auf dem Jenaer Beutenberg Campus, in unmittelbarer räumlicher Nähe zu anderen Forschungseinrichtungen, zur Universität und zur Fachhochschule.

Für die Bearbeitung der Forschungsaufträge finden die Mitarbeiter auf ca. 5 000 m² Labor- und Bürofläche hervorragende Arbeitsbedingungen. Das Institut verfügt über moderne Anlagen und Ausrüstungen der Mikrooptik-Technologie, der Präzisionsbearbeitung und -montage, modernste Beschichtungsanlagen, Verfahren zur Charakterisierung von Oberflächen und Schichten sowie zur Optikcharakterisierung und einen umfangreichen Software-Pool für Optik- und Mechanik-Design.

Institute profile

The Fraunhofer Institute for Applied Optics and Precision Engineering investigates, designs and develops processes for optical measurement and manufacturing technologies, coating technologies as well as modules and systems for optics and precision engineering. The institute's focus is on optical coatings, optical measurement systems, micro-optical and integrated optical systems including laser assemblies, and components for precision mechanics assemblies and systems. The core of the institute's competence and its basis for all developments is its know-how in the areas of optical and mechanical design.

Technologies for the development of high-performance ultra-stable coating systems for wavelengths in the visible and UV range to below 10 nm and energy densities of up to 30 J/cm² are at the institute's disposal. Plastic as well as glass and silicon based micro- and nano-optical elements and integrated optics components which were developed and manufactured at the IOF are utilized by the industrial sector.

Areas of application for miniaturized opto-mechanical systems like beam scanners, fast multi-switches and modulators, as well as passive and active micro-optical components, include: tele and data communication, sensor systems and production, medical and environmental technology.

Methods for contactless 3-D coordinate measurement and surface defect detection are used industrially. Based on the requirements of our industrial partners we develop methods for optics assembly, such as precision bonding, laser beam soldering and platform concepts for packaging of integrated circuits, also production manipulators, mostly for miniaturized optics and precision engineering components to be used in microelectronics equipment. Measurement and testing techniques, prototype development and the manufacture of pilot batches are part of our effort.

The clients of Fraunhofer IOF mostly come from small and medium-sized enterprises, but also from major companies of Germany and throughout the world. The institute receives support from public projects of the German federal ministry of education and research, the ministry for science, research and the arts of the federal state of Thuringia and from international projects of the European Union.

Since the year 2002 the employees (more than 100 in total) of the IOF work in a new complex at the Jena Beutenberg Campus close to other research facilities, the university and the technical college. Research requests from industrial partners are carried out in its offices and laboratories, a space of approximately 5 000 square meters. The institute is equipped with modern facilities for micro-optics technology and precision engineering and assembling, state-of-the-art coating plants, methods for surface characterization, optics characterization and a vast of software for optical and mechanical design.



Das neue Institutsgebäude des Fraunhofer IOF

The new institute building of the Fraunhofer IOF

Kuratorium

Fraunhofer-Institut und Vorstand der Fraunhofer-Gesellschaft werden durch ein Kuratorium beraten, dem folgende Mitglieder angehören:

- **Dr. F.-F. von Falkenhausen**
Carl Zeiss Jena GmbH
(Vorsitzender)
- **Prof. Dr. H.-J. Tiziani**
Universität Stuttgart,
Lehrstuhlinhaber für Technische Optik
(stellvertretender Vorsitzender)
- **Dr. K. Bartholmé**
Ministerialrat im Thüringer Ministerium
für Wissenschaft, Forschung und Kunst (TMWFK)
- **Prof. Dr.-Ing. J. Herrmann**
- **Dr. L. Ross**
MuT Management- und Technologieberatung
Dr. Ross GmbH, Stutensee
- **Prof. Dr. R. Sauerbrey**
Friedrich-Schiller-Universität Jena
Physikalisch-Astronomische Fakultät
Institut für Optik und Quantenelektronik
- **Prof. Dr. G. Scarbata**
TU Ilmenau, Fakultät für Elektrotechnik
und Informationstechnik, Fachgebiet
Elektronische Schaltungen und Systeme
- **Herr J. von Schaewen a. G.**
Ministerialrat im Bundesministerium
für Bildung und Forschung, Bonn
- **Dr. N. Streibl**
Robert Bosch GmbH
- **Prof. Dr. B. Wilhelmi**
Jenoptik AG
Wissenschaftlicher Beirat

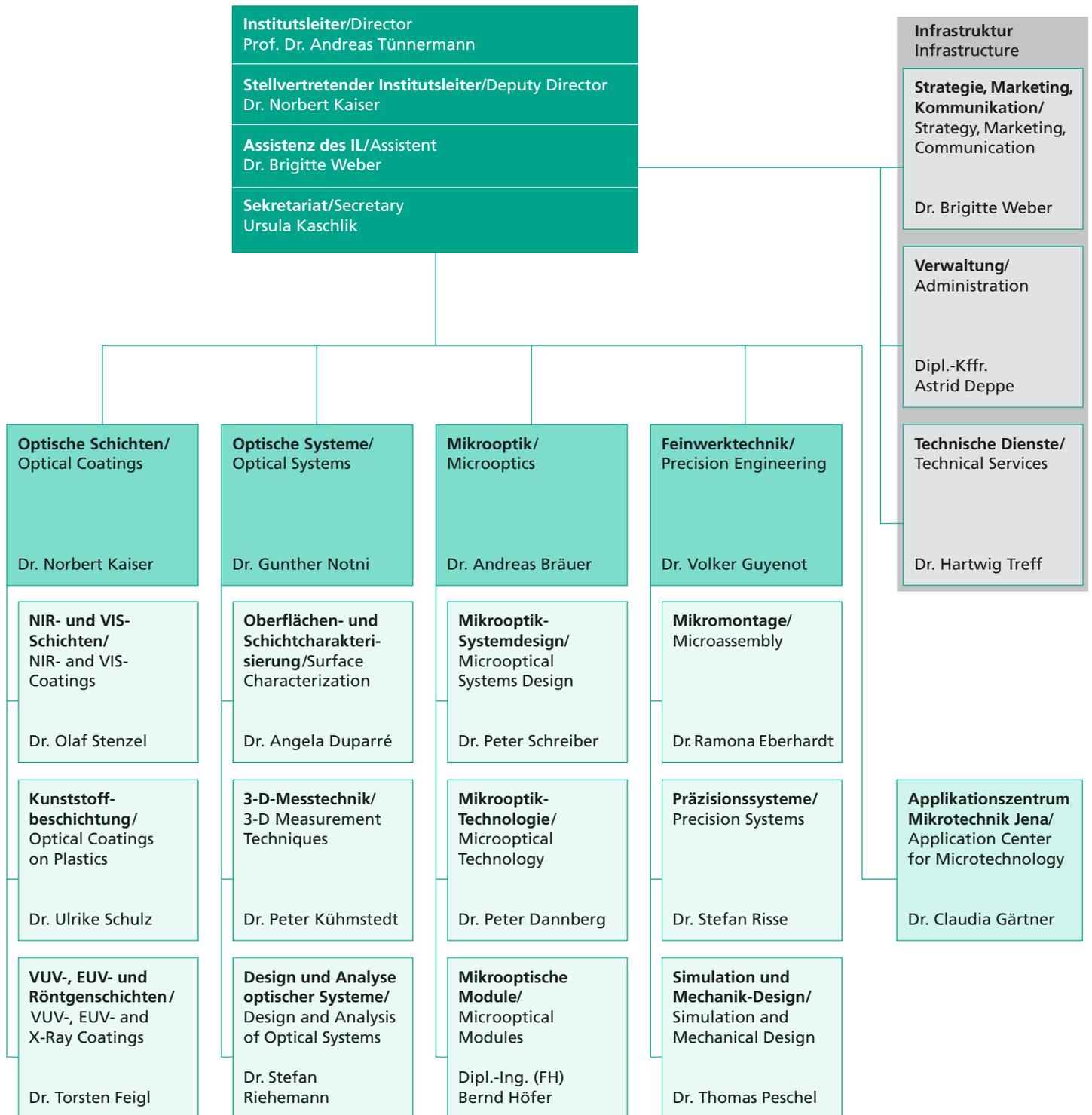
Advisory Committee

The Advisory Committee supports the Fraunhofer Institute as well as the Board of Directors of the Fraunhofer-Gesellschaft and is comprised of the following members:

- **Dr. F.-F. von Falkenhausen**
Carl Zeiss Jena GmbH
(Chair)
- **Prof. Dr. H.-J. Tiziani**
University of Stuttgart,
Professor for Technical Optics
(Deputy chair)
- **Dr. K. Bartholmé**
Deputy minister of Thuringia's
ministry of science, research and the arts (TMWFK)
- **Prof. Dr.-Ing. J. Herrmann**
- **Dr. L. Ross**
MuT Management- und Technologieberatung
Dr. Ross GmbH, Stutensee
- **Prof. Dr. R. Sauerbrey**
Friedrich Schiller University Jena
Faculty for Physics and Astronomy
Institute of Optics and Quantum Electronics
- **Prof. Dr. G. Scarbata**
Technical University Ilmenau, Faculty for Electrical
Engineering and Information Technology
Department of Electronic Circuits and Systems
- **Herr J. von Schaewen a. G.**
Deputy minister of the federal ministry
for education and research, Bonn
- **Dr. N. Streibl**
Robert Bosch GmbH
- **Prof. Dr. B. Wilhelmi**
Jenoptik AG
Scientific advisory board

Organisationsstruktur/Kontakte

Organisational Structure/Contact Persons



Stand 15.12.2003

Eindrücke

Impressions



Lithographie: Erzeugung bzw. Abformung optischer Mikrostrukturen

Lithography: Generation respectively UV molding of microoptical structures



Feinmechanische Werkstatt

Opto-mechanical workshop

Inspektions- und Messtechnik zur Charakterisierung optischer Mikrostrukturen: Mikroskopie, Dicken- und Formvermessung, Profilometrie

Inspection and measurement equipment for characterization of optical micro structures: microscopy, thickness, shape and profile measurement



Ultrapräzisionsbearbeitung – Diamantdrehen zur Erzeugung hochpräziser optischer Oberflächen

Ultra-precision machining – Single point diamond turning for generation of high-precision optics

Plasmatechnologie: Ätz- und Beschichtungslabor für die Herstellung mikrooptischer Elemente in Silizium und Glas (Quarz)

Laboratory plasma technology: Etching and deposition for micro-optic device fabrication in silicon and glass (quartz)



Mikroheißprägen für die Polymermikrotechnik

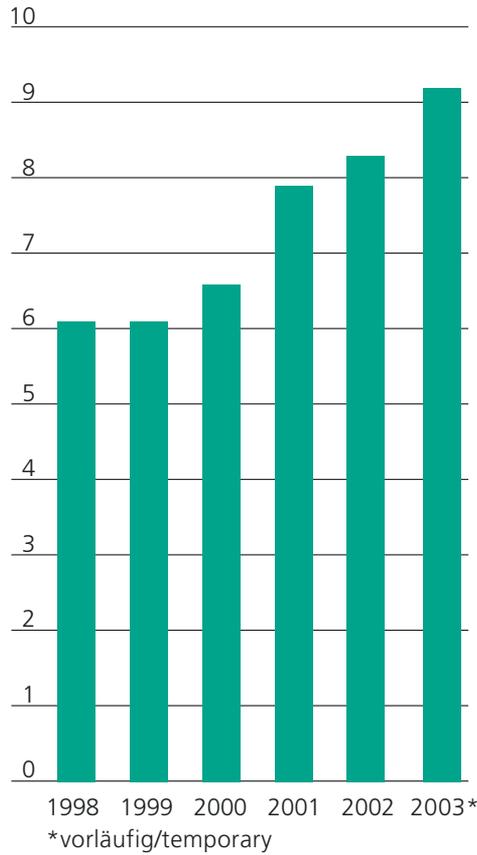
Micro hot embossing for polymer microtechnology

Kernkompetenzen des Fraunhofer IOF

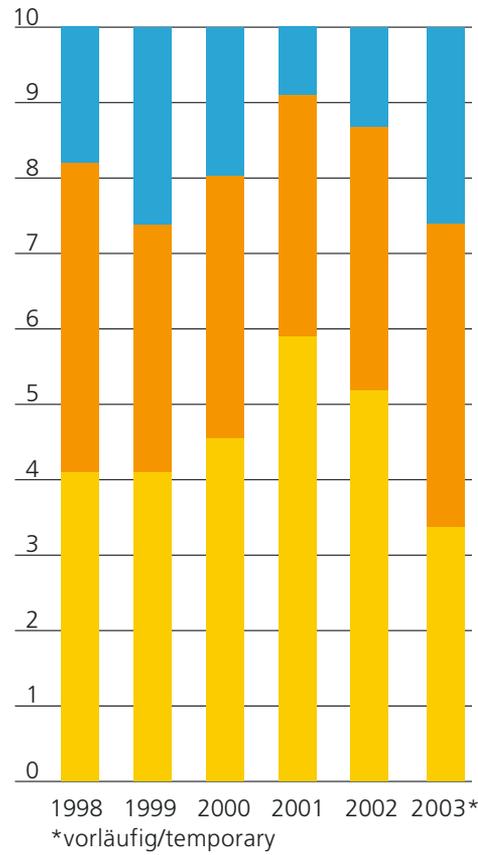
Competences of Fraunhofer IOF

Kernkompetenzen Competences Geschäftsfelder Business fields	Design und Analyse optischer und optomechanischer Systeme Design and analysis of optical and optomechanical systems	Mikrooptik Microoptics	Oberflächencharakterisierung und Geometrievermessung Surface characterization and shape measurement techniques	Optische Schichten Optical films
Bauelemente und Subsysteme für optische Informations-, Laser- u. Beleuchtungstechnik Devices and subsystems for optical information technology, laser technology a. illumination				
Optische Prüf- und Messmethoden/ Optische Sensorik Optical test and measuring methods/ optical sensors				
Module für feinmechanische Präzisionssysteme Modules for precision mechanics systems				
Oberflächenvergütung für die Optik Optical coatings				
Medizintechnisch-optische Geräte und Verfahren Medicaloptical equipment and methods				

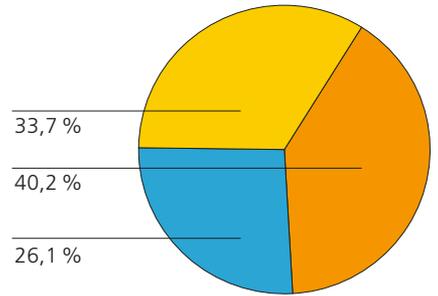
Budget (Mio Euro)



Budget (%)

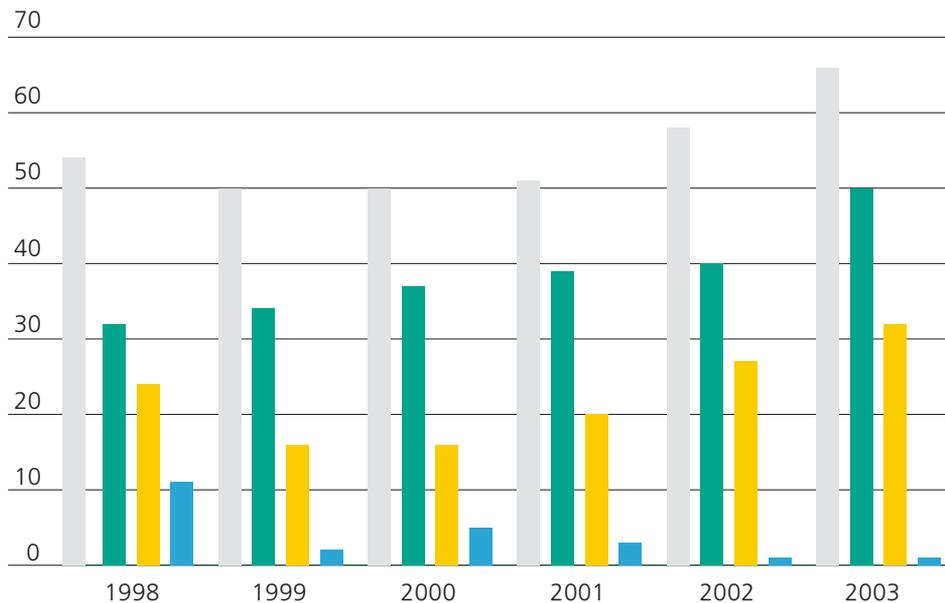


Budget Jahr 2003/Budget year 2003

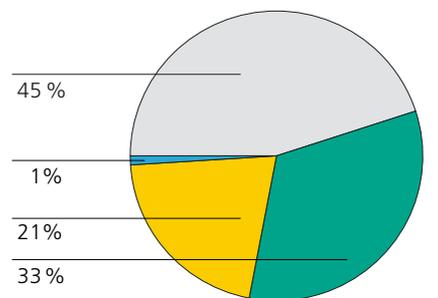


- Industrie/Contracts (Industry)
- öffentliche Aufträge/Contracts (Government)
- Grundfinanzierung/Federal Funding

Beschäftigungsentwicklung/Staff (overall employment figures)



Beschäftigte 2003/Staff year 2003



- Wissenschaftler/Scientists
- Techniker/Technicians
- Schüler und Studenten/Undergraduate and graduate students
- Sonstige/Temporary contracts



Einweihung des neuen Institutsgebäudes

Am 7. März 2003 wurde das neue Institutsgebäude des Fraunhofer-Instituts für Angewandte Optik und Feinmechanik offiziell eingeweiht. Zu den Gästen zählten auch der Präsident der Fraunhofer-Gesellschaft, Prof. Dr. Hans-Jörg Bullinger, der Staatssekretär im Bundesministerium für Bildung und Forschung Christoph Matschie, Thüringens Ministerin für Wissenschaft, Forschung und Kunst, Prof. Dr. Dagmar Schipanski sowie Dr. Peter Röhlinger, Oberbürgermeister der Stadt Jena.

Inauguration of the new institute building

On March 7 st the new building of the Fraunhofer Institute for Applied Optics and Precision Engineering IOF was inaugurate. Among the visitors have been Prof. Hans-Jörg Bullinger, President of the Fraunhofer-Gesellschaft (FhG) as well as Christoph Matschie, State secretary of the German federal ministry of education and research, Prof. Dagmar Schipanski, Thuringian minister of science, research and art and Dr. Peter Röhlinger, the mayor of Jena.



Institutsleiterwechsel am Fraunhofer IOF

Am Mittwoch, dem 10. September 2003 wurde die Leitung des Fraunhofer-Instituts für Angewandte Optik und Feinmechanik im Rahmen eines Ehrenkolloquiums offiziell von Prof. Dr. Wolfgang Karthe an Prof. Dr. Andreas Tünnermann übergeben. Prominente Redner aus Politik und Wirtschaft wie der Präsident der Fraunhofer-Gesellschaft, Prof. Dr. Hans-Jörg Bullinger und Thüringens Ministerin für Wissenschaft, Forschung und Kunst, Prof. Dr. Dagmar Schipanski würdigten die Ergebnisse der Wissenschaftler des Jenaer Forschungsinstituts, welches sich seit 1992 unter der Leitung des Jenaer Physikers Karthe zu einem der effizientesten Fraunhofer-Institute in Deutschland entwickelt hat.

Der neue Chef des Fraunhofer IOF, Prof. Andreas Tünnermann, ist gleichzeitig Leiter des Instituts für angewandte Physik der Friedrich-Schiller-Universität (FSU-IAP). Deshalb wurde ein Kooperationsvertrages zwischen der FSU und der FhG unterzeichnet. Durch die Bündelung der Kompetenzen der Universität in der Grundlagenforschung und die des Fraunhofer IOF in der angewandten Forschung und bei der Projektarbeit sind wichtige Synergieeffekte zu erwarten, so Tünnermann.

Handing over of the direction at the Fraunhofer IOF

Wednesday, September 10th the direction of the Fraunhofer Institute for Applied Optics and Precision Engineering IOF was handed over from Prof. Wolfgang Karthe to Prof. Andreas Tünnermann. Within a colloquium prominent speakers from politics and industry appreciated the outstanding results of the IOF. Among the speakers have been Prof. Hans-Jörg Bullinger, President of the Fraunhofer-Gesellschaft (FhG) as well as Prof. Dagmar Schipanski, Thuringian minister of science, research and art and Prof. Karl-Ulrich Meyn, Rector of the Friedrich Schiller University in Jena (FSU). They all claimed the excellent development of the Fraunhofer IOF under the management of Prof. Karthe.

The new director of the Fraunhofer IOF, Prof. Tünnermann is at the same time the head of the Institute of Applied Physics at the University in Jena (FSU-IAP). In this regards the FSU and the FhG signed an agreement on cooperation. Thereby a closer collaboration between the two institutes becomes possible and Prof. Tünnermann aspects potential synergetic effects by the bundling of competencies in basic research (FSU-IAP) an applied research (Fraunhofer IOF).



Die Fraunhofer-Gesellschaft

Die Fraunhofer-Gesellschaft betreibt anwendungsorientierte Forschung zum unmittelbaren 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 eine Plattform 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 12 700 Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter, überwiegend mit natur- oder ingenieurwissenschaftlicher Ausbildung, bearbeiten das jährliche Forschungsvolumen von über eine Milliarde Euro. Davon fallen mehr als 900 Millionen Euro auf den Leistungsbereich Vertragsforschung. Für rund zwei Drittel dieses Leistungsbereichs erwirtschaftet die Fraunhofer-Gesellschaft Erträge aus Aufträgen der Industrie und öffentlich finanzierten Forschungsprojekten. Ein Drittel wird von Bund und Ländern beigesteuert, 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.

Ihren Namen verdankt die Gesellschaft dem als Forscher, Erfinder und Unternehmer gleichermaßen erfolgreichen Münchner Gelehrten Joseph von Fraunhofer (1787–1826).

The Fraunhofer-Gesellschaft

The Fraunhofer-Gesellschaft undertakes applied research of direct utility to private and public enterprises 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 a platform that enables its staff 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 roughly 80 research units, including 58 Fraunhofer Institutes, at over 40 different locations in Germany. A staff of some 12,700, predominantly qualified scientists and engineers, 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, 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 future scientific progress and economic development.

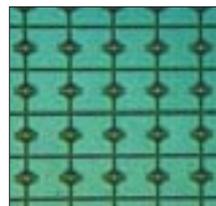
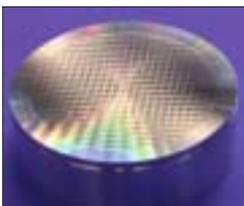
The Fraunhofer-Gesellschaft was founded in 1949 and is a recognized nonprofit organization. Its members include wellknown companies and private patrons who help to shape the Fraunhofer-Gesellschaft's research policy and strategic development.

The organization takes its name from Joseph von Fraunhofer (1787–1826), the illustrious Munich researcher, inventor and entrepreneur.

Ausgewählte Ergebnisse

Im vorliegenden Bericht werden ausgewählte Resultate aus den Forschungsfeldern des Fraunhofer IOF vorgestellt. Es sind Ergebnisse, die aus Projekten mit Großunternehmen als auch mit kleinen und mittelständischen Unternehmen hervorgegangen sind, die in öffentlich geförderten Verbundprojekten oder aber auch in hausinternen Vorlaufprojekten entstanden sind. Sie sollen dem Leser einen Eindruck über die Breite und Vielfalt unserer Forschungs- und Entwicklungsarbeit vermitteln und die schablonenhafte Darstellung der Kompetenzen des IOF in Form der Kompetenzmatrix anschaulicher machen.

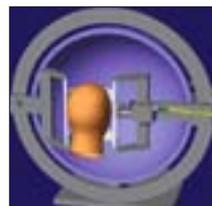
Die Mikro- und Nanotechnologie ist für das IOF und seine Partner ein wesentlicher Schwerpunkt geworden, der abteilungsübergreifend die Forschungs- und Entwicklungsarbeiten bestimmt. Neue Funktionalitäten konnten demonstriert werden auf der Grundlage von nanometerdicken Schichtsystemen oder nanoskaligen Oberflächenstrukturen. Essentiell war hierbei die am IOF vorhandene Kompetenz in Design, Herstellung, Charakterisierung und Verbindung von Mikro- und Nano-Strukturen, die erstmals auch die Realisierung von komplexen Systemen ermöglichte.



Selected results

This annual report features selected results from the various fields of research of Fraunhofer IOF. This includes results of projects carried out together with large, as well as small and medium-sized companies, publicly funded cooperative projects and the institute's internal pilot projects. The results are presented to with a view to giving the reader an impression of the breadth and variety of our research and development work and to illustrate the IOF's areas of competence as depicted in diagram form.

The IOF and its partners place emphasis on micro- and nano-technology. This influences the R & D activities of the entire institute. Novel functionalities based on nanometer-thick coating systems and nanoscale surface structures have been demonstrated. The IOF's competence in design, manufacture, characterization and linking of micro- and nano-structures has also been essential for the first-time realization of complex systems.





Andreas Gebhardt

Einleitung

Das Diamantdrehen auf der Grundlage ultrapräziser Maschinenteknik (Abb. 1) ist eine eingeführte Technologie zur Herstellung rotationssymmetrischer Optikkomponenten. Klassische Einsatzfelder sind Metallspiegel und Kristalloptik für den Infrarotbereich. Breiten Einsatz findet dieses spannende Verfahren auch bei der Kunststoffoptikfertigung. Hierbei werden sowohl Prototypen direkt in das optische Material geschnitten als auch die Werkzeuge zum Prägen und Spritzgießen hergestellt. Bei all diesen Beispielen handelt es sich überwiegend um makroskopische Optikelemente, deren Form weitgehend identisch mit den durch klassische Optikfertigung herstellbaren Bauteilen ist. Mittels Diamantdrehen können komplexe, programmgesteuerte Geometrien erzeugt werden, die bezüglich Kontur und Strukturfeinheit über die konventionellen Möglichkeiten hinausgehen.

Die Forschungen im IOF auf dem Gebiet der Ultrapräzisionsbearbeitung sind auf folgende Schwerpunkte gerichtet:

- Entwicklung von Bearbeitungstechnologien zur Herstellung mikrooptischer Strukturen
- Ultrapräzise Fertigung von Replikationswerkzeugen
- Generierung komplexer optischer Flächen (asphärisch, nicht-rotationssymmetrisch und Freiformflächen).

Miniaturisiertes Drehen

Eine erste Möglichkeit zur Herstellung von Mikrooptiken durch Diamantdrehen ist die Miniaturisierung des klassischen Drehvorgangs. Es handelt sich um rotationssymmetrische Sphären oder Asphären mit Durchmessern < 3 mm. Das Bauteil befindet sich im Drehzentrum, die Bauteilkontur wird durch die X-Z Maschinenbewegung in der Werkzeugebene erzeugt.

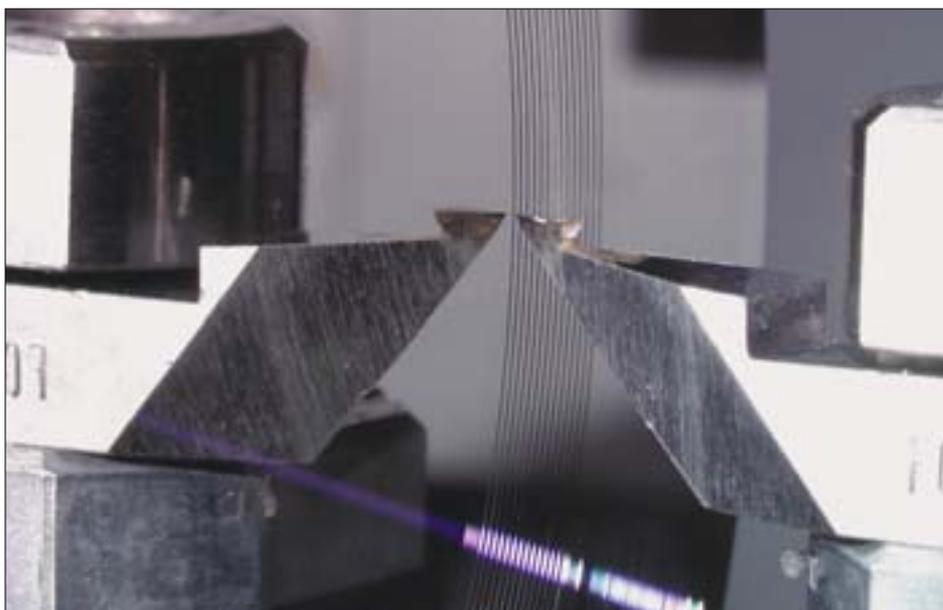


Abb. 1:
Diamantdrehen einer Gitterstruktur,
Material: chemisch Nickel.

Fig. 1:
Diamond turning of a grating structure,
material: electroless Nickel.

Diamond turning of micro-optical structures

Andreas Gebhardt, Ralf Steinkopf

Introduction

Single point diamond turning (SPDT) based on ultra precision machines is a well known technique for manufacturing rotationally-symmetrical optics. Classical applications are metal mirrors and crystal optics for infrared wavelengths. An important implementation of this cutting method is the manufacture of plastic optics. Cutting prototypes is as common as the manufacture of replication tools for injection moulding or hot embossing. All these examples deal with macroscopic optics, the shapes of which are widely similar to optics made by classic optic manufacturing. However the possible use of SPDT to produce complex, CNC-programmed geometries which exceed the limits of optically produced elements with respect to their shape and micro-structure is currently the focus of much research.

The research at Fraunhofer IOF in the field of ultra precision machining is focused on:

- Development of machining technologies for the manufacturing of micro-optical structures
- Ultra precise manufacturing of moulds
- Generation of complex optical surfaces (aspherical, non-rotationally symmetrical, freeform).



Ralf Steinkopf

Miniaturized turning

One possibility for making micro-optics with SPDT is miniaturized turning. Spheres or aspheres with diameters less than 3 mm can be created. The component is arranged at the turning center and the shape is realized by the X-Z movement in the tool-plane.

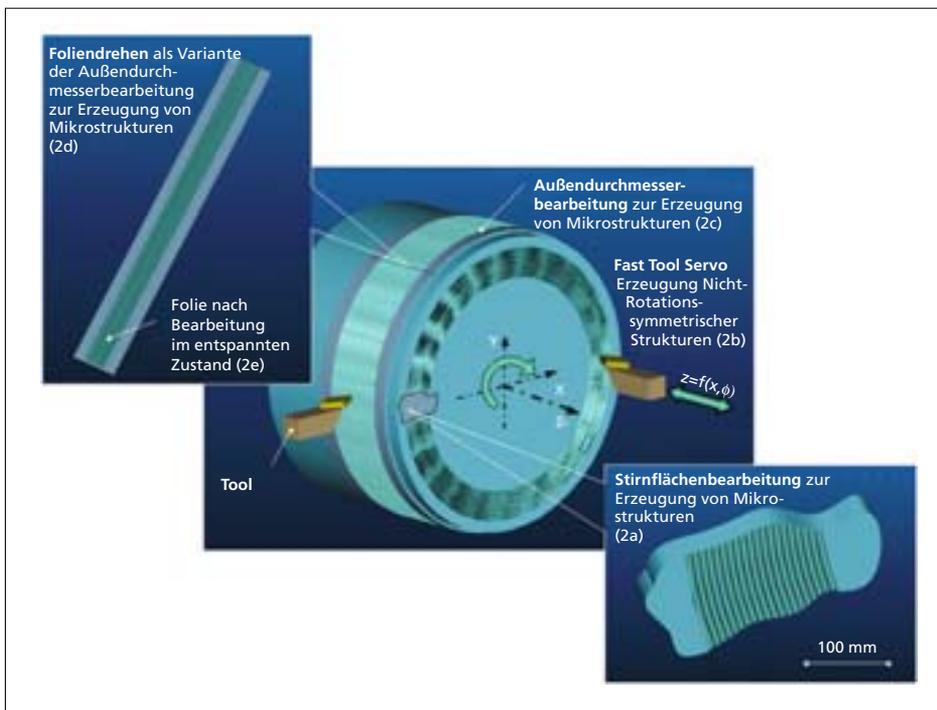


Abb. 2: Diamantdrehen mikrooptischer Strukturen: Herstellungsvarianten.

- Fig. 2: Diamond turning microoptical structures: machining versions.
- 2a: Face-turning of microprofiles.
 - 2b: Fast Tool Servo Manufacturing of non-rotationally symmetric structures.
 - 2c: Microstructuring of the circumference.
 - 2d: Foil turning as a option of structuring the circumference.
 - 2e: Foil after manufacturing.

Diese Technologie erlaubt die Herstellung von Einzellinsen und von arrayförmigen Anordnungen. In diesem Fall wird das Substrat justierbar auf der Spindel angeordnet und das jeweils zu bearbeitende Lenslet auf die Spindelmitte justiert. In die refraktive optische Fläche können zusätzlich auch diffraktive Elemente im gleichen Bearbeitungsprozess eingearbeitet werden. Auf Grund der kleinen Bauteildurchmesser und der oftmals gleichzeitigen starken Krümmung muss mit Werkzeugen mit minimalem Schneidradius oder Halbradiuswerkzeugen und kleinem Spitzen- und Freiwinkel gearbeitet werden.

Auch bei dieser Verfahrensvariante steht das Erreichen einer möglichst hohen Formgenauigkeit und damit die Minimierung der Abbildungsfehler im Fokus der Prozessoptimierung. In einem iterativen Verfahren wird die Korrektur der zunächst fehlerbehafteten Form durchgeführt. Nach der

Einrichtung des Werkzeuges anhand einer interferometrisch auswertbaren Sphäre wird nach einem ersten Bearbeitungsschritt ein best fit der tatsächlich gefertigten Asphäre durchgeführt. Der Offset der gefundenen Asphärenparameter wird als Korrektur in die Generierung des CNC-Programms eingearbeitet. Bei der weiteren Bearbeitung kann mit korrigiertem Programm die Formgenauigkeit schrittweise auf die gewünschte Toleranz gebracht werden. Abb. 3 zeigt in PMMA gedrehte Einzellinsen eines Mikroobjektivs für eine Miniaturkamera. Die asphärischen Linsenflächen weisen eine Formabweichung $< 0,5 \mu\text{m}$ auf.

Zur Charakterisierung der Abbildungsqualität der Mikrolinsen wurde die Modulationsübertragungsfunktion (MTF) des Gesamtobjektivs ermittelt. Hierbei konnte eine gute Übereinstimmung der Simulationsrechnung (ZEMAX) mit den gemessenen Objektivdaten festgestellt werden (Abb. 4) /1/.

Off-Axis-Bearbeitung

Eine zweite Möglichkeit der Herstellung von mikrooptischen Strukturen ist die außeraxiale Bearbeitung eines Substrates /2/. Ähnlich einer Schallplatte werden die Strukturen spiralförmig in möglichst großem Abstand von der Drehmitte eingearbeitet (Abb. 2). Die Strukturen können sowohl durch die programmierte Werkzeugbahn als auch durch den direkten Übertrag des Werkzeugprofils erzeugt werden. Die sich durch den Abstand zur Spindelmitte ergebende Krümmung senkrecht zum Profil ist für viele Anwendungen vernachlässigbar bzw. kann im Optikdesign vorausschauend kompensiert werden. Somit ist eine effiziente Herstellung von zylindrischen Konturen mit asphärischem Profil möglich, wobei das Profil von Rille zu Rille variieren kann. Beispielhaft zeigt Abb. 5 ein durch UV-Reaktionsguss repliziertes Zylinderlinsenarray mit hyperbolischem Linsenquerschnitt. Das Linsenarray wurde als strahlformendes Element in einem optischen Mikrofon /3/ verwendet und zeigt gegenüber sphärischen Arrays eine Steigerung der Koppeffizienz um den Faktor 3.

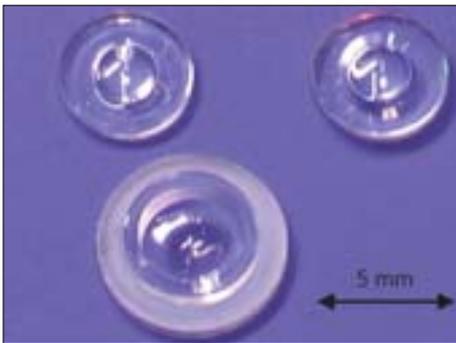


Abb. 3: Diamantgedrehte Mikrolinsen, Material PMMA.

Fig. 3: Diamond turned micro lenses, material: PMMA.

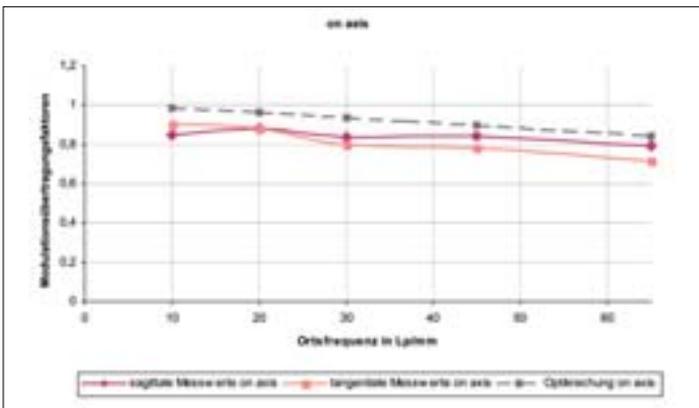


Abb. 4: Modulationsübertragungsfunktion des gedrehten Mikroobjektivs im Vergleich zur Simulation.

Fig. 4: MTF of the turned micro objective versus simulation.

This technique permits the manufacturing of lenses and lens arrays. The substrate in the latter case is adjustably mounted to align every lenslet in the spindle center. Diffractive elements can be added to the refractive optical surface. Due to the small diameter and the typically steep curvature, it is necessary to use small radius or split radius tools with an acute tool-tip angle and a small clearance angle.

Using this turning technique the objective is to construct the most accurate form possible, thereby minimizing aberration. In an iterative process incorrect surface shape must be corrected. After the initial tool setup by means of an interferometrically verified sphere, the real part will be measured and a best fit made. The offset of the calculated asphere parameters is used to correct the CNC-Program. Repeated machining with the rectified program produces a form close to the postulated tolerance.

Fig. 3 shows micro lenses (PMMA) of a micro camera objective made by this technique. The aspherical lenses exhibit a form-accuracy superior to 0.5 microns. To characterize the lens aberration the Modulation Transfer Function (MTF) of the objective was investigated. In this respect good correspondence of the simulation (ZEMAX) to the measured values was observed (Fig. 4) /1/.

Off-axis turning

A second possibility for micro-structuring is off-axis turning /2/. The structures are cut in a spiral groove as far as possible from the spindle axes, like a vinyl record (fig. 2). The shape of the structure is made by the programmed tool path or by copying the profiled tool directly onto the material. The curvature perpendicular to the profile is negligible for a lot of applications or can be anticipated and compensated by the optical design. With this method very efficient manufacture of cylindrical contours with an aspherical profile is possible even if the profile changes with every groove.

As an example fig. 5 shows a cylindrical lens array with its hyperbolic profile replicated using UV-reaction moulding. This array is used in an optical microphone /3/. In comparison with a spherical lens array the hyperbolic array increases the coupling efficiency by a factor of 3.

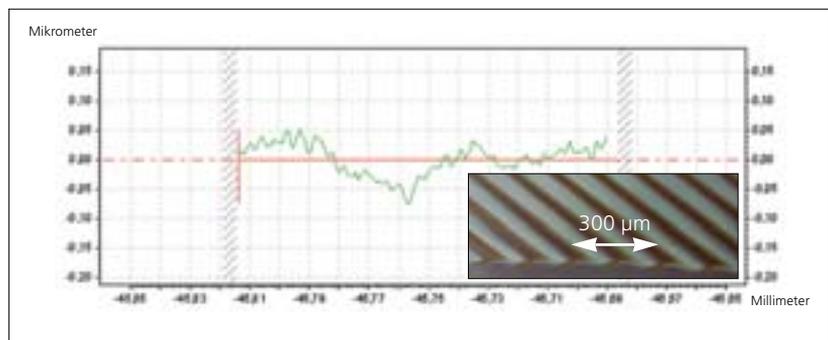


Abb. 5:
Abgeformtes Zylinderlinsenarray
und Formabweichung einer Einzellinse
(Tastschnittmessung).
Form: hyperbolisch,
Pitch: 150 μm , Sag 22 μm ,
Füllfaktor > 99 %,
Formgenauigkeit < 250 nm,
Rauheit: RMS < 10 nm

Fig. 5:
Replicated cylindrical lens array and
form deviation of single lenslet
(tactile measurement).
Shape: hyperbolic,
Pitch: 150 μm , Sag 22 μm ,
fill factor > 99 %, Form accuracy < 250 nm,
Roughness: RMS < 10 nm

Ebenso können Beugungsgitter mit veränderlicher Gitterkonstante und Blazewinkel erzeugt werden. Die minimalen Strukturgrößen werden durch die zur Verfügung stehenden Werkzeuge limitiert, wobei Strukturbreiten von wenigen Mikrometern bei Höhen im Sub-Mikrometer-Bereich realisierbar sind (Abb. 6).

Strukturierung von Zylinderflächen

Eine ähnliche Vorgehensweise wie bei der Off-Axis-Bearbeitung ist auch für die Strukturierung einer Zylinderfläche möglich. Hierbei erhält man ein ringförmig umlaufendes Profil. Durch die Verwendung einer Folie können (trotz des Drehprozesses) lineare Mikrostrukturen erzeugt werden. Die auf der Mantelfläche des Zylinders aufgebraute Substratfolie wird nach erfolgter Strukturierung gelöst und auf einen ebenen Träger aufgebracht.

Fast Tool Servo

Mit den bisher beschriebenen Technologien wird die Bauteilkontur durch eine Relativbewegung zwischen Werkstück und Werkzeug unabhängig von der Rotationsbewegung des Werkstücks erzeugt. Ein zusätzlicher Freiheitsgrad kann durch ein synchron zur Spindelbewegung angetriebenes Werkzeug erschlossen werden. Diese so genannte Fast Tool Servo-Technologie (FTS) ermöglicht eine Strukturierung der Werkstückoberfläche entlang des spiralförmig verlaufenden Werkzeugweges. Innerhalb der Limitierungen für den Hub des FTS-Systems und der maximalen Frequenz der spindel-synchronen Werkzeugbewegung können somit nicht-rotationssymmetrisch strukturierte Flächen erzeugt werden (Abb. 7).

Zusammenfassung

Das Potential der Ultrapräzisions-Diamantbearbeitung wird insbesondere vor dem Hintergrund der stetig wachsenden Anforderungen aus dem Optikdesign interessant. Das Diamantdrehen erlaubt die flexible Fertigung von Mikrogeometrien mit Strukturbreiten ab wenigen Mikrometern und Strukturweiten bis in den Sub-Mikrometerbereich und erschließt damit, in Ergänzung zu lithographischen Verfahren, eine Vielzahl von neuen Applikationen.

Spiegelträger aus NE-Metall sowie refraktive Optik- und Mikrooptikbauteile aus optischen Kunststoffen sind eine Domäne dieser Technik. Mit dem im IOF zur Verfügung stehenden Equipment sind außerdem Freiformflächen, Gitterstrukturen und andere Mikroprofile direkt für optische Bauteile oder als Abformwerkzeuge für die präzise Kunststoffabformung generierbar.

Literatur:

- /1/ Schalm, N.: „Entwicklung eines Messplatzes zur Bestimmung der Abbildungsqualität von miniaturisierten Kameraobjektiven“, Diplomarbeit, Fraunhofer Institut Angewandte Optik und Feinmechanik 2003.
- /2/ Brinksmeier, E.; Stern, R.: „Fertigung und Anwendung ultrapräziser Mikrostrukturen“, 10. Internationales Braunschweiger Feinbearbeitungskolloquium (FBK), Vulkan Verlag, Braunschweig, S. 6.1 ff, 2002.
- /3/ Schreiber, P.: „Optisches Mikrofon“ im gleichen IOF-Report.

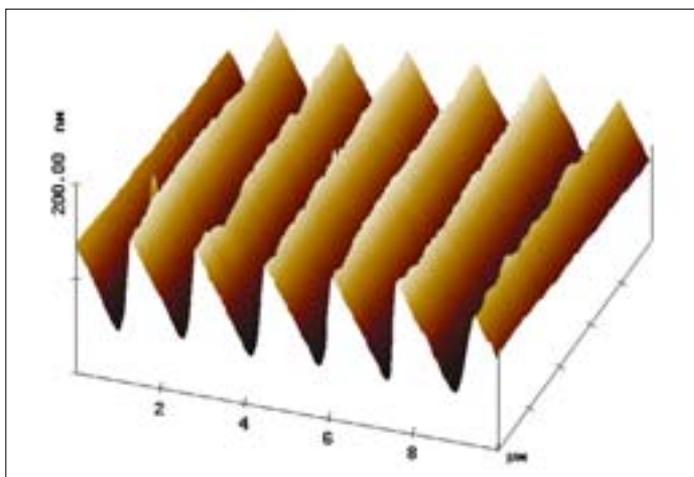


Abb. 6: Diamantgedrehte Gitterstruktur, Material Ampcoloy, AFM-Aufnahme.

Fig. 6: Diamond turned grating structure, material Ampcoloy, AFM-image.

In the same way the generation of diffraction gratings with variable pitch and blaze angle are possible. The available tools limit the minimum dimensions of the structure, however structure widths of a few microns and depths within the sub-micron range can be realized (fig. 6).

Structuring the circumference

A similar procedure is also applicable for machining the circumference of a work piece. In this case a circulating profile is created. Structuring the cylinder has the advantage that, with the use of a foil, linear structures are possible. The foil, plated on the cylinder surface, will be peeled off after the structuring and bonded onto a planar substrate.

Fast Tool Servo

The technologies described create the surface contour by the relative movement between work piece and tool, independent from the rotation of the work piece. An additional degree of freedom can be achieved by the use of a tool driven synchronously with the spindle rotation. This technique, known as Fast Tool Servo (FTS), permits the structuring of the work piece surface along the spiral tool path. Inside the stroke limits of the FTS and the maximum frequency of the spindle-synchronous tool movement, turning of non-rotationally symmetrical structured shapes are possible (fig. 7).

Conclusion

The capability of SPDT is especially interesting against a background of growing demands in optic design. SDPT permits the flexible manufacturing of micro-geometries with structure widths of some microns and structure depths within the sub-micron range. In addition to existing lithographic techniques it opens up a wide range of new applications.

Mirror substrates made of non-ferrous materials, as well as refractive optics and micro-optics made of plastics, is another area in which this method can be applied. With the IOF equipment the generation of freeform surfaces, diffraction gratings and micro-profiles directly for optical components or as moulds for precise plastic replication will be possible.

References:

- /1/ Schalm, N.: „Entwicklung eines Messplatzes zur Bestimmung der Abbildungsqualität von miniaturisierten Kameraobjektiven“, diploma thesis, Fraunhofer Institut Angewandte Optik und Feinmechanik 2003.
- /2/ Brinksmeier, E.; Stern, R.: Fertigung und Anwendung ultrapräziser Mikrostrukturen. 10. Internationales Braunschweiger Feinbearbeitungskolloquium (FBK), Vulkan Verlag, Braunschweig, S. 6.1 ff, 2002.
- /3/ Schreiber, P.: „Optisches Mikrofon“, in this report.

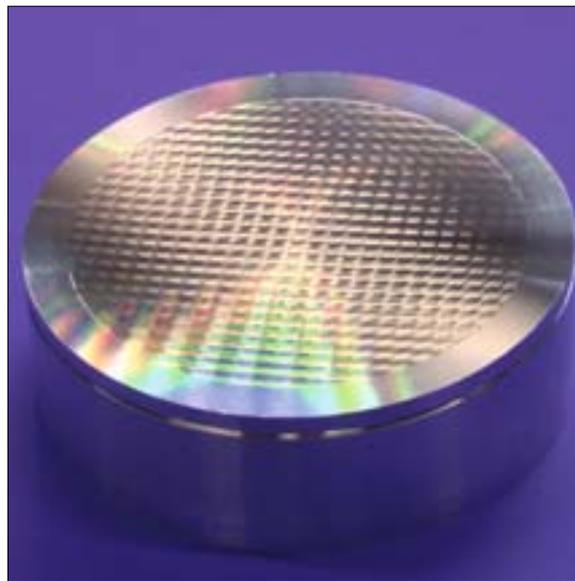


Abb. 7:
Facettenspiegel, FTS-Bearbeitung, Durchmesser 120 mm.

Fig. 7:
Faceted mirror, FTS-machined, diameter 120 mm.

Geprägte Glaskeramik für optische und optoelektronische Anwendungen

Wolfgang Buß, Peter Schreiber, Bernd Höfer, Ralf Rosenberger, Gilbert Leibelng, Ralf Steinkopf



Wolfgang Buß

Einleitung

In einem technologischen Vorlaufprojekt werden die Modifikationsmöglichkeiten von „Low Temperature Cofired Ceramics“ (LTCC) und insbesondere ihrer Herstellungstechnologie mit der Zielstellung untersucht, eine erweiterte Nutzbarkeit moderner Glaskeramikwerkstoffe für reflektierende oder definiert vorwärtsstreuende optische Baugruppen z. B. in kompakten Sensor- oder Beleuchtungsmodulen voranzutreiben.

Idee

Kommerziell angewandte Materialien für mikrooptische Bauelemente sind Glas, Silizium, Quarz, Polymere und verschiedene Molekülkristalle. Zur Herstellung spezieller Elemente werden gezielt die Oberflächen der Halbzeuge strukturiert oder Brechzahlvariationen in diesen Materialien erzeugt. Der

wachsende Kostendruck, insbesondere bei der Fertigung von Massenbedarfs-optiken, hat zur Entwicklung hochpräziser Replikationsverfahren für mikrooptische Bauelemente geführt. Die dabei verwendeten Materialien sind bisher im Wesentlichen auf Polymere beschränkt. Gläser kommen nur bedingt zum Einsatz, da der Aufwand beispielsweise beim Heißprägen oder Trockenätzen erheblich ist.

Trotz der Einschränkung, dass keine transmittierenden Elemente realisiert werden können, bietet die Verwendung von Glaskeramik für die Fertigung bestimmter mikrooptischer Bauelemente zahlreiche Vorteile. So ergibt sich aus der Strukturierbarkeit und Laminierbarkeit der grünen Keramik die Chance, mit relativ einfachen Serientechnologien, wie dem Kaltprägen, optische Funktionsflächen mit definierten Reflexionseigenschaften zu generieren. Dazu kommen vorteilhafte thermomechanische Eigenschaften wie geringer thermischer Ausdehnungskoeffizient, hohe Hitzebeständigkeit und eine gegenüber Glas bessere Wärmeleitfähigkeit. Weiterhin ist eine direkte Integration von optischen Funktionsgruppen in LTCC-Stapelbauten mit elektronischen, mechanischen oder fluidischen Funktionsebenen realisierbar, wodurch dann z. B. der Aufbau von komplexen Sensorbaugruppen mit erhöhter Temperaturwechselbelastbarkeit möglich ist.

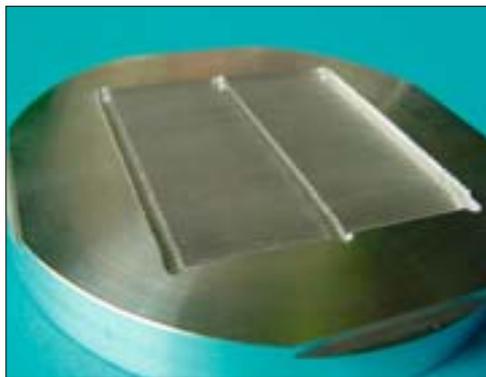
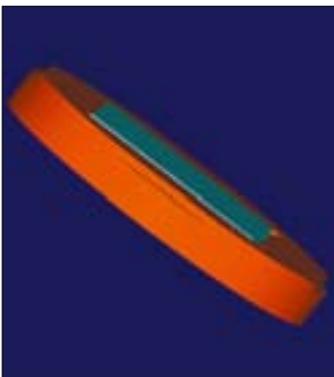


Abb 1: Designvorgabe und Umsetzung des Masterwerkzeuges zum Prägen von Diffusor-Strukturen. Dieses Ur-Werkzeug zum Klonen der Nickel-Prägestempel besteht aus einem Aluminium-Grundkörper und eingesetzten, hochgenau geschliffenen Glasplättchen, um exakte Kanten mit sehr geringen Radien abformen zu können.

Fig. 1: Design and realization of the master tool for embossing diffusor structures. This tool consists of a aluminium body with inserted high precision grinded glass chips. These chips are required to form edges with very small radii. The complete master toll will be cloned by a nickel punching tool.

Embossing of glass-ceramics (LTCC) for optical and opto-electronic applications

Wolfgang Buß, Peter Schreiber, Bernd Höfer, Ralf Rosenberger, Gilbert Leibelng, Ralf Steinkopf

Introduction

The modification potential for low temperature cofired ceramics (LTCC) and the processes by which they are manufactured are tested in an advanced R & D project with the aim of incorporating modern glass-ceramic materials as optical elements for reflection or for defined forward scatter.

Idea

Commercially used materials for micro-optic elements are glass, silicon, silica, polymers or molecule crystals. Their optical properties are manipulated by structuring the surfaces or by variation of the refractive index of these materials. The increasing cost pressure, particularly with regard to the large-scale production of optical consumer goods, has affected the development of high-precision replication techniques for micro-optics. Polymers are usually used because structuring glass surfaces by hot embossing or dry etching is very expensive.

Using glass ceramics for manufacturing special micro-optics can be advantageous even though it is not possible to use it for transmitting elements. The facility for structuring and laminating the LTCC green foil allows the generation of optical surfaces with defined reflective properties by simple series-technologies like (cold) embossing. Furthermore this substrate has some favourable thermo-mechanical properties such as a low thermal expansion coefficient, a high heat resistance and a better thermal conductivity compared to glass. It is also feasible to integrate optical structures into LTCC-stacks together with electronic, mechanical or fluidic layers for the production of complex sensor modules with an increased temperature-cycling load capacity.



Peter Schreiber



Bernd Höfer



Ralf Rosenberger



Gilbert Leibelng



Ralf Steinkopf

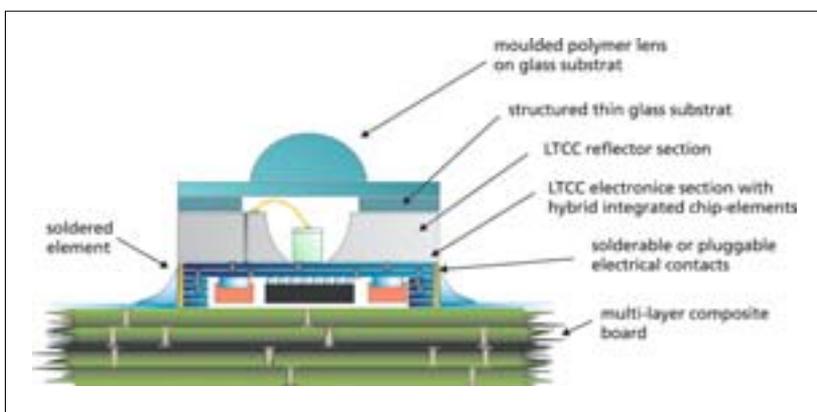


Abb. 2: Realisierungsvariante eines miniaturisierten LED-Beleuchtungsmoduls mit integrierter Stromquelle. Verwendung geprägter Reflektoren in einer hybrid montierten LTCC-Reflektorebene.

Fig. 2: Option of a miniaturized LED-illuminating-module with integrated current source. Application of embossed reflectors in a hybrid mounted LTCC reflection area.

Entscheidend für die Funktion geprägter Reflektoren ist es, nach dem Sintern eine Oberflächenrauigkeit $< 50 \text{ nm rms}$ zu erreichen. Neben einer speziellen Glaskeramik aus hochfein gemahlene Ausgangsstoffen, wie sie vom Projektpartner HITK entwickelt wurde, ergänzt durch einebnende Sol-Gel- oder Galvano-Beschichtungen, setzt diese Anforderung Abformwerkzeuge mit optisch glatten Funktionsflächen ($< 20 \text{ nm rms}$) voraus. Diese werden im IOF mittels Ultrapräzisionsdrehen auf vorgefertigten Prägemastern realisiert. Das eigentliche Prägewerkzeug für den Serieneinsatz entsteht danach durch galvanische Abformung der in einer Trägerplatte gruppierten Prägemaster.

Demonstratoren

Um die Einsatzmöglichkeiten neu entwickelter Glaskeramik für den Aufbau optischer und optoelektronischer Module nachzuweisen, werden Demonstratoren konstruiert, gefertigt

und getestet. Die Umsetzung rein optischer Demonstratoren wie Hohlspiegel oder Diffusor mit elliptischer Reflektionsverteilung dient dabei vorrangig der Untersuchung von Substitutionsmöglichkeiten traditioneller Optikmaterialien durch präzisionsbearbeitete Glaskeramik. Bei ihrer Fertigung kommen neben der Prägetechnologie auch modifizierte feinoptische Bearbeitungstechniken, wie das Schleifen und Polieren, zum Einsatz. Als optoelektronischer Demonstrator wurde ein kaskadierbares LED-Beleuchtungsmodul mit integrierter Stromquelle konzipiert. Es enthält neben der, dem modernen Stand der LTCC-basierenden Hybridelektronik entsprechenden, Elektronikenebene eine LTCC-Reflektorebene, die unter Verwendung der neu entwickelten HITK-Glaskeramik realisiert wird. Mittels einer mehrstufigen Präge-/Stanztechnik werden für die LEDs Reflektorräume mit parabelähnlich gekrümmten Seitenflächen in die grüne Keramik eingebracht. Das Prägen der optischen

Funktionsgruppen ist dabei wie der Aufbau der Elektronikenebene oder der aufgesetzten Optikenebene zur Strahlformung im-Nutzen möglich und gewährleistet die kostengünstige durchgängige Wafer-Level-Fertigung des Moduls. Die Demonstratorstudie eines LED-Beleuchtungsmoduls bildet den Ausgangspunkt für die Entwicklung variabel kombinierbarer kompakter Beleuchtungsfelder mit erhöhter Temperaturbeanspruchung.

Danksagung

Die Arbeiten wurden unter dem Aktenzeichen 03WKFO1E durch das BMBF gefördert. Die Autoren danken den Projektpartnern von SIEGERT TFT GmbH, via electronic GmbH und vom HITK Hermsdorf für die effektive enge Zusammenarbeit.



Abb 3: Prägekörper für LED-Gruben: Schema, realisierte Muster und Schnitt eines geprägten Reflektors.

Fig. 3: Embossing tool for LED-grooves: Scheme, realized examples and profile of an embossed reflector.



Abb. 4: Trägerplatte mit neun hochgenau bearbeiteten Prägekörpern. Mit dieser Vorrichtung werden bis zu 15 Lagen LTCC-Grünfolie gestapelt und nachfolgend unter hohem Druck zu einem homogenen Substratkörper laminiert. Gleichzeitig erfolgt das Einprägen der Reflektorstruktur.

Fig. 4: Mounting plate with nine high precision embossing paraboloids. Up to 15 plies of LTCC green-foil will be stacked and afterwards laminated by high pressure into a homogenous substrate body here. The embossing of the reflector structures occurs concurrently.



Abb. 5: Hohlspiegel in LTCC: Prägewerkzeuge mit optisch glatten Oberflächen und gesinterte Abformungen.

Fig.5: LTCC concave mirror: embossing tooling inserts with optical surfaces and sintered moulding results.

In order to create reflective structures it is important to achieve a surface roughness < 50 nm rms after sintering the glass ceramics. This requirement led to the development of a completely new LTCC raw material, with hyper fine milled basic materials, by our partner institute HITK. Furthermore, embossing tools have been constructed with optical surfaces (roughness < 20 nm) to transmit the optic structures into the LTCC green-foil stacks during the lamination process. Finally, new coating technologies are being tested for the final smoothing of the sintered optical surfaces. Master tooling inserts for embossing processes are produced at the IOF by ultra precision turning and the final tools, which will be used for the series-production techniques, will be made by galvanic casting of different arrays of master tools fixed on mounting plates.

Demonstrators

To demonstrate possible applications of the new LTCC-material in optical and opto-electronic modules demonstration models have been constructed, mounted and tested. Optical demonstrators such as concave mirrors or diffusers have been constructed to investigate the possibilities of substitution of traditional optical materials by precision-machined glass ceramics. A cascable LED-lighting-module with an integrated current source has been designed as an opto-electronic demonstrator. It includes both an electronic section and an LTCC-reflector section with parabolic LED-reflection-cavities, which have been formed by a combined punching-embossing technique. Finally an optic section with beam shaping elements on a structured glass

chip covers the module. All these techniques for building and mounting the different module sections are compatible with the competitive wafer-level-packaging technology. The LED-illumination module should be the starting point for the development of compact illuminating arrays with increased temperature loading.

Acknowledgement

This work was supported under contract 03WKF01E by the German BMBF. We would like to thank our project partners from SIEGERT TFT GmbH, via electronic GmbH, and HITK Hermsdorf for an effective and close collaboration.

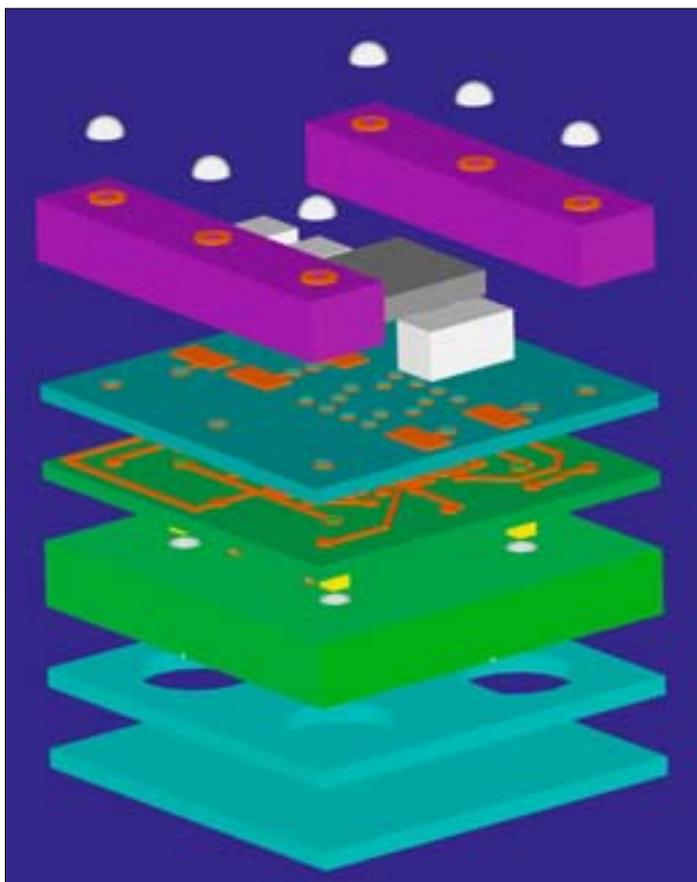


Abb. 6:
CAD-Design des optoelektronischen Demonstrators:
Kaskadierbares LED-Beleuchtungsmodul mit vier LED und integrierter Stromquelle, Abmaße: 6,6 mm x 6,6 mm x 3,4 mm.

Fig. 6:
CAD-design of an opto-electronic demonstrator module:
Cascable LED illuminating module with four LEDs and an integrated current source, dimensions: 6.6 mm x 6.6 mm x 3.4 mm.

Entwicklung einer Spezialsputteranlage für EUV-Optiken

Torsten Feigl, Sergiy Yulin, Wieland Stöckl, Norbert Kaiser



Torsten Feigl

Einleitung

Die definierte Abscheidung hochreflektierender Gradientenschichtsysteme auf ultrapräzise gefertigten Substraten ist gegenwärtig eine der größten Herausforderungen für die EUV-Optikentwicklung. Ausgehend von den Anforderungen an die optischen Komponenten eines extrem ultraviolett Lithographietools ist die EUV-Lithographie bei 13,5 nm Wellenlänge der Technologiemotor für die Entwicklung von Multilayeroptiken für den EUV-Spektralbereich sowie die weiche Röntgenstrahlung. Um den Anforderungen an die Beschichtung gerecht zu werden, wurde ein EUV-Sputtersystem – NESSY entwickelt (Abb. 1).

Konzeption

Die Beschichtung von EUV-Substraten erfolgt mit DC Magnetron-Sputtertechnologie. Hierbei bewegen sich die schnell rotierenden Substrate auf Kreisbahnen unter den Sputterquellen (sputter down). Die Anlage ist mit vier 600 mm x 125 mm Rechteckmagnetrons ausgerüstet (Abb. 2), so dass bis zu vier verschiedene Materialien während einer Substratrotation abgeschieden werden können (z. B. Molybdän und Silizium sowie zwei Interdiffusions-schichtmaterialien). Die Schichtdicken können im Subangströmbereich durch die Rotationsgeschwindigkeit und die Leistung der entsprechenden Sputterquellen eingestellt werden. Die Konstruktion des Substrathalters erlaubt die simultane Beschichtung von zwei Ø 450 mm bzw. drei Ø 300 mm Substraten (Abb. 3). Die Substrate werden über eine Schleusenkammer vom Reinraumbereich in die Sputteranlage eingebracht (Abb. 4).



Abb. 1:
DC Magnetronsputtersystem NESSY.

Fig. 1:
DC magnetron sputtering system NESSY.

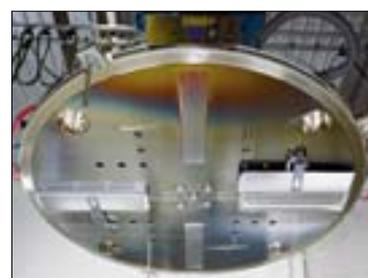


Abb. 2:
Kammerdeckel mit Targets.

Fig. 2:
Top cover with targets.

Development of a large area sputtering system for EUV optics

Torsten Feigl, Sergiy Yulin, Wieland Stöckl, Norbert Kaiser

Introduction

The accurate deposition of high reflective and laterally graded multilayers on ultraprecisely polished substrates is one of the major challenges of EUV optics development today. According to the PO box requirements of an extreme ultraviolet lithography tool, EUVL at 13.5 nm can be regarded as the technology driver to develop multilayer coated optical components for the EUV spectral range and the soft X-rays. To meet the multilayer coating requirements, a **New EUV Sputtering SYstem** – NESSY has been developed (Fig. 1).

Conception

The deposition of EUV substrates is performed by dc magnetron sputtering. The fast spinning substrates move on a circular path underneath the sputter sources (sputter down). The system is equipped with four rectangular magnetrons, 600 mm x 125 mm each (Fig. 2).

Hence, up to four different materials can be deposited during one rotation of the substrate (e.g. molybdenum and silicon and two different interdiffusion layer materials). The layer thickness can be adjusted in the sub-Angstrom range by the rotation speed and the power of the corresponding sputter source. The simultaneous coating of two Ø 450 mm substrates or three Ø 300 mm substrates is possible (Fig. 3). Substrates are transferred via load lock from the clean room area into the sputtering chamber (Fig. 4).



Sergiy Yulin



Wieland Stöckl



Norbert Kaiser



Abb. 3: Vakuumkammer mit Substratstationen.

Fig. 3: Vacuum chamber with substrate holders.



Abb. 4: Substratschleuse.

Fig. 4: Substrate load lock.

Zur Optimierung der lateralen Schichtdickenhomogenität rotieren die Substrate mit einem Spin von bis zu 500 Umdrehungen pro Minute. Der Substrat-Target-Abstand ist von 50 bis 150 mm variierbar, so dass die Installation sich bewegender Shutter zur Realisierung lateraler Schichtdickengradienten möglich ist. Die Kathodenkonstruktion erlaubt eine flexible Magnetkonfiguration, um eine optimale Anpassung an verschiedene Beschichtungsmaterialien in Bezug auf Targetnutzung und Adatomenergie zu gewährleisten. Alle Magnetrons arbeiten stabil bei einem Argon-Sputterdruck unter $7 \cdot 10^{-4}$ mbar. Die NESSY-Spezifikationen sind in Tabelle 1 zusammengefasst.

Experimentelle Ergebnisse

Mo/Si Multilayer mit verschiedenen Schichtdesigns wurden realisiert. Neben der Optimierung der Peakreflexion mit einem periodischen Design erfolgte die Maximierung und Minimierung der Bandbreite mit speziellen Breit- und Schmalband-Designs. Die Reflexion der Multilayerspiegel wurde mit Synchrotronstrahlung durch die PTB Berlin (BESSY II) kalibriert. Abb. 5 stellt die gemessenen Reflexionen vergleichend dar.

Die Optimierung der lateralen Schichtdickenverteilung erfolgte unter Nutzung speziell geformter Masken, die in Kathodennähe fixiert wurden. Eine Homogenität von $\pm 0,1\%$ auf 150 mm Substraten bzw. $\pm 0,2\%$ auf 300 mm Substraten konnte mit Mo/Si Multilayern nachgewiesen werden.

Literatur:

- /1/ Kaiser, N.; Yulin, S.; Feigl, T.; Bernitzki, H.; Lauth, H.: „EUV and soft X-ray multilayer optics“, Proc. SPIE 5250, 2003.
- /2/ Feigl, T.; Yulin, S.; Stöckl, W.; Kaiser, N.; Bernitzki, H.; Lauth, H.: „Large area sputtering system for EUVL optics“, Proc. 2nd International EUVL Symposium, 30.9.–2.10.2003, Antwerp, Belgium.

Tab. 1:
NESSY-Spezifikationen.

Substratgröße	bis Ø 450 mm
Substratstationen	2 Stationen für Ø 450 mm bzw. 3 Stationen für Ø 300 mm
Sputterquellen	vier Magnetrons, 600 mm x 125 mm
Schichthomogenität	$\pm 0,1\%$ auf 150 mm, $\pm 0,2\%$ auf 300 mm
Sputterabstand	50 mm ... 150 mm
Substratrotation	≤ 5 U/min
Substratspin	≤ 500 U/min
Kammerdruck	$< 8 \cdot 10^{-9}$ mbar
Arbeitsdruck	$< 7 \cdot 10^{-4}$ mbar

To optimize the lateral thickness homogeneity, the substrates are spun up to 500 rotations per minute during the deposition process. The target-substrate distance can be varied from 50 mm to 150 mm allowing for the installation of moving shutters to deposit laterally graded multilayers. Special effort has been made to construct the cathodes. Various magnetic configurations have been constructed in order to ensure the highest flexibility for different coating materials in terms of homogeneity requirements and adatom energy. All magnetrons work stable at a working pressure of less than $7 \cdot 10^{-4}$ mbar in argon atmosphere. The specifications are summarized in Table 1.

Experimental results

Mo/Si multilayers with different film designs were realized. Besides the maximization of the peak reflectivity using a periodic multilayer design, the maximization and minimization of the FWHM were designed and realized using special broadband and narrowband multilayer designs, respectively. Normal incidence reflection measurements were performed with synchrotron radiation at the PTB Berlin (BESSY II), Germany. Fig. 5 compares the measured reflectance of Mo/Si multilayer mirrors with a periodic, a broadband and a narrowband design.

The lateral layer thickness distribution was optimized with specially formed masks fixed close to the cathodes. A homogeneity of $\pm 0.1\%$ on 150 mm and $\pm 0.2\%$ on 300 mm has been demonstrated recently with Mo/Si multilayers.

References:

- /1/ Kaiser, N.; Yulin, S.; Feigl, T.; Bernitzki, H.; Lauth, H.: „EUV and soft X-ray multilayer optics“, Proc. SPIE 5250, 2003.
- /2/ Feigl, T.; Yulin, S.; Stöckl, W.; Kaiser, N.; Bernitzki, H.; Lauth, H.: „Large area sputtering system for EUVL optics“, Proc. 2nd International EUVL Symposium, 30.9.–2.10.2003, Antwerp, Belgium.

Tab. 1:
NESSY specifications.

Substrate size	up to Ø 450 mm
Substrate stations	2 stations for Ø 450 mm or 3 stations for Ø 300 mm
Sputter sources	4 magnetrons, 600 mm x 125 mm
Thickness homogeneity	$\pm 0.1\%$ on 150 mm, $\pm 0.2\%$ on 300 mm
Sputter distance	50 mm ... 150 mm
Substrate rotation	≤ 5 r.p.m.
Substrate spin	≤ 500 r.p.m.
Base pressure	$< 8 \cdot 10^{-9}$ mbar
Working pressure	$< 7 \cdot 10^{-4}$ mbar

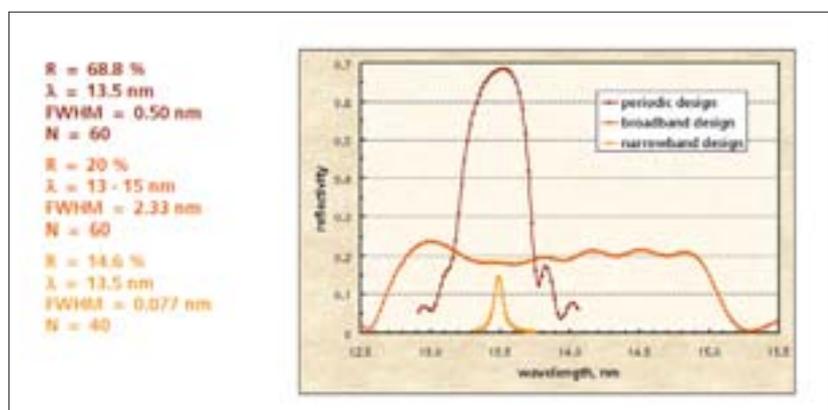


Abb. 5:
Gemessene Reflektivität von Mo/Si Multilayern.

Fig. 5:
Measured EUV reflectivity of Mo/Si multilayers.



Alexandre Gatto

Motivation

Gegenwärtige Optikentwicklungen zeichnen sich durch eine immer höhere Schaltgeschwindigkeit und Integrationsrate bei der Erzeugung, Modulation, Führung und Detektion von Licht aus. So konzentrieren sich jüngste Entwicklungen auf die mikro-mechanische Miniaturisierung optischer Elemente durch die Nutzung nanostrukturierter aktiver optischer Komponenten. Die Synergie mikro-elektro-mechanischer Systemtechnologien mit der Optoelektronik führt zu integrierten Mikrosystemen mit neuen Möglichkeiten und großem Anwendungspotential in naher Zukunft. So finden zum Beispiel mikro-opto-elektro-mechanische Systeme schon heute Anwendungen in der Mikrosensorik, Optikspeicherung, Video- und Datenprojektion, adaptiven Phasenfrontoptik und Telekommunikation.

Mikromechanikspiegel formen eine ebene Oberfläche auf einem CMOS-Schaltkreis (Abb. 1). Jeder Spiegel wird in Drehgelenken gehalten. Eine zwischen Spiegel und der darunter liegenden elektronischen Adresselektrode angelegte elektrische Spannung führt wegen der elektrostatischen Kräfte zur Verkipfung des Spiegels (Abb. 2).

Die moderne UV-Lithographie nutzt Mikromechanikspiegel als Basis einer neuen Generation von Fotomasken (Spatial Light Modulators), um die Geschwindigkeit der optischen Lithographie mit der Hochauflösung der Elektronenstrahlolithographie zu vereinen. Potentielle Anwendungen für derartige UV-Mikrospiegelarrays ergeben sich in der Halbleiterindustrie als maskenloses Lithographieverfahren – eine schnellere und kosteneffektivere Technologie als die herkömmliche optische und Elektronenstrahl-Lithographie [1], [2].

Prototypentwicklung

Die Realisierung von Mikrospiegelsystemen ist extrem anspruchsvoll. Dies gilt vor allem für den UV- und VUV-Spektralbereich, in dem optische Materialien eine hohe Absorption aufweisen und bei Bestrahlung zerstört werden können. FuE-Aktivitäten im Fraunhofer IOF konzentrieren sich daher auf die Realisierung hochreflektierender Schichtdesigns zur Herstellung defektfreier Beschichtungen für Mikrospiegelarrays, wobei sich die Anforderungen an die Schichtsysteme von denen für klassische DUV/VUV- und EUV-Lithographieanwendungen unterscheiden.



Abb. 1:
Spatial Light Modulator im Betrieb
(Fraunhofer IPMS).

Fig. 1:
Spatial Light Modulator in action
(image from Fraunhofer IPMS).

Coatings for micro-mirror arrays

Alexandre Gatto, Minghong Yang, Joerg Heber, Norbert Kaiser

Motivation

Optics today is largely concerned with the generation, modulation, guidance and detection of light at continually faster switches and higher rates of integration. Indeed, recent developments have focused on the miniaturization of physical optical elements by micro-machining with the emergence of engineered nanostructure-based active optical components. This synergistic combination of micro-electro-mechanical system technologies and opto-electronics has evolved into a class of integrated micro-systems with brand new application domains and huge expectations for opportunities in the near future. For example, micro-optical-electro-mechanical systems have already found sound positions in a wide range of fields such as micro-sensors, optical storage, video and data projection displays, adaptive phase front correction optics, lab-on-chip and telecommunications. Technically, micro-actuated mirrors form the flat surface of a CMOS circuit (fig.1). Each mirror is suspended by torsional hinges. An electric voltage is applied between the mirror surface and the underlying address electrode causing the mirror to tilt due to electrostatic forces (fig. 2).

Even modern UV-lithography employs micro-mechanical mirrors as the basis of new photomask generation technology (Spatial Light Modulator) that seeks to unify laser productivity with e-beam high-resolution technology characteristics. Potential applications for such UV micro-mirror arrays are direct writing systems for semiconductors (maskless lithography), making the production quicker and cheaper than existing laser and e-beam technologies /1/, /2/.

Prototypes development

However such systems require high light-handling abilities, particularly in the UV and VUV range where materials absorb and electromagnetic radiation is potentially damaging. At the Fraunhofer IOF, research activities focused on coating development for micro-structured mirrors concentrate on high-reflecting designs for the realization of defect free actuated micro-mirror coatings. Since micro-mirror arrays are inherently 2-dimensional but on a nanometric scale, requirements are different to those for optical systems used for the DUV/VUV-EUV spectral range (designed for the lithography).



Minghong Yang



Joerg Heber



Norbert Kaiser

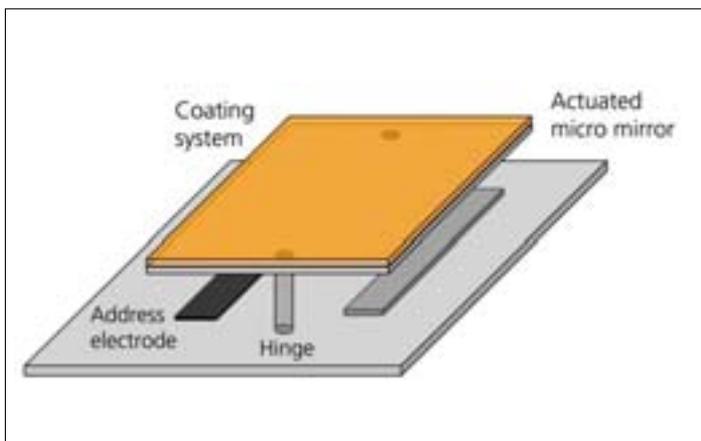


Abb. 2: Beispiele für montierte Mikrospiegel.

Fig. 2: Examples of actuated micro-mirrors. Schematic sketches.



Die besondere Herausforderung besteht in der definierten Abscheidung hochreflektierender und schichtspannungsfreier Systeme. Da Mikrospiegelarrays in einer MOEMS-Umgebung mit entsprechenden Anforderungen an optische sowie mechanische Eigenschaften und in Kompatibilität mit der elektronischen Struktur eingesetzt werden, müssen auch die Beschichtungen mit der CMOS-Struktur kompatibel sein.

Das Fraunhofer IOF arbeitet als Partner einer „Wirtschaftsorientierten Strategischen Allianz – WISA“ zusammen mit dem Fraunhofer IPMS, Fraunhofer IWS und dem Fraunhofer IZFP. Hierbei leitet das Fraunhofer IOF das Arbeitspaket „Optik“ mit dem Ziel der Realisierung hochreflektierender und defektfreier Beschichtungen für Mikrospiegelarrays.

Dielektrische sowie metallische Systeme wurden im NIR, VIS, UV und VUV untersucht. Oxidische und fluoridische Schichtmaterialien wurden in Hinblick auf ihre CMOS-Kompatibilität sowie ihre optischen und mechanischen Eigenschaften analysiert.

Für den VUV-Spektralbereich wurden metallische Systeme mit Deckschutzschichten entwickelt, die mit verschiedenen Beschichtungsverfahren, wie Elektronenstrahlverdampfung und Magnetronspütern, abgeschieden wurden. Reflektivitäten von $R > 91\%$ bei einer Wellenlänge von 193 nm und $R = 90\%$ bei einer Wellenlänge von 157 nm wurden mit Schichtsystemen auf Aluminium-Basis realisiert. Wie in Abb. 5 gezeigt, wird eine hohe Reflektivität bis 150 nm Wellenlänge erreicht, was wichtig für eine Anwendung bei beiden Wellenlängen ist.

Somit müssen Beschichtungen für Mikrospiegelarrays eine Vielzahl von Anforderungen hinsichtlich der Prozessentwicklung erfüllen. Dazu zählen die CMOS-Kompatibilität, eine Spannungsoptimierung der Schichtsysteme, um die Ebenheit der Spiegel zu garantieren, sowie die Minimierung von Schichtdefekten (Abb. 3, 4, 5).

Literatur:

- /1/ Sandström, T.; Ljungblad, U.B.; Dürr, P.; Lakner, H.: „High-performance laser pattern generation using spatial light modulators (SLM) and deep-UV radiation“, Proceedings of SPIE, Vol. 4343 (2001) 35.
- /2/ „MEMS and the mask muddle: small isn't cheap“, Small Times Correspondent, July 11, 2003; www.smalltimes.com.

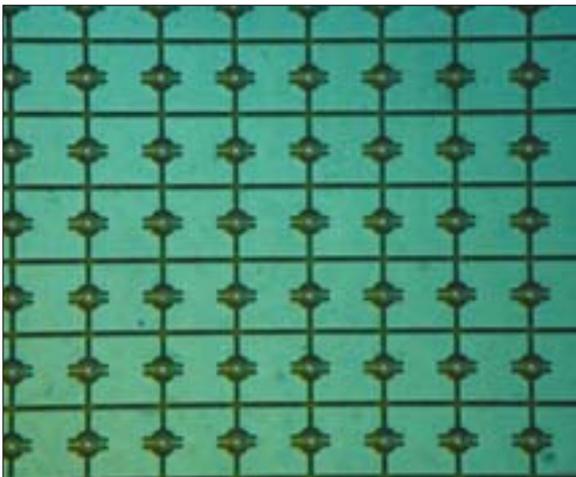


Abb. 3: Aufnahme von $16 \times 16 \mu\text{m}$ Spiegelarrays (Nomarski Mikroskop).

Fig. 3: Normaski microscope image of $16 \times 16 \mu\text{m}^2$ mirror arrays.

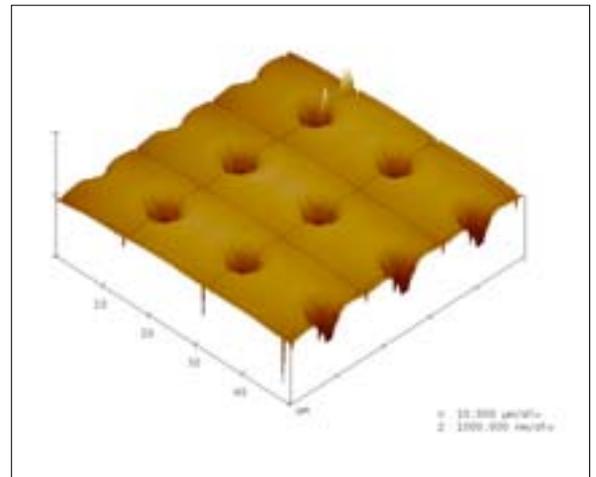


Abb. 4: Rasterkraftmikroskopische Aufnahme eines beschichteten Mikrospiegelarrays.

Fig. 4: Atomic force microscopy of a coated micro-mirror array.

This consequently challenges optics development to provide smart compatible solutions with minimized coating-stress and optimised optical performances. Since micro-structured mirrors must operate in an MOEMS environment with high requirements concerning optical and mechanical properties, clean atmosphere and cohabitation with the electronic structure and micro-mechanical mirror coatings must be designed to be compatible with CMOS structure.

The Fraunhofer IOF is part of an economically based strategic alliance (Wirtschaftsorientierte Strategische Allianz – „WISA“) called „Next Generation Micromechanical Mirrors“ in association with three Fraunhofer institutes (Fraunhofer IPMS, Fraunhofer IWS and Fraunhofer IZFP). The Fraunhofer IOF leads the optical task that targets the development of high reflection, defect free coatings on micro-mirror arrays.

Dielectric multilayers and metal systems are investigated for the NIR, VIS, UV and VUV ranges. With regard to dielectric multilayers, oxides and fluoride materials are analysed for CMOS compatibility, for accumulated stresses and optical and physical properties. For the VUV range, metal systems have been developed with various technologies such as thermal evaporation and magnetron sputtering with proactive capping layers. Reflectivity above 91 % is achieved at 193 nm and reflectivity around 90 % is reached at 157 nm with thin and low stress aluminium-enhanced reflection systems. As shown in Fig. 5, a broadband high reflectivity is available up to 150 nm, which is of great interest for applications at both wavelengths.

Thus, coatings for micro-mirror arrays have to tackle numerous issues related to the complete development of the process, merging CMOS compatibility and induced stress control in order to guarantee a surface flatness and a defect minimized structure (fig. 3, 4, 5).

References:

- /1/ Sandström, T.; Ljungblad, U.B.; Dürr, P.; Lakner, H.: „High-performance laser pattern generation using spatial light modulators (SLM) and deep-UV radiation“, Proceedings of SPIE, Vol. 4343 (2001) 35.
- /2/ „MEMS and the mask muddle: small isn't cheap“, Small Times Correspondent, July 11, 2003; www.smalltimes.com.

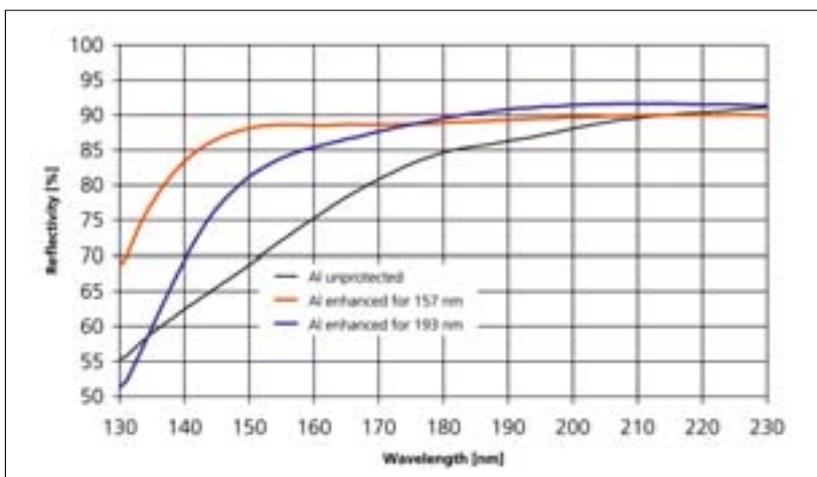


Abb. 5:
Aluminium-System erweitert für 157 nm und 193 nm auf Si-Substrat.
Vergleich mit ungeschützter Al-Schicht,
Gesamtdicke < 100 nm, gesamte Spannung < 150 Mpa.

Fig. 5:
Enhanced aluminium system for 157 nm and 193 nm on Si substrate.
Comparison with unprotected aluminium coating.
Total thickness < 100 nm. Total stress < 150 Mpa.

Rugatefilter für den nahen infraroten und visuellen Spektralbereich

Olaf Stenzel, Dieter Gäbler, Norbert Kaiser



Olaf Stenzel

Einleitung

Dünne optische Schichten bzw. Schichtsysteme sind heute aus der angewandten Optik nicht mehr fortzudenken. Üblicherweise besteht ein Dünnschichtsystem aus einer Serie übereinander gestapelter Einzelschichten mit verschiedenen (häufig alternierenden) Brechungsindizes. Die gewünschte Spezifikation des optischen Dünnschichtsystems (z. B. eine hohe Transmission oder Reflexion in einem vorgegebenen Spektralbereich) wird dann durch das Wechselspiel konstruktiver und destruktiver Interferenz zwischen den an den internen Grenzflächen reflektierten Lichtwellen erreicht. Im Einklang mit diesem Wirkprinzip basiert die mathematische Beschreibung des optischen Spektrums derartiger Dünnschichtsysteme auf Modellvorstellungen wie optischer Homogenität innerhalb einer Schicht und „unendlich dünnen“ Grenzflächen zwischen den einzelnen Schichten. Der mathematische Apparat zur Analyse und dem Design derartig modellierter Dünnschichtsysteme ist im Detail ausgearbeitet, und die kommerziell verfügbaren Beschichtungsanlagen und -technologien sind im Hinblick auf die Abscheidung homogener Einzelschichten und scharfer Grenzflächen optimiert /1/.

Die Idee

Ein qualitativ anderer Ansatz der Dünnschichtoptik wird mit so genannten Gradientenschichten und Rugatefiltern verfolgt. Dabei wird angestrebt, die alternierenden hoch- und niedrigbrechenden Schichten in herkömmlichen Schichtsystemen durch einen geeigneten stetigen Brechzahlverlauf zu ersetzen.

Da in einem derartigen Schichtsystem faktisch keine internen Grenzflächen mehr vorkommen, verspricht man sich davon sowohl bessere mechanische Eigenschaften als auch verbesserte optische Wirksamkeit, etwa durch Reduktion der optischen Streuverluste.

Will man derartige Systeme in der Praxis herstellen, so sieht man sich einer Reihe ernster Herausforderungen gegenüber. Die mathematische Behandlung von Gradientenschichten und Rugatefiltern ist längst nicht so weit ausgereift wie die der herkömmlichen Schichtsysteme, und die bereits ausgearbeiteten Ansätze sind in der kommerziellen Software im allgemeinen nicht verfügbar. Dazu kommen technologische Probleme: Die traditionelle Beschichtungstechnik ist gerade nicht auf die reproduzierbare Abscheidung inhomogener Schichtsysteme optimiert.

Die Abteilung Optische Schichten am IOF arbeitet derzeit im Rahmen eines vom BMWA geförderten Verbundprojekts an der technologischen Realisierung von Rugatefiltern für den nahen infraroten bzw. visuellen Spektralbereich. Unter einem Rugatefilter versteht man ein Schichtsystem, dessen optische Funktion auf einem mit steigender Schichttiefe sinusförmigen Brechzahlverlauf beruht. Derartige Brechzahlverläufe sind für die Herstellung schmalbandiger Reflektoren ohne nennenswerte Seitenbanden in Diskussion. Ziel des IOF in technologischer Hinsicht ist dabei, die plasmationengestützte Abscheidung mittels APS (Advanced Plasma Source) für die Herstellung von Rugatefiltern zu qualifizieren.

Rugate filters for the near infrared and visible spectral regions

Olaf Stenzel, Dieter Gäbler, Norbert Kaiser

Introduction

Optical coatings are of crucial importance in any branch of applied optics today. Typically, an optical coating consists of a stack of thin solid films with different (often alternating) refractive indices. The desired specification of the coating (for example a high transmittance or a high reflectance over a given spectral range) is achieved as a result of the interplay between destructive and constructive interference of light waves that are reflected internally at the film interfaces. Correspondingly, the theoretical description of the optical spectrum of optical coatings is based on model assumptions such as optical homogeneity inside the film and infinitesimally thin interfaces between the single films. Mathematical analysis and design of optical coatings with respect to the model assumptions referred to above are well-developed, and commercially available deposition systems and technologies are optimised with respect to deposition of homogeneous films with sharp and smooth internal interfaces [1].

General idea

A qualitatively different approach in thin film optics is based on the so-called gradient index layers and rugate filters. In this case, the stacks of alternating high- and low-index films are replaced by a continuous refractive index profile along an axis that is perpendicular to the film surface. Such a system does not contain internal interfaces, and therefore one expects better mechanical properties as well as a better optical performance due to a lower level of scatter losses.

However, manufacturing such systems in practice turns out to be quite a challenging task. The mathematical treatment of gradient index layers and rugates is no trivial matter, and the existing theoretical approaches are not yet available in the commercially produced thin film software. Furthermore there is a serious technical problem, namely that the conventional thin film deposition technology is not optimised with respect to the reproducible deposition of smooth refractive index profiles.

The department of optical coatings at Fraunhofer IOF in Jena participates in a joint research project that pursues the development of deposition strategies and technologies for rugate filters. A rugate filter represents a coating with a sinusoidal refractive index profile. Rugate filters are candidate systems for narrowband thin film reflectors without higher harmonics in the reflection spectrum. In this context, it is the purpose of the Fraunhofer IOF to develop and optimise the plasma-ion assisted deposition technique by means of the APS (Advanced Plasma Source) for the production of rugate filters specified for the near infrared and visible spectral regions.



Dieter Gäbler



Norbert Kaiser

Erste Ergebnisse

In unseren Experimenten streben wir derzeit an, Rugatefilter auf oxidischer Basis herzustellen. Der sinusförmige Brechzahlverlauf soll dabei durch Mischung hoch- und niedrigbrechender Schichtmaterialien mit nahezu sinusförmig variiertem Mischverhältnis realisiert werden. Als niedrigbrechende Substanz kommt dabei Siliziumdioxid (SiO_2) zum Einsatz, wogegen als hochbrechende Substanz das Niobiumpentoxid (Nb_2O_5) Verwendung findet. Beide Materialien werden gleichzeitig aus Elektronenstrahlverdampfern bei laufender Plasmastützung verdampft. Durch gezielte Variation der Verdampfungsraten scheidet sich auf dem Substrat eine Mischung mit dem durch das Mischverhältnis (und damit letztlich das Ratenverhältnis) gesteuerten Brechungsindex ab.

Man stellt in der Praxis tatsächlich fest, dass durch die Mischung der beiden Ausgangssubstanzen optische Materialien erhalten werden, deren Brechungsindizes zwischen denen der Ausgangsmaterialien liegen.

Das ist in Abb. 1 gezeigt, wo die experimentell ermittelten Brechungsindizes einiger Mischungen zusammen mit denen von SiO_2 und Nb_2O_5 aufgetragen sind.

Mit der beschriebenen Methode ist es nun möglich, komplexe Schichtsysteme mit nahezu sinusförmigem Brechzahlprofil herzustellen. Abb. 2 zeigt das Reflexionsspektrum eines derartigen Rugatefilters mit 20 Perioden. Zum Vergleich ist ein herkömmlicher so genannter Quarterwave-Stack gezeigt, der aus alternierenden SiO_2 - und Nb_2O_5 -Schichten besteht. Beide Spektren sind unter senkrechtem Lichteinfall aufgenommen. Die Bandbreite des Reflexionspeaks wird durch den maximalen Brechzahlkontrast bestimmt. Da bei der Herstellung des Rugatefilters nicht zwingend der gesamte dynamische Bereich der in Abb. 1 dargestellten Brechungsindizes genutzt wurde, erhalten wir einen deutlich schmaleren Reflexionspeak als bei dem aus den Reinsubstanzen hergestellten Quarterwave-Stack.

Abb. 3 zeigt eine elektronenmikroskopische Querschnittsaufnahme der ersten zwei Brechzahlperioden eines derartigen Rugatefilters. Der Konzen-

trations- und damit der Brechzahlverlauf ist hierbei durch die mit steigender Schichttiefe veränderliche Grautönung verdeutlicht. Offenbar liegt tatsächlich ein stetiges Brechzahlprofil vor, das – wie genauere Analysen zeigen – bereits nahezu sinusförmig ist. Interessanterweise ist auf dem Bild weiterhin eine schnell oszillierende Substruktur erkennbar. Sie rührt von der Drehung des Substrattellers her, der während der Beschichtung über den Verdampferquellen rotiert. Für das optische Verhalten im auf Abb. 2 gezeigten Spektralbereich ist dieser Effekt allerdings ohne Bedeutung.

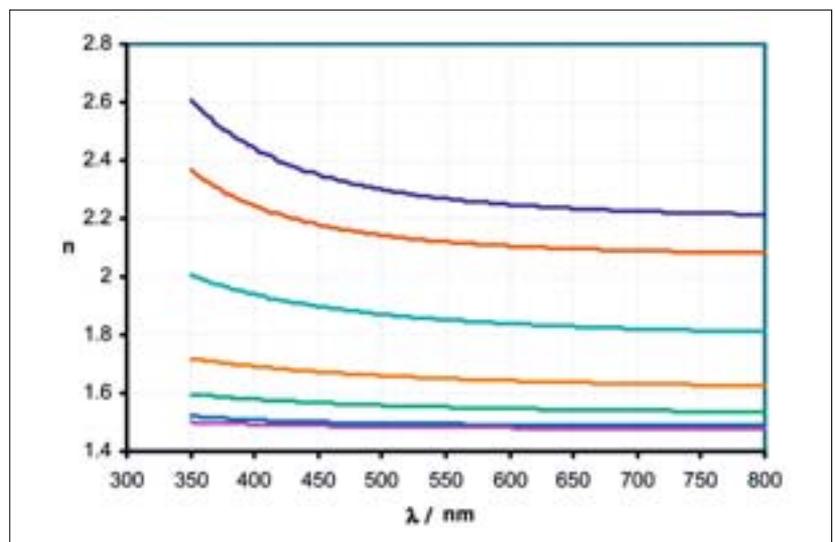
Ausblick

Im weiteren Projektverlauf wird es Aufgabe des IOF sein, Brechzahlverläufe zu berechnen und experimentell zu realisieren, die zur Erzielung praxisrelevanter Spektralcharakteristika nach Vorgabe im Projekt beteiligter Industriepartner notwendig sind.

Literatur:
/1/ Macleod, H. Angus: „Thin film optical filters“, IOP Publishing, Bristol and Philadelphia 2001.

Abb. 1: Brechungsindizes n von Mischschichten und Ausgangssubstanzen als Funktion der Wellenlänge λ . Die oberste Kurve zeigt den Brechungsindex von Nb_2O_5 , die unterste den von SiO_2 . Die dazwischenliegenden Kurven verdeutlichen den Brechungsindex von Mischschichten mit (von oben nach unten) sinkendem Anteil von Nb_2O_5 .

Fig. 1: Refractive indices n of mixture films and the pure substances as a function of the wavelength λ . The top curve corresponds to Nb_2O_5 , and the bottom curve to SiO_2 . The intermediate curves correspond to mixtures with decreasing (from top to bottom) content of Nb_2O_5 .



First results

At present, we perform rugate filter deposition experiments utilizing oxide materials. The sinusoidal refractive index profile is prepared intermingling high- and low-refractive index materials with a variable (nearly sinusoidal) mixing ratio. We used silicon dioxide (SiO_2) as the low refractive index material, and niobium pentoxide (Nb_2O_5) as the high index material. Both materials are electron beam evaporated in high vacuum conditions with instantaneous plasma assistance. The desired refractive index profile can be achieved by precisely varying the evaporation rates of the high- and low-index materials.

It is experimentally established that the material mixtures produced by such co-evaporation processes have refractive indices that fall between those of the pure materials. This is demonstrated in Fig. 1, which shows the wavelength-dependent refractive indices of SiO_2 and Nb_2O_5 together with those of their mixtures.

By means of the technology described above it is possible to manufacture more complex optical coatings with a nearly sinusoidal refractive index profile. Fig. 2 shows the measured reflectance of such a rugate-filter that is built from 20 periods. For comparison, the figure also shows the reflectance of a conventional quarterwave-stack that consists of alternating SiO_2 - and Nb_2O_5 -films. Both spectra have been recorded at normal light incidence. The bandwidth of the reflection band is determined by the refractive index contrast. When producing rugate filters with a small modulation depth of the refractive index, the reflection band may be considerably narrower than in the case of a quarterwave stack built from the pure materials. This is also shown by Fig. 2.

Finally, Fig. 3 shows the cross-section electron micrograph of a rugate filter. Particularly, the first two periods starting from the substrate are presented. The concentration (and refractive index) profile obviously changes in a continuous manner with increasing distance from the substrate. A more detailed analysis shows that the profile is indeed close to a sinusoidal one.

In addition, one sees a more rapidly oscillating substructure in the image. The latter arises from the rotation of the substrate holder. During deposition, the substrate performs a rotating motion over the electron beam evaporators, which leads to an additional modulation of the coating's compositional profile. However, this substructure does not affect the optical behaviour of the samples within the spectral range shown in Fig. 2.

Outlook

Within the future of this project, it will be the task of the Fraunhofer IOF to calculate and manufacture rugate filters with more complicated refractive index profiles that can comply with specifications, formulated by the industrial partners participating in the project, which are both challenging and of practical importance.

References:

- /1/ Macleod, H. Angus, „Thin film optical filters“, IOP Publishing, Bristol and Philadelphia 2001.

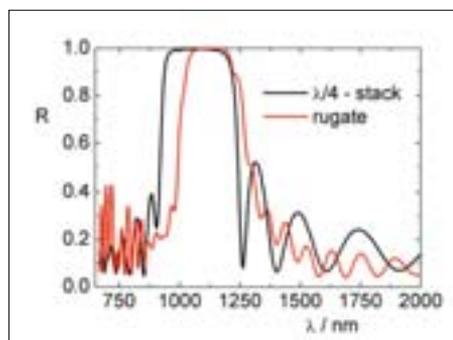


Abb. 2: Reflexionsvermögen eines Quarterwave-Stacks ($\lambda/4$ -Stack, schwarz) und eines Rugatefilters (rot) als Funktion der Wellenlänge.

Fig. 2: Reflectivity of a quarterwave stack ($\lambda/4$ -stack, black) and a rugate filter (red) as a function of the wavelength.



Abb. 3: TEM-Querschnittsaufnahme der ersten zwei Perioden eines Rugatefilters. Aufnahme von Ute Kaiser, FSU Jena.

Fig. 3: TEM cross-sectional image of the first two periods of a rugate filter. Courtesy of Ute Kaiser, FSU Jena.

AR-hard® – Beschichtung mit einstellbarer spektraler Bandbreite für Kunststoffoptik

Ulrike Schulz, Uwe B. Schallenberg*, Norbert Kaiser

* mso mikroschichtoptik jena GmbH



Ulrike Schulz

Multifunktionale Beschichtungen

Transparente Kunststoffe ersetzen heute an vielen Stellen die traditionell für optische Bauteile verwendeten anorganischen Gläser (Abb. 1). Von Vorteil sind dabei das geringe Gewicht, die hohe Bruchfestigkeit und die flexiblen Möglichkeiten zur Formgebung. Für Kunststofflinsen werden, wie für Glasoptiken, Antireflexbeschichtungen (AR) benötigt. Daneben werden oft auch Kratzschutzbeschichtungen mit einer Mindestdicke im Mikrometerbereich gefordert. Die meisten Erfahrungen mit kratzfesten Antireflexschichten existieren im Bereich der Brillenglasfertigung. Beschichtungen für Brillengläser müssen besonders hohe Ansprüche bezüglich Härte und Klimastabilität erfüllen. Bisher werden dabei Antireflexschichtsysteme aus vier bis sechs Einzelschichten oberhalb einer zuvor aufgetragenen zwei bis vier Mikrometer dicken Hartschicht abgeschieden.

Neuartiges Schichtdesign

Ziel der Forschungsarbeiten im IOF war die Integration der optischen Funktion für die Entspiegelung in die Hartschicht. Im Ergebnis entstand ein neuer Typ von Schichtdesign: „AR-hard®“ /1/. Die neue multifunktionale Beschichtung kann in einem einzigen Vakuumprozess hergestellt werden. Dabei hängt die Kratzfestigkeit der Beschichtung maßgeblich von der Gesamtschichtdicke ab. Beschichtungen mit einer Dicke von drei Mikrometern bestehen sogar einen Stahlwolle-Abriebtest /2/.

Antireflexschichten vom Typ AR-hard® können als Aufeinanderfolge von symmetrischen Schichtfolgen aus je drei Schichten beschrieben werden, wobei in jeder dieser „Perioden“ eine sehr dünne hochbrechende Schicht von zwei wesentlich dickeren niedrigbrechenden Schichten umgeben ist. In Abb. 2 ist dieses Prinzip schematisch dargestellt. Typische Schichtmaterialien für den Aufbau sind SiO_2 , ein hartes Oxid mit niedriger Brechzahl, und TiO_2 als Material mit hohem Brechungsindex.

Theorie

Die drei Einzelschichten in den Perioden müssen so gewählt werden, dass eine mathematische Äquivalenz zu einer Einzelschicht gegeben ist. Die besondere Entdeckung bestand darin, dass Schichtfolgen gefunden wurden, die zur Entspiegelung geeignet sind. Es wurden mathematische Beziehungen abgeleitet, mit denen die Einzelschichtdicken für den Aufbau von Perioden so berechnet werden können, dass die äquivalenten Brechzahlen der daraus gebildeten Perioden zwischen 1,5 und 1,09 betragen. Solche Perioden werden dann mit abnehmender äquivalenter Brechzahl vom Substrat zur Luft aufeinander angeordnet. Eine Voraussetzung für die Eigenschaft der sehr kleinen äquivalenten Brechzahl ist, dass die optische Dicke einer solchen Periode mindestens das Dreifache der optischen $\lambda/4$ -Schichtdicke bei der Schwerpunktswellenlänge für die Entspiegelung (3 QWOT) beträgt /3/.

Abb. 1: Kunststofflinsen für optische Anwendungen.

Fig. 1: Plastic lenses for optical applications.



AR-hard® – coating with adjustable spectral bandwidth for plastic optics

Ulrike Schulz, Uwe B. Schallenberg*, Norbert Kaiser
*mso mikroschichtoptik jena GmbH

Multifunctional coatings

Highly transparent thermoplastic polymers offer significant weight reduction, cost saving and manufacturing advantages for optical components (Fig. 1). Antireflection (AR) coatings and hard coatings with a physical thickness of at least one micron are required for plastic optics and plastic display windows. Requirements in respect of hardness and scratch resistance are strongly dependent on the kind of application. Most experience with scratch resistant antireflection coatings is in the field of ophthalmics. Coatings for eyeglasses must fulfill stringent requirements regarding their susceptibility to abrasion and environmental conditions. Antireflection layers, which consist of four to six single layers (already established from classical theory), are typically arranged on top of a 2–4 micron thick hard coating.

New coating design

Our efforts were aimed at developing an AR coating for plastic substrates, which is itself scratch-resistant. As a result, a special type of AR design „AR-hard®“ with a quasi-periodic structure has been developed /1/. The complete coating can be deposited in a single physical vapor deposition process. The scratch resistance depends mainly on the total physical thickness. Coatings with thicknesses of 3 microns can be rubbed with steel wool without scratches /2/.

Antireflection coatings of the AR-hard® type can be visualized as an arrangement of symmetrical three-layer periods, each consisting of a very thin high refractive index layer H in the middle of two thick low refractive index layers L. Fig. 2 shows this principle schematically.

Typical layer materials are SiO₂ as a hard oxide with a low refractive index and TiO₂ as a high refractive index material.

Theory

Each of the symmetrical periods can be interpreted as an equivalent layer with three times the quarter wave optical thickness (3 QWOT). Any symmetrical combination of thin films (that is one in which the sequence of layers is unchanged when they are listed in reverse order) can be represented mathematically by a single equivalent film having an equivalent index n and an equivalent phase thickness. It has been demonstrated that symmetrical LHL periods of three QWOT's can be applied to replace layers with unobtainable refractive indices that are lower than the index of the low index material L used for the coating. The design concept of AR-hard® uses equivalent layers to build up a layer stack matching the refractive index of the substrate to that of air. The mathematical relation between the 3 QWOT periods and the respective thicknesses of the single layers H and L used to build up such periods, has been deduced as a condition for design synthesis /3/.



Uwe B. Schallenberg



Norbert Kaiser

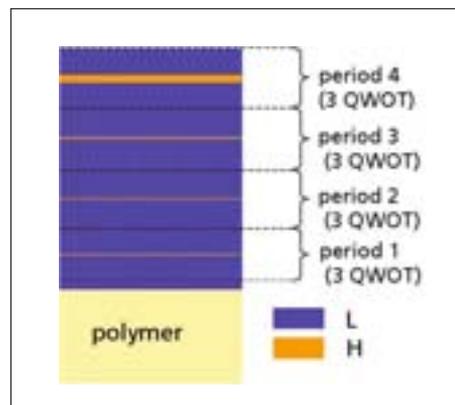


Abb. 2: Schematische Darstellung des Schichtaufbaus von AR-hard® als Abfolge von symmetrischen 3-Schicht-Perioden.

Fig. 2: Schematic of coating design AR-hard®; arrangement of 3-layer periods.

Eine charakteristische Größe jedes Entspiegelungsbelages ist seine spektrale Bandbreite (BW). Sie ist definiert als der Quotient der Wellenlängen am langwelligeren und kurzwelligen Ende des entspiegelten Spektralbereiches. Die Bandbreite einer AR-hard®-Beschichtung, die aus den zuvor beschriebenen 3-Schicht-Perioden besteht, erreicht typisch einen Wert von ca. 1,5. Damit kann man zum Beispiel die Restreflexion im sichtbaren Spektralbereich von 420 nm bis 670 nm von 4 % auf < 0,1 % absenken (Abb. 3a). Für kleinere Bandbreiten kann die Restreflexion sogar auf einen Wert < 0,001 % reduziert werden (Abb. 3b).

Breitbandentspiegelung

Manche Anwendungen erfordern jedoch eine breitbandigere Entspiegelung. Beispiele dafür sind Linsen mit großem Krümmungsradius. Vorteilhaft sind breitere Entspiegelungsbeläge auch für Brillengläser, da der verbleibende Farbreflex dann sehr konstant für verschiedene Einfallswinkel des

Lichtes ist. Neue theoretische Untersuchungen des Designtyps AR-hard® haben gezeigt, dass die Bandbreite verbreitert werden kann, wenn man anstatt der 3-Schicht-Perioden andere Schichtaufbauten aus vier oder fünf Schichten verwendet, die insgesamt deutlich dicker sind (z. B. 4 QWOT oder 5 QWOT). In Abb. 4 ist ein solches Design schematisch dargestellt. Es besteht aus drei übereinander gestapelten Schichtfolgen, welche jeweils eine optische Dicke von 4 QWOT aufweisen. Mit diesem Designtyp kann zum Beispiel die Restreflexion eines Brillenglases aus CR 39 im Spektralbereich von 400 nm bis 800 nm auf 0,3 % gesenkt werden (Abb. 3c). Ein solches Brillenglas zeigt einen nur sehr schwachen Farbeindruck, der auch bei schräger Betrachtung unverändert bleibt (Abb. 5). Bemerkenswert ist, dass solche Designs nicht länger das Produkt von Optimierungsverfahren unter Verwendung von Dünnschichtsoftware sind, sondern mit Hilfe der neu abgeleiteten Algorithmen und Formeln berechnet werden können /4/.

Für die Entwicklung dieses Beschichtungsverfahrens erhielten die Wissenschaftler 2003 den Joseph-von-Fraunhofer-Preis.

Literatur:

- /1/ Schulz, U.; Schallenberg, U. B.; Kaiser, N.: „Antireflective coating“ PCT/DE 01/02501 (2000).
- /2/ Schulz, U.; Schallenberg, U. B.; Kaiser, N.: „Antireflective coating design for plastic optics“, Applied Optics 41, (2002) 3107–3110.
- /3/ Schulz, U.; Schallenberg, U. B.; Kaiser, N.: „Symmetrical periods in antireflective coatings for plastic optics“, Appl. Opt. 42, 1346–1351 (2003).
- /4/ Schallenberg, U. B.; Schulz, U.; Kaiser, N.: „Multicycle AR coatings: a theoretical approach“, SPIE 5250 (in print).

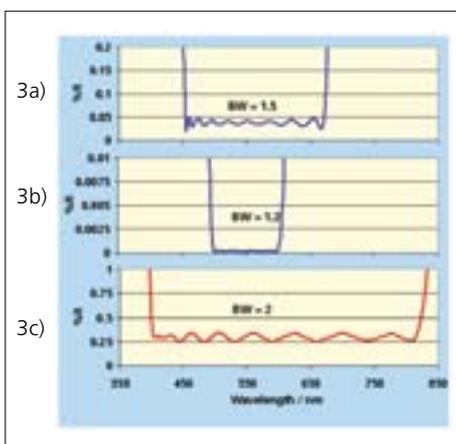


Abb. 3:
 Restreflexion von AR-hard®-Beschichtungen unterschiedlicher spektraler Bandbreite auf einem Polymersubstrat ($n = 1,53$)
 a), b) Anordnungen von 3-Schicht-Perioden mit 3 QWOT;
 c) Anordnung von Schichtstapeln mit 4 QWOT, die aus jeweils fünf Einzelschichten bestehen.

Fig. 3:
 Residual reflectance of AR-hard® coatings with different spectral bandwidth on polymer substrate ($n = 1.53$)
 a), b) arrangements of 3-layer periods with 3 QWOT;
 c) arrangement of layer stacks with 4 QWOT.

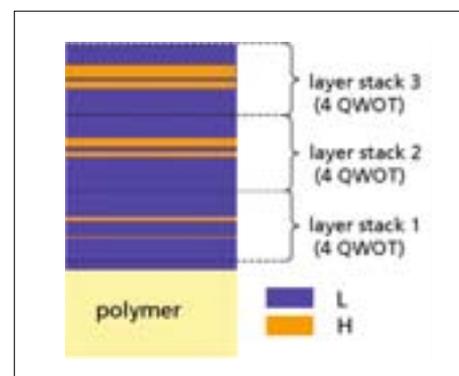


Abb. 4:
 Schematische Darstellung eines breitbandigen AR-hard®-Schichtsystems als Abfolge von jeweils aus fünf Schichten aufgebauten Schichtstapeln.

Fig. 4:
 Schematic of coating design AR-hard®: arrangement of layer stacks with thickness of 4 QWOT each.

A characteristic value for an AR design is its spectral bandwidth (BW) which is defined by the wavelength at the long wavelength end divided by the wavelength at the short wavelength end. The bandwidth of AR-hard®-coatings consisting of three layer LHL periods as described above is limited to about 1.5. This bandwidth covers, for example, the spectral range of visible light from 450 nm to 670 nm for a target residual reflection of 0.1 % as shown in Fig. 3a. Besides, for a bandwidth of 1.2 the residual reflectance can be decreased to less than 0.001 % (Fig. 3b).

Broadband antireflection coating

AR-hard® designs for broader bandwidth are required for optical parts with a high curvature radius and for applications which require a wide range for the angle of light incidence. In addition, broader designs are useful for eyeglass coatings with uniform color impression for different viewing angles. Our new investigations show,

that the bandwidth of AR-hard® can be broadened if layer stacks with greater total phase thickness are used in the step-down arrangement instead of the three layer periods LHL. As before, each of the layer stacks must meet the condition of mathematical equivalence to a single layer with very low refractive index. Such stacks with phase thickness of 4 QWOT and 5 QWOT are suitable to build up a design with an antireflection bandwidth up to 2 and 3 respectively. An AR-hard, design consisting of 3 layer stacks with 4 QWOT is shown schematically in Fig. 4. Using a design of this type, the residual reflectance of a CR39 polymer lens can be decreased to about 0.3% in a spectral region from 400 nm to 800 nm (Fig. 3c). For example, an eyeglass with such coating shows only a marginal color impression, which does not change with the viewing angle (Fig. 5). A notable fact is that designs of this type are not the result of optimization procedures with suitable thin-film software, they are analytical solutions using an algorithm and a set of formulas /4/.

For the development of this coating process the scientists 2003 received the Joseph of Fraunhofer price.

References:

- /1/ Schulz, U.; Schallenberg, U. B.; Kaiser, N.: „Antireflective coating“ PCT/DE 01/02501 (2000).
- /2/ Schulz, U.; Schallenberg, U. B.; Kaiser, N.: „Antireflective coating design for plastic optics,“ Applied Optics 41, (2002) 3107–3110.
- /3/ Schulz, U.; Schallenberg, U. B.; Kaiser, N.: „Symmetrical periods in antireflective coatings for plastic optics“, Appl. Opt. 42, 1346–1351 (2003).
- /4/ Schallenberg, U.B.; Schulz, U.; Kaiser, N.: „Multicycle AR coatings: a theoretical approach“, SPIE 5250 (in print).



Abb. 5:
AR-hard®-Breitbandbeschichtung auf einer Teilfläche eines CR39-Brillenglases.

Fig. 5:
AR-hard® broadband coating on CR39 eyeglass.

Dirk Michaelis, Henrike Trompeter*, Ulrich Streppel, Ulf Peschel*,
Thomas Pertsch*, Andreas Bräuer, Falk Lederer*
*Friedrich-Schiller-Universität Jena



Dirk Michaelis

Einleitung

Die rasante Entwicklung der optischen Datenübertragung erfordert zunehmend optische Bauelemente mit erhöhter Qualität, Zuverlässigkeit und Funktionalität. Allerdings beschränkt die Verwendung herkömmlicher optischer Materialien diese optischen Elemente in ihrer Leistungsfähigkeit. Der Fortschritt in Strukturierungstechnologien ermöglicht die Herstellung so genannter Metamaterialien mit problemangepassten, optimierten Eigenschaften.

Das vielleicht bekannteste Beispiel eines solchen Metamaterials ist ein photonischer Kristall, also ein im Subwellenlängenbereich periodisch strukturiertes Medium, in welchem Beugung, Brechung, Gruppengeschwindigkeitsdispersion etc. in weiten Bereichen variiert werden können. Ein Wellenleiterarray (Abb. 1) stellt ein weiteres Beispiel eines Metamaterials mit steuerbaren optischen Eigenschaften dar [1]. Eine Lichtverteilung in einem Array besteht aus den durch evaneszente Schwänze gekoppelten Moden der Einzelwellenleiter. Die Dynamik optischer Felder wird somit einerseits durch die Eigenschaften der Einzelwellenleiter als auch andererseits durch

das Koppelverhalten der Wellenleiter untereinander bestimmt. Im Folgenden wird demonstriert, dass neuartige lokalisierte Zustände an Defekten bzw. Inhomogenitäten in Wellenleiterarrays existieren, die kein Analogon in der konventionellen integrierten Optik besitzen.

Wellenleiterarrays auf Polymerbasis

Die Arrays bestanden aus 101 Polymerwellenleitern ($n_{co} = 1,547$) auf einem thermisch oxidierten Siliziumwafer ($n_{sub} = 1,457$) mit einem Polymercladding ($n_{cl} = 1,544$) (Abb. 1). Diese Proben wurden mittels UV-Lithographie auf 4 Zoll-Wafern hergestellt, so dass optische Propagationslängen von bis zu 7 cm möglich waren. Die Wellenleiterhöhe betrug $3,5 \mu\text{m}$. Hingegen wurden Arrays mit verschiedenen Wellenleiterbreiten zwischen $2,5$ und $4,5 \mu\text{m}$ und Wellenleiterabständen zwischen 4 und $5 \mu\text{m}$ untersucht. Die jeweilige Konfiguration garantiert Monomodigkeit der dämpfungsarmen ($< 0,1 \text{ dB/cm}$) Einzelwellenleiter, die miteinander über Nächste-Nachbar-Wechselwirkung gekoppelt sind. Durch eine lokale Variation der Wellenleiterbreite bzw. der Wellenleiterabstände können Defekte in ein ansonsten homogenes Array eingebracht werden.

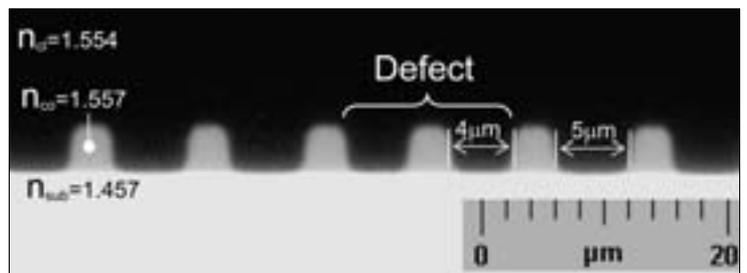


Abb. 1:
Querschnitt eines Polymerwellenleiterarrays mit Defekt.

Fig. 1:
Cross section of a polymer waveguide array with a defect.

Tailoring Guided Modes in Waveguide Arrays

Dirk Michaelis, Henrike Trompeter*, Ulrich Streppel, Ulf Peschel*, Thomas Pertsch*, Andreas Bräuer, Falk Lederer*
*Friedrich Schiller University Jena

Introduction

With the advance of optical data transfer the requirements for quality, reliability and functionality of integrated optics devices have increased. However, the sole use of conventional materials severely constrains the performance of optical elements. More sophisticated fabrication technologies now permit the manufacture of optimized metamaterials.

Photonic crystals as periodic sub-wavelength structures are probably the most prominent example of a metamaterial where, for example, refraction, diffraction and group velocity dispersion can to a large extent be varied. A waveguide array is another prominent example of a metamaterial with controllable optical characteristics [1]. In the array, waves are confined to individual guides (Fig. 1). The evolution of this virtually discretized light is restricted to energy transfer via the evanescent tails of the modes of the corresponding guides. Hence, the dynamics of optical arrays are determined by the characteristics of the guides together with the coupling characteristics between those guides. Here we demonstrate that new types of localized states bound at defects or inhomogeneities in waveguide arrays exist which have no analogon in conventional integrated optics.

Polymer Waveguide Arrays

The investigated arrays consist of 101 waveguides made of an inorganic-organic polymer ($n_{co}=1.547$) on thermally oxidized silicon wafers ($n_{sub}=1.457$) with a polymer cladding ($n_{cl}=1.544$) (see Fig. 1). The samples are fabricated by UV lithography on 4 inch wafers providing propagation lengths of up to 7 cm. All waveguides are $3.5 \mu\text{m}$ high. Waveguides with a width varying between 2.5 and $4.5 \mu\text{m}$ provide low-loss single mode waveguiding ($< 0.1 \text{ dB/cm}$) for a HeNe-laser light source at $\lambda = 633 \text{ nm}$. A waveguide spacing of between 4 and $5 \mu\text{m}$ ensures an efficient evanescent coupling of the nearest neighboring guides. Defects and inhomogeneities are easily incorporated by locally varying either the width of an individual guide or the spacing around a site.



Henrike Trompeter



Ulrich Streppel



Ulf Peschel



Thomas Pertsch



Andreas Bräuer



Falk Lederer

Defektmoten in Wellenleiterarrays

Als erstes wurde die Möglichkeit des herkömmlichen Wellenleitungsmechanismus in Arrays an einem Defekt mit vergrößerter Propagationskonstante überprüft. Der Defekt bestand aus einem Wellenleiter mit einer größeren Breite ($3,5 \mu\text{m}$) als die der restlichen Wellenleiter ($3 \mu\text{m}$) des Arrays. In Analogie zur integrierten Optik kommt es zur Konzentration von eingestrahlttem Licht in Bereichen höheren, effektiven Brechungsindex – eine geführte Defektmode wurde angeregt (Abb. 2b). Solche lokalisierten Zustände werden „unstaggered“ Moden genannt, da das zugehörige Modenfeld eine konstante Phase aufweist (Abb. 2a).

Als nächstes wurde nach Abweichungen vom klassischen Wellenleitungsmechanismus gesucht, indem die Breite des Defektwellenleiters ($3 \mu\text{m}$) im Vergleich zum Rest des Arrays ($3,5 \mu\text{m}$) verringert wurde. Tatsächlich konnten auch in diesem Fall des verringerten effektiven Indexes des Defektwellenleiters geführte Wellen gefunden werden (Abb. 2d). Allerdings ist das Modenprofil dieser neuen, so genannten „staggered“ Moden im Gegensatz zu den ursprünglichen „unstaggered“ Zuständen durch die Eigenschaft ausgezeichnet, dass die Felder in benachbarten Wellenleitern einen Phasenunterschied von π besitzen (Abb. 2c). Somit wurde hier der herkömmliche Führungsmechanismus der Totalreflexion („unstaggered“) durch den der Bragg-Reflexion („staggered“) ersetzt.

Eine nahezu ausschließliche Vergrößerung der Kopplung eines Defekts zum Rest des Arrays kann durch eine Verringerung des Abstandes des Zentrumswellenleiters ($4 \mu\text{m}$ bei ansonsten $5 \mu\text{m}$ Wellenleiterabstand) zu den Nachbarwellenleitern erreicht werden. In diesem Fall können sowohl „unstaggered“ als auch „staggered“ Moden gleichzeitig existieren. An der Endfacette des Arrays entsteht ein Interferenzmuster, welches vom Phasenunterschied beider gebundener Zustände abhängt. Der Phasenunterschied zwischen der „staggered“ und „unstaggered“ Mode ändert sich um π , falls der Anregungsstrahl vom Defektwellenleiter ($n = 0$) zu einem der Nachbarwellenleiter ($n = \pm 1$) verschoben wird. Somit kann durch die Wahl des Anregungswellenleiters von konstruktiver zu destruktiver Interferenz im Defekt oder in den Nachbarwellenleitern übergegangen werden (Abb. 3a, b, c). Besonders hervorzuheben ist, dass keine antisymmetrischen Moden existieren, obwohl der Defekt mehrmodig ist.

Im Falle einer verringerten Kopplungskonstante des Defektwellenleiters infolge einer Vergrößerung des Abstandes des Zentrumswellenleiters zu seinen Nachbarn treten keine geführten Wellen auf. Auch dieser Umstand lässt sich schwerlich im herkömmlichen Bild gebundener Moden erklären, da hier zu erwarten wäre, dass die Führungseigenschaften des Defekts durch eine stärkere Entkopplung zum Rest des Arrays verbessert werden sollten.

Allerdings wird Licht im Defekt verstärkt an Blochmoden mit einer großen transversalen Geschwindigkeit ankoppeln, so dass dieser Defekt lichtabstoßend wirkt (Abb. 4a, b). Im Gegensatz zur Beugung in einem homogenen Array (Abb. 4c, d) entstehen zwei symmetrische Beugungskeulen, zwischen denen kaum Licht vorhanden ist.

Danksagung

Diese Arbeiten wurden von der Deutschen Forschungsgemeinschaft unter der Projektnummer Br 1263/5-1 gefördert.

Literatur:

- /1/ Pertsch, T.; Zentgraf, T.; Peschel, U.; Bräuer, A. and Lederer, F.: „Anomalous Refraction and Diffraction in Discrete Optical Systems“, Phys. Rev. Lett. 83 (2002) 093901.

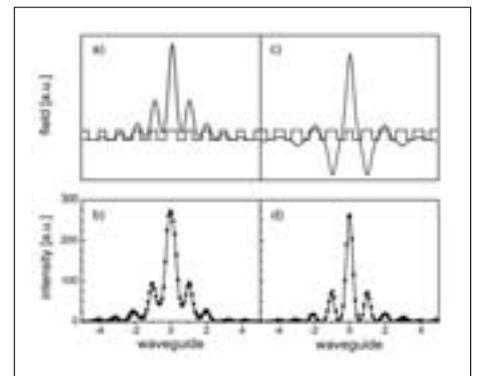


Abb. 2: Feld und Intensität einer „staggered“ (c, d) und „unstaggered“ (a, b) Mode bei dominanter Verkleinerung (c, d) bzw. Vergrößerung (a, b) des effektiven Brechungsindex des Defekts. Linien: Theorie, Punkte: Experiment.

Fig. 2: Field and intensity of a staggered (c, d) and unstaggered (a, b) mode for a dominant decrease (c, d) or increase (a, b) of the propagation constant of the defect. solid line: theory, dots: experiment.

Defect Modes in Waveguide Arrays

First we checked conventional waveguiding mechanism in an array. To this end a defect is created which consists of a single guide with an increased width of $3.5 \mu\text{m}$ compared to $3 \mu\text{m}$ for the rest of the array. As a consequence the propagation constant of the defect guide is increased, whereas the coupling is slightly decreased. Similar to conventional integrated optics, light concentrates around the region of higher effective index and a bound defect mode is born (Fig. 2b). Since the modal fields of such localized states have a flat phase (see Fig. 2a), such localized states are called unstaggered modes.

Next, we investigated deviations from classical waveguiding mechanisms by decreasing the width of the defect waveguide ($3 \mu\text{m}$ compared with

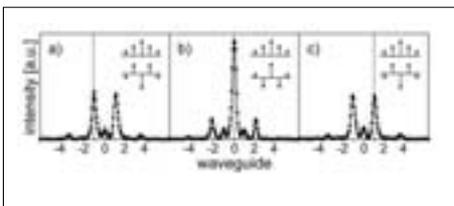


Abb. 3: Interferenzmuster einer „staggered“ und „unstaggered“ Mode bei vergrößerter Kopplungskonstante des Defekts. Propagationslänge: $59,95 \text{ mm}$, Punkte: Experiment, Linien: Theorie, Gestrichelt: Anregungsposition, (b) Anregung des Defekts, (a, c) Anregung des nächsten Nachbarwellenleiters zum Defekt.

Fig. 3: Interference pattern of a staggered and an unstaggered defect mode for dominant increase of the coupling constant of the defect at a propagation distance of 59.95 mm . dots: experiment, lines: theory, dashed line: position of the excitation (b) excitation of the defect waveguide. (a) and (c) excitation of the left and right nearest neighbor waveguide of the defect.

$3.5 \mu\text{m}$ in the rest of the array). Again, the resulting decrease of the propagation constant of the defect is accompanied by only a small increase of the coupling constant. In fact we also observe a guided mode (Fig. 2d) the shape of which differs considerably from that of an unstaggered one. Because fields in adjacent guides are now π out of phase (Fig. 2c) the intensity of this mode becomes zero between the waveguides due to destructive interference from the different modal fields. Hence in contrast to the unstaggered mode, which is bound by internal reflection, the guiding mechanism of this new, so-called staggered state relies on Bragg-reflection within the periodic structure of the array.

An increase of the coupling constant of the defect can almost exclusively be achieved by decreasing the spacing between the center waveguide and its neighbors (spacing: $4 \mu\text{m}$ compared with $5 \mu\text{m}$ in the rest of the array). In this case both unstaggered and staggered modes usually exist simultaneously. An input beam centered on a single waveguide always excites both modes. At the end facet of the array an interference pattern is observed depending

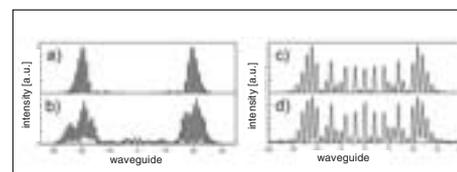


Abb. 4: Beugungsbild bei Anregung eines abstoßenden Defekts ([a] Theorie, [b] Experiment) mit reduzierter Kopplung und in einem homogenen Array ([c] Theorie, [d] Experiment).

Fig. 4: Diffraction pattern for an excitation of a repulsive defect ([a] theory, [b] experiment) with reduced coupling and in a homogeneous array ([c] theory, [d] experiment).

on the current phase difference between the two bound states. If the exciting beam is shifted from the defect guide ($n = 0$) towards its neighbor ($n = \pm 1$) the phase difference between the staggered and unstaggered modes changes by π . Hence by varying the waveguide of excitation we can switch between destructive and constructive interference in the defect guide or in the neighboring waveguide at the output facet (compare Figs. 3a, b, c). Even if the initial excitation is asymmetric with respect to the defect guide, we never observe an asymmetric guided field at the output. Thus, no asymmetric mode exists, although the defect is multi-mode.

If the coupling constant of the defect waveguide is decreased by increasing the spacing between the center waveguide and its neighbors, no bound states occur. This is somehow counter-intuitive. Because the defect tends to be isolated due to the reduced coupling, one might even expect improved guiding properties. Again, the simple classical understanding of mode guiding fails. Light from the defect predominantly couples into Bloch modes with a high transverse velocity. Hence, the excitation will leave a defect with reduced coupling very quickly (Fig. 4a, b). In contrast to an excitation in the homogeneous array (Fig. 4c, d) the defect repels the light causing a dark region around it.

Acknowledgement

The work was supported by the Deutsche Forschungsgemeinschaft (Br 1263/5-1).

Reference:

/1/ Pertsch, T.; Zentgraf, T.; Peschel, U.; Bräuer, A. and Lederer, F.: „Anomalous Refraction and Diffraction in Discrete Optical Systems“, Phys. Rev. Lett. 83 (2002) 093901.

Hybride Integration optischer Systeme auf miniaturisierten keramischen Substraten

Erik Beckert, Christoph Damm, Ramona Eberhardt, Peter Schreiber



Erik Beckert

Einführung

Neben ihren oft kleinen Abmessungen und hohen Genauigkeitsanforderungen zeichnen sich moderne optische Baugruppen zunehmend auch durch die zusätzlich notwendige Integration elektronischer und mechanischer Funktionalität aus. Aufgrund der oftmals nur geringen Stückzahlen ist dabei eine hybride Integration der einzelnen Komponenten oft die kostengünstigste Aufbauvariante. Um Nachteile wie eingeschränkte Miniaturisierbarkeit und kritische Langzeitstabilität klassischer Optikaufbauten zu umgehen, wurde ein Konzept entwickelt, bei dem optische und nichtoptische Komponenten, zum Beispiel elektronische Schaltkreise und MEMS-Aktuatoren, gemeinsam auf einem mit Fassungsstrukturen versehenen keramischen Multilayer-Substrat integriert werden.

Keramiksubstrate für hybrid-optische Systeme

Optische Komponenten werden zur Bestimmung ihrer geometrischen Lage in mechanischen Fassungen mittels Kleben, Löten oder Klemmen fixiert.

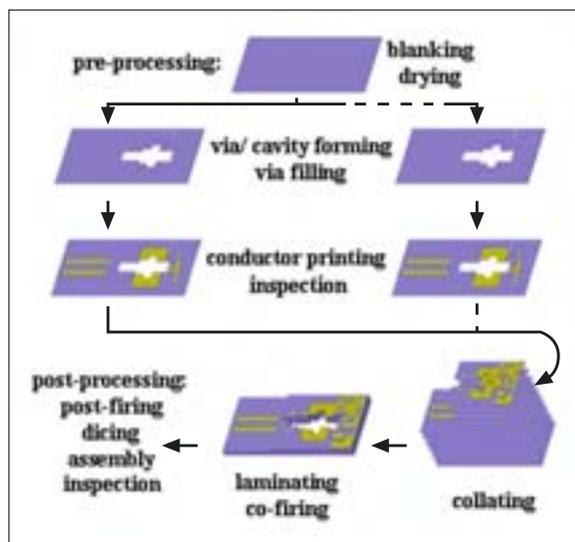
Neben den gewöhnlich verwendeten und meist mit Justiermöglichkeiten versehenen mittelbaren Fassungen werden zunehmend auch unmittelbare Fassungsstrukturen verwendet, die direkt in die Optikplattform integriert werden. Abhängig von der Genauigkeit dieser mechanischen Anschläge können die Komponenten passiv justiert werden, während eine aktive Justage über Fügehilfswerkstoffe wie Klebstoff oder Lot realisiert wird. Bekannt zur Herstellung solcher Fassungsstrukturen sind unter anderem Verfahren wie Silizium-Ätzen, LIGA und Mikrospritzguss.

Eine alternative Möglichkeit besteht darin, keramische Multilayer-Substrate zu nutzen /1/, wie sie zum Beispiel als Low Temperature Cofired Ceramics (LTCC) aus der Elektronikindustrie bekannt sind /2/, /3/. Bei diesen Glas-keramiken wurde die Strukturierung bisher vorwiegend eingesetzt, um Stromdurchführungen (Vias) zwischen einzelnen Lagen des Substrats zu realisieren. Dazu werden die einzelnen Keramikfolien im Grünzustand mechanisch bearbeitet, aufeinander laminiert und zu einem Substrat gesintert (Abb. 1).

Indem die Strukturierung der Grünfolien an die Anforderungen der Optikmontage angepasst wird, können innerhalb der Keramiksubstrate auch komplexe dreidimensionale Strukturen wie Stufen, horizontale und vertikale Referenzebenen sowie Auflagekanten erzeugt werden, die zur Aufnahme und Fassung optischer Komponenten dienen (Abb. 2). Die Genauigkeit dieser Strukturen wird durch die Prozesskette des Strukturierens, Laminiertens und Sinterns bestimmt und liegt in der Summe im Bereich von 10 bis 50 μm .

Abb. 1: Herstellung keramischer Multilayer-Substrate.

Fig. 1: Manufacturing process for ceramic multilayer substrates.



Hybrid Integration of optical Systems on miniaturized ceramic Substrates

Erik Beckert, Christoph Damm, Ramona Eberhardt, Peter Schreiber

Introduction

Modern optical systems not only have to be small and precise but must increasingly incorporate electronic and mechanical components. Due to the typically small to medium number of these systems required, hybrid integration is often the most efficient packaging solution. However classical optical assemblies are limited as regards miniaturization and long-term stability. To circumvent these disadvantages, a concept based on the integration of optical and non-optical components examples of which are electronic circuits and MEMS-actuators was developed using ceramic multilayer substrates with embedded mounting structures.

Ceramic Substrates for hybrid optical Systems

Optical components have to be geometrically constrained and are therefore assembled within mounts and fixed by adhesive bonding, soldering or clamping. In addition to the indirect and adjustable mounts that are normally used, direct mounting structures, embedded within the optical platform, have been developed in recent years. The accuracy of these mechanical stops dictates the degree to which the optical components can be passively aligned. An active alignment is possible with the help of the joining media, such as adhesive or solder. Known technologies for the manufacturing of such direct mounts are for instance silicon etching, LIGA and micro-injection-molding.

An alternative approach is to utilize ceramic multilayer substrates /1/ such as Low Temperature Cofired Ceramics (LTCC) as known from the electronics industry /2/, /3/. These are glass ceramics usually structured with vias to permit the flow of current between layers. To achieve this, the ceramic sheets are mechanically structured while in the green state before being laminated together and finally sintered to form a single substrate (fig. 1). The structuring of the green sheets can be adapted to fit the requirements of an optics assembly thus allowing for the creation of complex three-dimensional step-like structures, horizontal and vertical reference planes and supporting edges on which optical components can be mounted (fig. 2). The accuracy of these structures is determined by the structuring, laminating and sintering process and ranges from 10 to 50 μm .



Christoph Damm



Ramona Eberhardt



Peter Schreiber

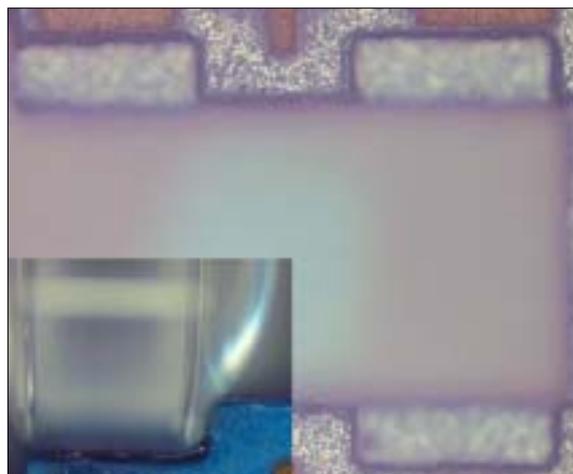


Abb. 2: Dreidimensionale Struktur im Keramiksubstrat zur Fassung einer Linse.

Fig. 2: Three-dimensional mounting structure for a lens within a ceramic substrate.

Durch das Bedrucken der Keramikfolien mit Dickschicht-Metallisierungen wie Palladium-Silber (PdAg) können darüber hinaus neben der hybriden Integration von Schaltkreisen zur Ansteuerung elektrooptischer Komponenten auch Fügeflächen zum Fixieren der optischen Komponenten durch Laserstrahllöten (Abb. 4) bereitgestellt werden.

Das dargestellte Aufbaukonzept nutzt Herstellungstechnologien, die insbesondere für kleine und mittlere Stückzahlen etabliert sind und eignet sich besonders gut für optische Baugruppen, bei denen die Integration von Optik und Elektronik in einem Aufbau angestrebt wird. Durch die Vermeidung mittelbarer Fassungen ist eine weitgehende Miniaturisierung möglich, während die Keramik als Grundmaterial und Löten als Fügeverfahren zu einer guten Langzeitstabilität solcher Baugruppen führen. Aufgrund des an Silizium und Glas gut angepassten thermischen Ausdehnungskoeffizienten von $6 \cdot 10^{-6} \text{K}^{-1}$ (LTCC) können mikromechanische Aktoren (z. B. MEMS- Spiegel) und elektrooptische Subsysteme (z. B. Modulatoren) integriert werden. Die thermomechanischen Eigenschaften der Keramik sind im Hinblick auf die Temperaturkontrolle verlustleistungsbehäfteter Komponenten, wie z. B. Laserdioden, in weiten Grenzen einstellbar /4/.

Nachteilig beim vorgestellten Konzept wirkt sich die im Vergleich zu anderen Mikrostrukturierungsverfahren geringere Genauigkeit aus. Zukünftige Entwicklungen wie Nullschumpf-Keramiken und Technologien, wie das Prägen von Keramikfolien werden dem Rechnung tragen.

Anwendungsbeispiel – Strahlkollimation für Laserdioden

Abb. 3 zeigt links den schematischen Aufbau einer Baugruppe mit Laserdiode, Kollimationsoptik und Ansteuer-elektronik. Das divergente Bündel der Diode wird durch das optische System zu einem Strahl mit dem nominellen Durchmesser 0,4 mm und einer Elliptizität von 1 : 1,05 kollimiert, wobei zwei 45°-schräggestellte Zylinderlinsenarrays für Fast- und Slow-Axis-Kollimation der Diode eingesetzt werden. Im rechten Teil der Abbildung ist das Keramiksubstrat zu sehen, in das bereits die erste Kollimationslinse in ihre Fassungsstruktur eingesetzt ist. Ebenfalls zu sehen sind die bereits gefügten aktiven und passiven Elektronikbausteine zur späteren Ansteuerung der Laserdiode und die dafür notwendigen Kontaktflächen in zwei verschiedenen Ebenen des Substrats.

Kontrollmarken zum Referenzieren des Substrats während der Montage und Keramikabschnitte mit erhöhtem Metallanteil und somit verbesserter thermischer Leitfähigkeit zum Ableiten der Laserdioden-Verlustleistung vervollständigen das hybride System.

Zusammenfassung

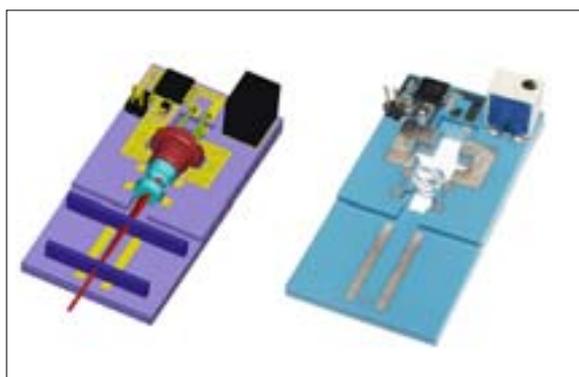
Ein Aufbaukonzept für miniaturisierte hybrid-optische Systeme wurde entwickelt, das auf keramischen Multi-layer-Substraten mit integrierten mechanischen Strukturen zum Fassen optischer Komponenten aufbaut. Es eignet sich insbesondere für Baugruppen, die optische, elektronische und mikromechanische Funktionalität auf einem Substrat vereinen. Zukünftige Arbeiten werden sich auf die Optimierung der mit dieser Technologie herstellbaren mechanischen Strukturen und die Nutzung alternativer Materialien (z. B. Aluminiumnitrid) mit verbesserter thermischer Leitfähigkeit für Anwendungen mit höherer Verlustleistung konzentrieren.

Literatur:

- /1/ Beckert, E. et al.: „Integration of Optics, Electronics and Mechatronics on miniaturized Platforms“, Proceedings MICRO.tec 2003, München, pp. 179–184.
- /2/ Bartnitzek, T.; Müller, E.: „Entwicklung von LTCC-Schaltungsträgern und Gehäusen“, 47. Internationales Wissenschaftliches Kolloquium 2002, Ilmenau, pp. 675–67.
- /3/ Gongora-Rubio, M. R. et al.: „Overview of low temperature co-fired ceramics tape technology for meso-system technology (MsSt)“, Sensors and Actuators A, Vol. 89 (2001), pp. 222–241.
- /4/ Thelemann, Th. et al.: „Using LTCC for microsystems“, Microelectronics International, Vol. 19, No. 3, 2002, pp. 19–23.

Abb. 3:
CAD-Modell und
teilweise montierte
Kollimationsoptik.

Fig. 3:
CAD-Model and partially
assembled collimating
optic.



By printing thick film metallizations, for example Palladium Silver (PdAg), onto the ceramic sheets, contact areas for laser beam soldering of optical components are provided (fig. 4) and the integration of circuits for the control of the electro-optical components is facilitated.

The packaging concept described utilizes manufacturing technologies that have been specifically established for small and medium quantities and is therefore suitable for optical assemblies which integrate optics and electronics on one substrate. By avoiding indirect mounts these assemblies can be scaled down and the ceramic substrate material, together with solder joining technology, leads to good long-term stability. In addition its thermal coefficient of expansion of $6 \cdot 10^{-6} \text{K}^{-1}$ is compatible with those of silicon and glass thus easily allowing the integration of micro-mechanical actuators (e. g. MEMS-mirrors) and electro-optical sub-systems (e. g. modulators). The thermo-mechanical properties of

the ceramics are tunable over a wide range with respect to the necessary temperature control for power-dissipating components such as laser diodes /4/.

One disadvantage of the concept shown is the limited structural accuracy compared to other micro-structuring technologies. In the future, technologies like zero-shrinking ceramics and high precision embossing of ceramic sheets will address these issues.

Application Example – Beam Collimating Optic for Laser Diodes

Fig. 3 shows the schematics of an optical assembly on the left hand side. The divergent beam of a laser diode is collimated to form a beam with a diameter of 0.4 mm and an ellipticity of 1 : 1.05. Two arrays of cylindrical lenses, rotated through 45° with respect to the horizontal plane, collimate the fast and the slow axis of the diode. On the right

hand side of the figure the ceramic substrate with the first collimating lens already mounted is shown. Also visible are the active and passive electronic components of the laser diode driver circuit and the contact pads on two different height levels to connect the diode. Alignment marks for referencing the substrate during the assembly and metal-filled vias for the dissipation of diode power complete the hybrid system.

Conclusion

A packaging concept for miniaturized hybrid optical systems was developed. It is based on ceramic multilayer substrates with integrated mechanical structures for mounting optical components. The concept is especially suitable for systems that integrate optical, electronic and micro-mechanical functionality on one substrate. Future work will optimize the mounting structures and their manufacturing process. Additionally alternative ceramics with higher thermal conductivity, like Aluminum Nitride, will be investigated for high power applications.

References:

- /1/ Beckert, E. et al.: „Integration of Optics, Electronics and Mechatronics on miniaturized Platforms“, Proceedings MICRO.tec 2003, München, pp. 179–184.
- /2/ Bartnitzek, T.; Müller, E.: „Entwicklung von LTCC-Schaltungsträgern und Gehäusen“, 47. Internationales Wissenschaftliches Kolloquium 2002, Ilmenau, pp. 675–67.
- /3/ Gongora-Rubio, M. R. et al.: „Overview of low temperature co-fired ceramics tape technology for meso-system technology (MsSt)“, Sensors and Actuators A, Vol. 89 (2001), pp. 222–241.
- /4/ Thelemann, Th. et al.: „Using LTCC for microsystems“, Microelectronics International, Vol. 19, No. 3, 2002, pp. 19–23.



Abb. 4:
Durch Laserstrahllöten gefügte Laserdiode.

Fig. 4:
Laser beam soldered laser diode.



Gerhard Kalkowski

Motivation

Die fortschreitende Miniaturisierung in der Halbleiterelektronik hat dazu geführt, dass Lithographie-Anlagen heute bereits im tiefen ultravioletten Strahlungsbereich arbeiten und Licht mit einer Wellenlänge von 193 nm verwenden. Geräte der nächsten Lithographie-Generation werden voraussichtlich weiche Röntgenstrahlung im EUV-Wellenlängenbereich (extreme ultraviolett ca. 13 nm) einsetzen, wobei Strahlführung und Belichtung im Vakuum erfolgen müssen. Im Vorfeld dieser Entwicklung hat sich die Röntgenfluoreszenz-Spektroskopie an Synchrotron-Strahlungsquellen als wichtiges Verfahren zur Charakterisierung von Wafer-Materialien entwickelt /1/. Für all diese Anwendungen ist eine stabile, hochgenaue Positionierung von Si-Wafern in Vakuumumgebung erforderlich und die erzielbare Ebenheit ist von großem Einfluss auf das Ergebnis. Geeignete Vorrichtungen für die Waferhandhabung an Luft und im Vakuum werden seit einigen Jahren am IOF entwickelt.

Im Vakuum erfolgt das temporäre Fixieren von Halbleiter-Wafern – ebenso wie damit verbundene Aufnahme- und Transport-Vorgänge – am besten mithilfe elektrostatischer Greifvorrichtungen. Durch Erzeugung eines elektrischen Feldes zwischen dem Wafer und einer oder mehrerer Elektroden, die in der Wafer-Unterlage integriert sind, können anziehende Kräfte auf den Wafer ausgeübt werden. Elektrostatische Chucks vermeiden Kratzer und Abrieb, wie sie für mechanische Greifer typisch sind. Vor allem aber erlauben sie es, durchgebogene Wafer einzuebren und damit auch bei geringer Schärfentiefe gute Belichtungsergebnisse zu erzielen. Nicht zuletzt liefern sie einen großflächigen und somit wohldefinierten Wärmekontakt zur Unterlage.

Entwurf und Simulation

Für eine Synchrotron-Anwendung wurde ein kompakter 300 mm-Chuck mit einem integrierten Liftmechanismus entwickelt, der die Ablage des Wafers auf dem Chuck bzw. das Ausheben von der Chuckoberfläche vornimmt. Für die Verwendung im Ultra-Hoch-Vakuum (UHV) ist eine sehr geringe Ausgasrate erforderlich und der Chuck muss die typische Ausheizprozedur bei 100 °C schadlos überstehen. Die spezifische Anwendung erforderte darüber hinaus, dass 8 und 12 Zoll-Si-Wafer sowohl in horizontaler wie vertikaler Orientierung sicher gehalten werden und die Vorrichtung ein Gesamtgewicht von 5 kg nicht überschreitet. Um eine hohe laterale Auflösung in der Anwendung zu gewährleisten, war eine Ebenheit der Chuckoberfläche von 5 µm erforderlich und eine Parallelität der Montagefläche des Chucks zu seiner Oberfläche von 100 µm.

Die genannten Zielstellungen wurden mit einem modularen Aufbau aus drei Komponenten erreicht, die anwendungsbezogen kombiniert und bei Bedarf weiter optimiert werden können. Sie umfassen das eigentliche elektrostatische Halteelement, eine Montageplatte als universelle mechanische Schnittstelle und einen motorbetriebenen Aushebe-Mechanismus für den Wafer.

Um die beste Lösung zu ermitteln, wurden thermo-mechanische Simulationsrechnungen zu verschiedenen Konstruktionsansätzen und Materialien vorgenommen. Dazu wurde die kombinierte Einheit von Halteelement und Montageplatte in einem FEM-Modell erfasst und hinsichtlich mechanischer Spannungen und Deformationen analysiert.

Electrostatic chuck with integrated wafer lift

Gerhard Kalkowski, Gerd Harnisch, Erik Beckert, Thomas Peschel

Motivation

Recent efforts to miniaturize semiconductor electronic devices have already progressed to the development of lithography tools that work in the deep UV-range at a wavelength of 193 nm. Next generation lithography equipment will probably work in the EUV (extreme ultra violet) range and utilize soft X-rays at wavelengths of around 13 nm, necessitating beam shaping and exposure under vacuum. At synchrotron light sources, X-ray fluorescence spectroscopy is evolving as a powerful method for the characterization of wafer materials [1]. For all these applications, the stable positioning of Si-wafers in a high vacuum environment is required and attainable flatness strongly influences the outcome. Adequate clamping fixtures for wafer handling at high precision in air and under vacuum have been being developed at the IOF for several years.

Under vacuum conditions, temporary fixture of wafers as well as picking and placing are best done with electrostatic clamps. By generating an electric field between the wafer and one or more metal electrodes inside the support, an attractive Coulomb force is exerted on the wafer. Electrostatic chucking avoids scratches and particle generation as is commonly encountered with mechanical clamps and, in particular, it enables flattening of slightly bowed wafers for accurate exposure under conditions of small depth of focus. Also, thermal contact of the wafer with the support is good because of the large contact area.

Design and Simulation

For a synchrotron application, a compact 300 mm electrostatic chuck with an integrated lift mechanism for soft wafer deposition onto and off the chuck has been developed. To enable operation at ultra-high-vacuum conditions, a very slow gas release rate is critical and repeated baking of the chuck at a temperature of about 100 °C must be possible. In addition, this specific application requires that wafers can be clamped appropriately for both horizontal and vertical chuck orientations and that weight is limited to less than 5 kg for the whole unit. Finally, to obtain sufficient lateral resolution, surface flatness of the chuck is tolerated to 5 µm and parallelism (mounting base versus chuck surface) to 100 µm.

These objectives have been met with a modular design that is based on an application specific assembly of three major components that can be further optimized separately: the actual electrostatic clamping element, a mounting plate for all mechanical interfacing and a motorized wafer lift mechanism.

Careful consideration of thermal expansion in design and materials selection was of central importance for the final solution. To this end the combined unit of clamping element and mounting plate was modeled and investigated with respect to stresses and deformations using FEM-analysis.



Gerd Harnisch



Erik Beckert



Thomas Peschel

Abb. 1 zeigt ein typisches FEM-Ergebnis dieser Simulationen. Durch Befestigung des Chuckelements an drei jeweils um 120 Grad versetzten Halteelementen auf einem Teilkreis von etwa 2/3 Radius wird die Durchbiegung der Chuckoberfläche sehr gering. Sie beträgt im horizontalen Schwerfeld weniger als 0,5 µm für das gewählte Material und die zugrunde gelegten Dimensionen. Ähnliche Rechnungen wurden für vertikale Orientierung und Temperaturen bis 100 °C vorgenommen, um auch die thermischen Spannungen aufgrund der unterschiedlichen Wärmedehnungen von Chuckelement und Montageplatte zu erfassen.

Realisierung

Im Verlauf der Entwicklung wurden mehrere Versuchsmuster aufgebaut und die Stabilität unter thermischer Wechselbelastung an kritischen Stellen überprüft. Die daraus schließlich entstandene 300 mm Baugruppe ist in Abb. 2 dargestellt. Das eigentliche Chuckelement weist drei symmetrisch angeordnete, integrierte Verbindungselemente zur Montageplatte auf und – jeweils dazwischen – Durchbrüche, an denen drei Stifte des Wafer-Liftmechanismus den Wafer abheben können. In Abb. 2 sind die Stifte teilweise ausgefahren sichtbar. Auf der Unterseite des Chuckelements ist die Montageplatte erkennbar, in deren Mitte die zylindrische, UHV-taugliche Antriebseinheit angeflanscht ist. Die rotatorische Bewegung eines Motors wird über einen Spindelmechanismus in eine axial gerichtete translatorische Bewegung umgesetzt und führt über das simultane Ausfahren der drei Stifte zu einer Aushebung des Wafers um etwa 10 mm. In den Aufbau sind mehrere Endschalter integriert, die einen zuverlässigen Betrieb unter Produktionsbedingungen sicherstellen. Der äußerst kompakte

Aufbau der gesamten Baugruppe in Verbindung mit einer Kabeltrommel gestattet einen „quasi-mobilen“ Einsatz mit großem Bewegungsradius.

Für das Halteelement wurde ein glas-keramisches Material mit hoher Haltekraft bei moderaten elektrischen Spannungen ausgewählt /2/, /3/. Abb. 3 zeigt einen Blick auf die Chuckoberfläche. Das elektrische Schaltungsprinzip basiert auf einer bipolaren Elektroden-Konfiguration mit zwei halbkreisförmigen Elektroden, die durch das transparente Dielektrikum hindurch deutlich zu erkennen sind.

Die bipolare Chuckausführung stellt die Haltefunktion für Halbleiter-Wafer sicher, ohne dass ein direkter elektrischer Kontakt zum Wafer benötigt wird. Damit ist kein „Kratz-Pin“ erforderlich und Abrieb und Partikelerzeugung beim Chuckvorgang werden auf ein Minimum reduziert. Deutlich zu erkennen sind in Abb. 3 auch die drei Stifte des Liftmechanismus als dunkle Zonen und die helleren Befestigungselemente des Chucks zur Montageplatte.

Die komplette Baugruppe wurde in waagerechter Orientierung mit einem 3-D-Koordinatenmessgerät an 19 Stellen auf Ebenheit im sub-µm-Bereich vermessen. Danach weist die Oberfläche eine Ebenheit von 2,2 µm auf und liegt innerhalb von 26 µm parallel zur Unterseite (Anflanschseite) der Montageplatte. Im Rahmen von elektrischen Tests wurde nachgewiesen, dass weniger als 500 V Haltespannung ausreichen, um Halbleiter-Wafer auch in vertikaler Orientierung sicher zu halten.

Literatur:

- /1/ Beckhoff, B.; Fliegau, R.; et al.: „Improvement of total reflection X-ray fluorescence analysis of low Z elements“, Spectrochimica Acta Part B, 56 (2001) 2073–2083.
- /2/ Kalkowski, G.; Risse, S.; Harnisch, G. and Guyenot, V.: „Electrostatic Chucks for Lithography Applications“, Microelectronic Engineering 57–58 (2001) 219–222.
- /3/ Kalkowski, G.; Kamm, F.-M.: www.sematech.org/resources/litho/meetings/euvl/20030223b/03_Fraunhofer_NEW_Electrostatic_Chucking.pdf

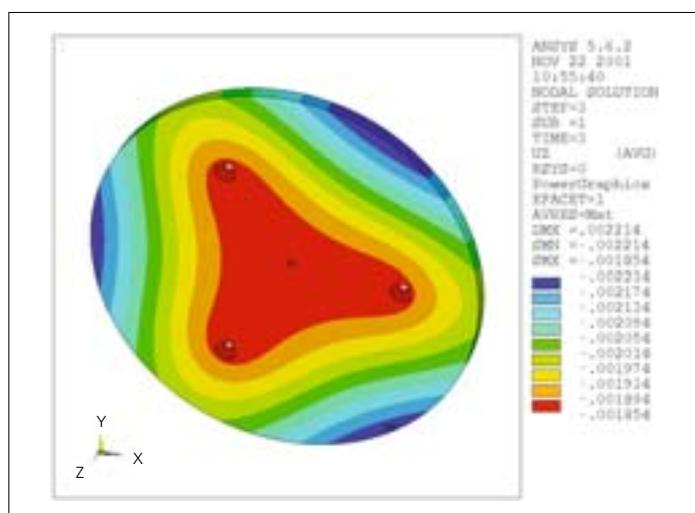


Abb. 1:
FEM-Ergebnisse zur Chuck-Durchbiegung (mm) unter Schwerkraft.

Fig. 1:
FEM-results for gravity deformation (mm) at horizontal orientation.

Fig. 1 displays a typical FEM-result from these simulations. With three support pins fixed at an angle of 120 deg to each other and spaced to delineate an inner radius which is approximately 2/3 that of the chuck radius, flatness of the chuck surface is found to deviate less than 0.5 μm under horizontal gravitational load for the materials and dimensions chosen. Similar calculations were performed with respect to vertical orientation and temperatures of up to 100 degrees Celsius to conceptualize stresses exerted by varied thermal expansion during bake-out.

Realization

In the course of development, test systems were set up and subjected to thermal cycling for evaluation of stability in critical areas. The final 300 mm diameter unit with the chucking element on top is shown in Fig 2. Three symmetrically arranged fastening elements secure the chuck to the mounting base and between these the partly elevated lift-pins, used for wafer transfer to and from the chuck, can be seen as dark points slightly proud of the chuck surface. An ultra-high-vacuum compatible drive unit, attached to the bottom center of the mounting plate, drives the lifting mechanism. A spindle mechanism transforms rotational motion into axial movement and lifts the wafer simultaneously at three points to about 10 mm above the chucking plane for handling purposes. Several limit switches are included for safe and reliable operation under automated production conditions. In addition the unit is equipped with a cable reel thereby allowing free movement of the whole unit inside the vacuum chamber.

For the clamping element, a glass ceramic material of high clamping force at a moderate voltage was chosen /2/, /3/. Fig. 3 displays the chuck surface. The electrical layout is a bipolar design with two electrodes shaped in the form of a „double D” as clearly visible through the transparent dielectric material.

The bipolar design ensures clamping for all types of semi-conducting wafer materials without the need of a direct electrical contact with the wafer. Therefore, no scratch pin is necessary and wear and particle generation upon chucking is negligible. Also seen in Fig. 3 are the lift pins (dark) for wafer transfer off and onto the chuck and the three circular connectors (bright) for the fixation of the chuck to the underlying mounting plate.

The complete unit was tested with respect to flatness at sub- μm resolution using a 3-D measurement system at 19 measurement points across the surface and found to be flat within 2.2 μm (at horizontal orientation) and parallel with respect to the mounting plate within 26 μm . Electrical tests verified that less than 500 V clamping voltage was sufficient for safe clamping of Si-wafers vertically.

References:

- /1/ Beckhoff, B.; Fliegau, R.; et al.: „Improvement of total reflection X-ray fluorescence analysis of low Z elements”, Spectrochimica Acta Part B, 56 (2001) 2073–2083.
- /2/ Kalkowski, G.; Risse, S.; Harnisch, G. and Guyenot, V.: „Electrostatic Chucks for Lithography Applications”, Microelectronic Engineering 57–58 (2001) 219–222.
- /3/ Kalkowski, G.; Kamm, F.-M.: www.sematech.org/resources/litho/meetings/euvl/20030223b/03_Fraunhofer_NEW_Electrostatic_Chucking.pdf



Abb. 2:
300 mm elektrostatischer Chuck
mit integriertem Liftmechanismus.

Fig. 2:
300 mm electrostatic chuck with integrated
lift mechanism.



Abb. 3:
Chuck-Oberfläche mit bipolarer
Elektroden-Konfiguration.

Fig. 3:
Chuck surface with bipolar electrode design.

Der Mikrofluidik-Baukasten – Konzepte für die Standardisierung und fluidische Schnittstellen

Claudia Gärtner¹, Oliver Rötting²

¹Applikationszentrum Mikrotechnik Jena im Fraunhofer IOF

²microfluidic ChipShop GmbH, Jena



Claudia Gärtner

Standard in den Life Sciences

Für einen breiten Einsatz mikrofluidischer Komponenten in den Life Sciences, insbesondere in dem KMU-dominierten Bereich der Biotechnologie-Unternehmen, ist es zwingend notwendig, einen Satz unterschiedlicher Komponenten verfügbar zu haben, z. B.: mikromischer Trenneinheiten, optische Inspektionskomponenten, Nanotiterplatten etc. Diese Komponenten müssen miteinander kombinierbar sein, über eine standardisierte fluidische Schnittstelle verfügen und einfach zu handhaben sein. Ein weiterer kritischer Punkt sind die Kosten, die durch die Verfügbarkeit standardisierter Komponenten und einer effizienten Fertigungstechnologie signifikant gesenkt werden können. Hierfür haben wir einen Mikrofluidik-Baukasten realisiert, der verschiedene mikrofluidische Komponenten enthält. Deren Handhabung wird mittels eines Adapterrahmens ermöglicht, der zu Standard-Laborequipment kompatibel ist und aus Kunststoff besteht, um diesen auch zu vertretbaren Kosten fertigen zu können.

Obwohl mikrofluidische Systeme im akademischen Bereich seit über zehn Jahren entwickelt und genutzt werden und eine wachsende Zahl von Komponenten und Systemen erhältlich ist, zeigt ein Blick in das biochemische Labor sowohl in der Industrie als auch in Universitäten: Das konventionelle Analyse- und Syntheseequipment, von einfachen Pipetten bis zum komplexen Robotik-Equipment, dominiert den Laboralltag fast vollständig. Der Grund für dieses verhaltene Nutzen miniaturisierter Systeme im Laboralltag ist vielfältig. Neben der allgemeinen Unterschätzung der notwendigen Zeit für innovative – vom Althergebrachten weit abweichende – Technologien sich in etablierten Märkten zu positionieren,

ist der Wettbewerb mit standardisierten, gegeneinander austauschbaren makroskopischen Systemen mit einer Vielzahl etablierter Verfahren die größte Herausforderung für die breite Akzeptanz mikrofluidischer Systeme. Zudem handelt es sich bei diesen neuen Lösungen i. d. R. um Insellösungen, die auf den spezifischen Anwendungsfall zugeschnitten sind und von kleinen Unternehmen angeboten werden. Da dieses Problem in den letzten Jahren zunehmend erkannt wurde, haben einige Initiativen nicht nur die Erhöhung der verfügbaren Anzahl mikrofluidischer Komponenten zum Ziel, sondern insbesondere auch die Adaptation an existierende (Semi-) Standards und Schnittstellen.

Anpassung an Standards

Hierfür sind insbesondere drei Konzepte die Basis:

- die Außenabmessungen der mikrofluidischen Komponenten
- die Handhabung der Komponenten
- die fluidischen Schnittstellen der Komponenten.

Um die mikrofluidischen Komponenten mit Standard-Laborequipment handhaben und sie einfach miteinander und der Makrowelt verbinden zu können, wurden die Außenabmessungen auf 75,5 mm x 25,5 mm festgelegt. Diese Größe entspricht dem Objektträgerformat und ist sowohl mit der in Europa gebräuchlicheren Norm (DIN ISO 8037-1) als auch der in den USA verbreiteteren (ASTM E 211) kompatibel. Der Abstand der fluidischen Schnittstellen ist über das Rastermaß einer 384er Titerplatte definiert, d. h. den Well-Abstand von 4,5 mm. Damit ließen sich 16 Reihen mit fünf Schnittpunkten pro Reihe auf einem Objektträgerformat anordnen.

The microfluidic toolbox – Standardization Concepts and Fluidic Interfaces

Claudia Gärtner¹, Oliver Rötting²

¹Applikationszentrum Mikrotechnik Jena in the Fraunhofer IOF

²microfluidic ChipShop GmbH, Jena

Standard in the Life Sciences

For a wide application of microfluidic components in Life Sciences, in particular in the SME dominated biotechnology field, it is absolutely necessary to have an available set of different components such as mixers, separation devices, optical inspection devices, nanotiterplates etc. which can be combined with each other, have a standardized fluidic interface and can be handled easily. Another issue are the costs, which can be significantly cut due to available standardized components and an efficient production technology. Therefore we have created a microfluidic tool box that comprises different microfluidic components, which can be handled in an adapter frame that in turn fits in the standard Life Sciences laboratory equipment, and which is made from polymers so it can be offered at an affordable price.

Despite the fact that microfluidic devices have been around in the academic world for more than a decade now and an increasing number of devices and systems have been commercially available for several years, a visit to any industrial or academic biochemical laboratory will show a lasting dominance of conventional analytical/synthesis equipment, from simple pipettes to complex robotic equipment.

The reasons for this slow diffusion of miniaturization technologies into the daily laboratory routine are manifold: one being the general underestimation of the time it takes for novel disruptive technologies to penetrate established markets. However the biggest hurdle on the road to market success for microfluidic systems is the competition between standardised interchangeable macroscopic equipment, together with a large number of proven recipes for the users and mostly insular solutions

provided on a case-to-case basis by generally small or medium sized providers. In recognition of this problem, several initiatives and activities over the past few years have focussed on leveraging the increasing number of available microfluidic systems by applying existing (semi)standards and interfaces.

Adaption of Standards

Three main aspects have had to be kept in mind:

- the overall size of the microfluidic components
- the handling of the components
- the fluidic interfaces of the components.

To be able to handle the microfluidic components with one standardized handling device and to be able to easily connect the microfluidic components with each other and the outer world, the outer geometry was defined as 75.5 mm x 25.5 mm, the size of a conventional microscopy slide that also fits with the standards that are more common in Europe (DIN ISO 8037-1), as well as the one used in the US (ASTM E 211). The spacings of the fluidic interfaces were defined as those of a 384 well plate, namely a well spacing of 4.5 mm. This would allow 16 rows with 5 spots per rows.



Oliver Rötting

Für die fluidischen Schnittstellen sind die erste und fünfte Spalte vorgesehen und nur 14 Reihen werden hierfür genutzt. Die erste und letzte Reihe sind für eine Integration z. B. von elektrischen Funktionen vorgesehen. Dieses Konzept wird in Abb. 1 verdeutlicht. Für den Fall, dass größere Strukturen benötigt werden, können die Abmaße des Objektträgers verdoppelt werden, und die Chips sind weiterhin für das Handlingkonzept einsatzfähig.

Für die Handhabung der Komponenten können Adapterrahmen genutzt werden, die dem SBS-Titerplatten-Standard entsprechen. Durch die Nutzung des Objektträgerformats für die mikrofluidischen Komponenten kann ein Adapterrahmen von Tecan für das einfache Handling genutzt werden, s. Abb. 2. Dieser Adapterrahmen sieht allerdings keine Verbindung der Chips untereinander und mit der Außenwelt vor, so dass externe Fluidanschlüsse genutzt werden müssen.

Chip-to-Chip & Chip-to-World

Um eine Chip-to-Chip und Chip-to-World-Verbindung zu realisieren, wurde ein anderer Ansatz gewählt, s. Abb. 3, der über den Rahmen eine Verbindung der Chips miteinander und zur Makrowelt ermöglicht. Die Befüllung der mikrofluidischen Komponenten kann über diesen Rahmen z. B. mittels Mehrkanalpipette oder Pipettierroboter erfolgen, so dass die gängigen Automatisierungsprozesse möglich sind. Durch eine Fixierung der mikrofluidischen Chips im Adapterrahmen kann das System frei bewegt werden und auch ein Drehen des Rahmens für eine Nutzung im inversen Mikroskop ist möglich.

Um mikrofluidische Produkte in die tägliche Laborroutine zu überführen, ist als dritter Punkt die fluidische Anslusstechnik zu lösen. Zwei Kategorien mikrofluidischer Anschlüsse sind für die Mikrofluidik relevant: Die erste – und einfacher zu lösende – Anforderung ist, wenn größere Volumen eingesetzt werden und Totvolumina kein Problem darstellen. Die zweite Kategorie sind fluidische Schnittstellen mit geringem oder keinem Totvolumen. Im ersten Fall sind für Anwendungen in den Life Sciences Luer- und Luer Lok-Anschlüsse der weit verbreitete Standard. Für große Stückzahlen müssen diese Anschlüsse direkt in den Chip integriert sein, s. Abb. 4. Da die direkte Integration der Anschlüsse nur für die Serienfertigung sinnvoll ist, wurden Luer- und Luer Lok-kompatible Anschlüsse mit einem Kleberand realisiert, die schnell, einfach und sicher zu montieren sind, s. Abb. 5. Diese Anschlüsse wurden passend z. B. zu den gängigen Spritzen hergestellt und kommen bei Anwendungen zum Einsatz, bei denen Totvolumina nicht störend und auch nicht vermeidbar sind. Für ein minimiertes Totvolumen wird ein entsprechendes Gegenstück passend zu diesem Anschluss realisiert, das das Totvolumen minimiert.

Die umgesetzten Lösungen für die geschilderten Probleme stellen einen Schritt zur Kommerzialisierung mikrofluidischer Produkte dar. Die nächste Aufgabe ist die Übertragung von mehr und mehr Anwendungen auf Lab-on-a-Chip-Komponenten.

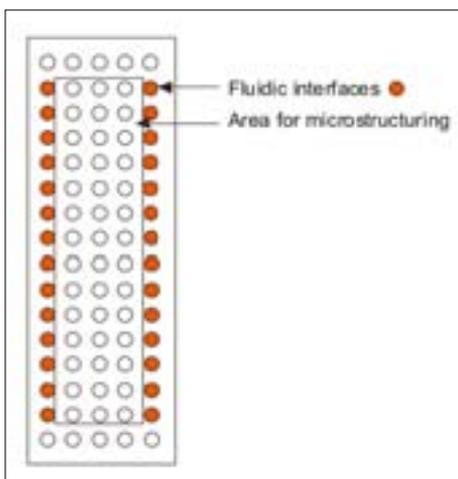


Abb. 1:
Konzept für die Anordnung der Mikrofluidik-Strukturen: Bereich für die Mikrostrukturierung und die fluidischen Schnittstellen für die Chip-to-Chip- und Chip-Makrowelt-Kopplung.

Fig. 1:
Concept for the arrangement of microfluidic structures: Area for micro-structuring and fluidic interfaces for chip-to-chip or chip-to-macro-world connection.

For the fluidic interface the first and fifth (last) column were defined, whereas only 14 rows are used. The first and last rows are defined for a possible integration of for example electric elements. This concept is shown in fig. 1. In case larger structures are needed, the outer dimensions of the slide can be doubled and so will still fit the handling equipment.

For the handling of the components, adapter frames can be used which are adapted to the SBS standard for titer-plates. Due to the application of the slide format the adapter frame from Tecan can be used for the handling of the microfluidic chips, see fig. 2. This titerplate frame does not allow the fluidic interconnection of the chips with each other or the outer world. With this frame external fluidic fittings have to be used.

Chip-to-chip & Chip-to-world

Another approach was chosen which also uses the SBS titerplate standard, but includes fluidic interfaces for chip-to-chip and chip-to-world-coupling, see fig. 3. To fill this chip, multipipettes or pipetting robots can, for example, be used so that automation is possible. Due to the fixation of the chips inside the frame, the system can be used in any orientation such as that required for inverse microscopes.

The fluidic interface was the third issue to be solved in bringing microfluidic components into daily laboratory life. In microfluidics two categories for the fluidic fittings have to be kept in mind: the first – and easier to solve – application is when bigger volumes are applied and dead volumes are not the issue, the second concerns fluidic interfaces with minimized or no dead volume. In the first case, for life science applications Luer and Luer-Lok fittings

are the widely accepted standard. For mass products the fittings have to be directly integrated, see fig. 4. Since the direct integration of fittings only makes sense for volume production, Luer- and Luer-Lok compatible fittings with a gluing edge have been produced which can be assembled fast, simply and safely, see fig. 5.

These fittings are compatible with standard syringes where dead volumes are not the issue – and cannot be avoided – and for minimized dead volume where the counterpart fits into these fittings and minimizes the dead volume.

The solutions realized for the issue mentioned above will be a step towards the commercialization of microfluidic components. The next task will be to integrate more and more applications on lab-on-a-chip devices.

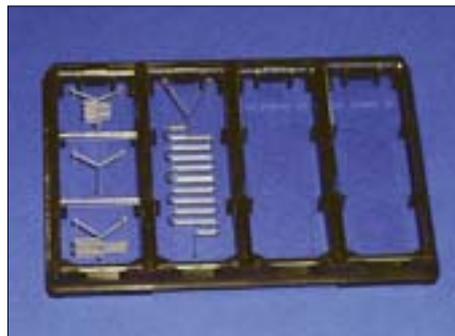


Abb. 2: Mikrofluidische Module in Trägerrahmen, Rahmen: Tecan.

Fig. 2: Microfluidic modules in carrier frame, Frame: Tecan.

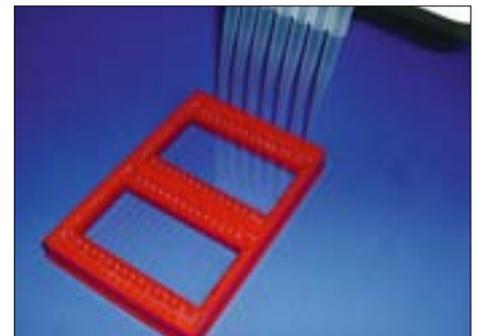


Abb. 3: Trägerrahmen mit integrierten fluidischen Schnittstellen, Quelle: microfluidic ChipShop.

Fig. 3: Carrier frame with integrated fluidic interconnects, Source: microfluidic ChipShop.

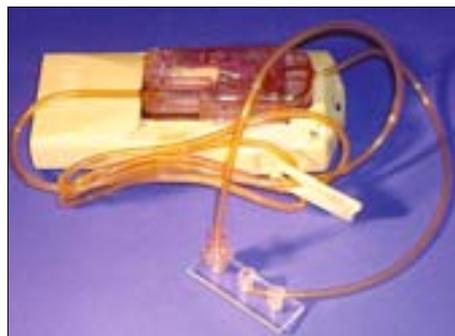


Abb. 4: Mischer mit integrierten Luer Loks, Quelle: microfluidic ChipShop.

Fig. 4: Mixer chip with integrated Luer Loks, Source: microfluidic ChipShop.



Abb. 5: Luer- und Luer Lok-kompatible Anschlüsse für eine einfache Montage auf Lab-on-a-Chip-Systemen.

Fig. 5: Luer and Luer Lok compatible fittings for easy assembly on lab-on-a-chip-systems.



Marcel Flemming

Problemstellung

Die Entwicklungen in der Nanotechnik stellen die quantitative Charakterisierung (Metrologie) von Oberflächenstrukturen vor neuartige Herausforderungen. Die für Mikrostrukturen etablierten Verfahren und klar definierten Charakterisierungsmerkmale lassen sich nur sehr begrenzt durch einfaches Herunterskalieren in den Nanometerbereich übertragen.

In den vergangenen Jahren wurde insbesondere die Rasterkraftmikroskopie (Scanning Force Microscopy – SFM) zur Untersuchung der Nanotopografie von Oberflächen und Schichten zunehmend etabliert. Hier werden bislang vorwiegend die rein qualitativen Informationen der SFM-Bilder und die aus der Mikrometrologie formal übernommenen Rauheitsparameter genutzt.

Weitreichende Perspektiven für eine adäquatere Beschreibung von Nanostrukturen bieten dagegen Leistungsspektraldichte-Funktionen (PSD – Power Spectral Density), da erst auf der Basis solcher Funktionen die notwendigen Informationen über die laterale Verteilung der einzelnen Strukturanteile gewonnen werden können. Diese Verteilung ist aber von essentieller Bedeutung für die funktionale Wirkung.

Die PSD ist wie folgt definiert:

$$PSD(f_x, f_y) = \lim_{L \rightarrow \infty} \frac{1}{L^2} \left| \int_0^L \int_0^L h(x, y) e^{-j2\pi(f_x x + f_y y)} dx dy \right|^2$$

wobei f_x, f_y die Ortsfrequenzen eines zweidimensionalen Oberflächenprofils $h(x, y)$, definiert über eine quadratische Fläche der Seitenlänge L , bedeuten.

Im Folgenden sind dazu beispielhaft Ergebnisse unserer Untersuchungen für verschiedene Anwendungen dargestellt. Die SFM-Messungen werden mit einem Rasterkraftmikroskop D 3100 (Fa. VEECO) im Tapping Mode unter Verwendung von einkristallinen Si-Spitzen (Fa. Nanosensors) mit Nominalradien von 10 nm durchgeführt. Für die PSD-Analyse werden am IOF entwickelte Programme eingesetzt /1/.

Beispiele

Abb. 1a zeigt die SFM-Aufnahme einer am IOM Leipzig durch Ionenstrahlätzen von InP erzeugten Nanostruktur, deren hoher Ordnungsgrad und laterale Dimension quantitativ durch den Peak in der PSD-Funktion (Abb. 1b) erfasst werden.

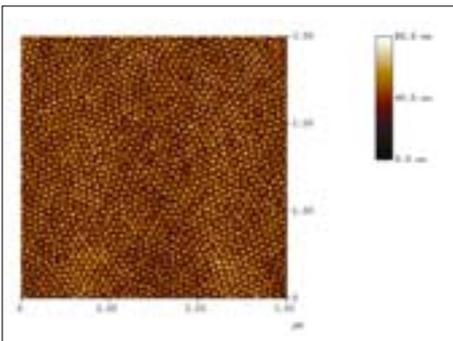


Abb. 1a: SFM-Aufnahme der Oberflächenstruktur von ionenstrahlgeätztem InP.

Fig. 1a: SFM image of the surface structure of ion beam etched InP.

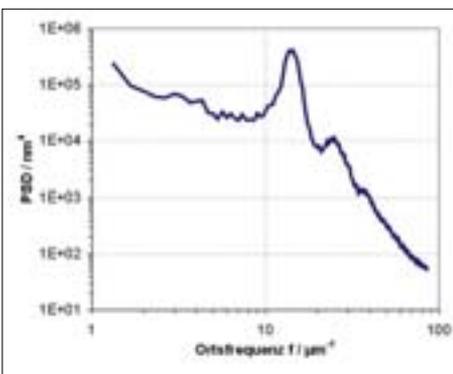


Abb. 1b: PSD-Funktion der Oberflächenstruktur aus Abb. 1a.

Fig. 1b: PSD function corresponding to the surface structure of Fig. 1a.

The problem

Today's rapidly developing nanotechnologies result in novel challenges for the quantitative characterization of surface structures. The measurement techniques and well-defined features used in the characterization process, which have been well established for microstructures, cannot a priori be extended to the nanometer range by a simple downscaling.

During the past decade, Scanning Force Microscopy (SFM) has become increasingly used to investigate the nano-topography of surfaces and thin films. However, the SFM data evaluation has been restricted mainly to qualitative image information and the estimation of simple roughness parameters as formally defined for micro-roughness.

The appropriate description of nanostructures can be accomplished through Power Spectral Densities (PSD). These functions provide otherwise missing information about the lateral distribution of the individual roughness components. In many current applications, it is just this distribution that crucially affects the desired surface functionality.

The PSD is defined as:

$$PSD(f_x, f_y) = \lim_{L \rightarrow \infty} \frac{1}{L^2} \left| \int_0^L \int_0^L h(x, y) e^{-j2\pi(f_x x + f_y y)} dx dy \right|^2$$

where f_x, f_y are the spatial frequencies of the two-dimensional surface profile $h(x, y)$ defined for a square area with side length L .

We present several examples of results for various applications. The SFM measurements were performed with a scanning force microscope D3100 from VEECO in the Tapping Mode. Single crystalline Si tips (Nanosensors Inc.) with a 10 nm nominal radius were used. For PSD analysis we employed software tools developed at the IOF /1/.

Examples

Fig. 1a shows the SFM image of a nano-structure that was ion-beam etched into InP at the Institute of Surface Modification (IOM) in Leipzig. The character and dimension of this highly ordered nano-structure are quantitatively represented by the peak of the PSD function (Fig. 1b).



Annette Hultaker



Angela Duparré



Abb. 2:
Wassertropfen auf einer
ultra-hydrophoben Oberfläche.

Fig. 2:
Water drop on an
ultra-hydrophobic surface.

Ein neuartiger Ansatz zur Erzeugung ultra-hydrophober Oberflächen (Abb. 2) mit optischer Qualität basiert auf statistischen Nanorauheiten von Beschichtungen [2]. Diese Arbeiten werden im BMBF-Verbundprojekt „Nanophob“ (OD2001_018) gefördert. Die gezielte Einstellung optimaler Rauheiten erfordert Rauheitsanalysen über einen ausgedehnten Ortsfrequenzbereich, wobei Anteile bei hohen Ortsfrequenzen wegen der Unwirksamkeit für die optische Streuung bei gleichzeitig starker Wirkung für den funktionalen Effekt besonders bedeutsam sind.

In Abb. 3a sind die Oberflächen gesputterter ZrO_2 -Schichten zu sehen. Die Struktur der rauheren Schicht (Abb. 3a, rechts) führt zu PSD-Werten (Abb. 3b), die den Effekt echter Ultrahydrophobie bei tolerabler Lichtstreuung vorherbestimmen lassen. Tatsächlich liefert diese Nanorauheit (zusammen mit einer hydrophoben Monolagen-Deckschicht) einen hohen Wasserrandwinkel von $> 150^\circ$ und Streulichtwerte kleiner 0,2 % [2].

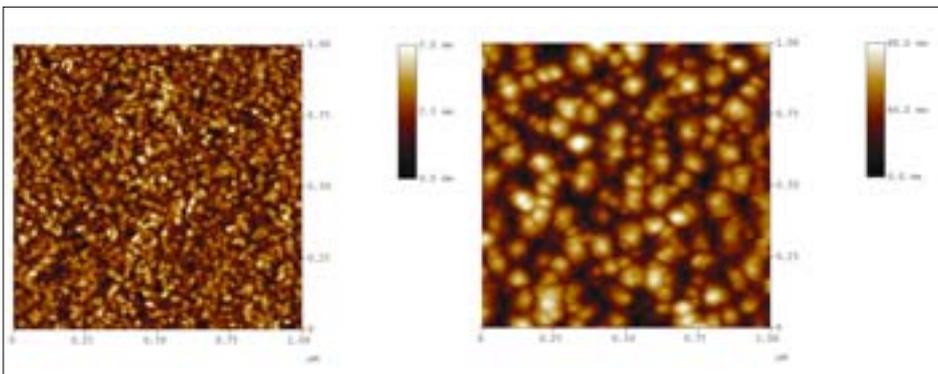


Abb. 3a:
SFM-Aufnahme der Oberflächenstruktur von gesputterten ZrO_2 -Schichten mit unterschiedlicher Rauheit (Höhenscala linkes Bild: 5 nm; rechtes Bild: 80 nm).

Fig. 3a:
SFM image of the surface structure of sputtered ZrO_2 coatings with different roughness (height scale left image: 5 nm; right image: 80 nm)..

Abb. 4a zeigt Ergebnisse von Rauheitsanalysen an Substraten und Beschichtungen für den EUV-Bereich (Extreme Ultra Violet). In diesem Bereich müssen die Substrate zwingend eine Superpolitur besitzen und dürfen nach Beschichtung nur geringe Rauheitserhöhungen im Subnanometer-Bereich aufweisen.

Im Beispiel sind die SFM-Aufnahmen der Oberfläche eines superpolierten Si-Wafers (Abb. 4a, links) sowie eines Sc/Si- (Abb. 4a, Mitte) und eines Mo/Si-Vielschichtsystems (Abb. 4a, rechts) auf Si zu sehen. Die SFM-Bilder verschaffen einen qualitativen Eindruck, die rms-Rauheitsparameter einen quantitativen Fingerprint. Die adäquatere Metrologie wird wiederum durch die PSDs (Abb. 4b) erzielt. Diese verdeutlichen, dass die Rauheitserhöhungen von den beiden Systemen durch Beiträge in unterschiedlichen Ortsfrequenzbereichen hervorgerufen werden.

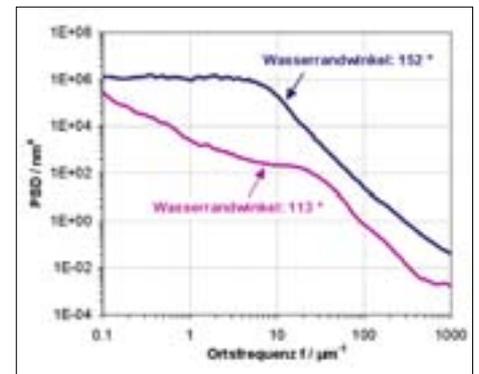


Abb. 3b:
PSD-Funktionen und Wasserrandwinkel der Oberflächenstrukturen aus Abb. 3a.

Fig. 3b:
PSD functions and water contact angles corresponding to the surface structures of Fig. 3a.

A novel approach to achieve ultra-hydrophobic surfaces (see Fig. 2) with optical quality utilizes statistical nano-roughness of coatings [2]. This work is currently being supported by the BMBF in the joint project „Nanophob“ (OD2001_018). Proper control of optimum roughness requires that the roughness analysis be extended over a wide spatial frequency range. Particularly important is high spatial frequency roughness, as this does not induce optical scatter although significantly contributing to the desired functional effect.

Fig. 3a displays the surfaces of sputtered ZrO_2 layers. The rougher film structure (Fig. 3a, right) results in PSD values (Fig. 3b) that suggest real ultra-hydrophobicity and tolerable light scatter. This nano-roughness (together with a hydrophobic monolayer on top) in fact provided a high water contact angle of $> 150^\circ$ and light scatter $< 0.2\%$ [2].

A roughness analysis on substrates and thin film coatings for the EUV (Extreme Ultra Violet) range are shown in Fig. 4a. In the EUV range, substrates must be super-polished, and only a slight roughness increase in the sub-nanometer range is permitted after coating.

Examples of SFM images are given in Fig. 4 for the surfaces of a super-polished Si-wafer (4a, left) as well as an Sc/Si multilayer (4a, middle) and an Mo/Si multilayer (4a, right) deposited onto Si. The SFM images provide a qualitative impression and the rms-roughness a quantitative fingerprint. The more appropriate metrology however, is again achieved through the PSD functions (Fig. 4b). Only the PSDs clarify that for the two systems, the increased roughness is caused by contributions from different spatial frequency ranges.

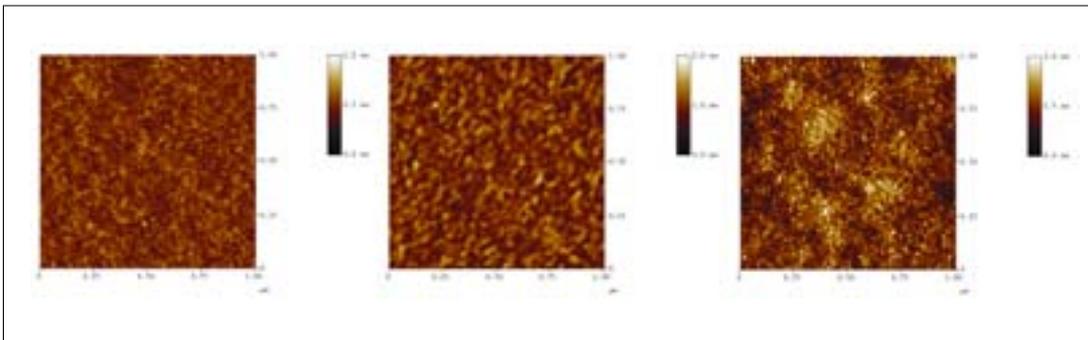


Abb. 4a: SFM-Aufnahmen der Oberflächenstruktur eines superpolierten Si-Wafers (links; Höhengala: 1 nm; rms: 0,08 nm), eines Sc/Si-Vielschichtsystems (Mitte; Höhengala: 2 nm; rms: 0,19 nm) und eines Mo/Si-Vielschichtsystems (rechts; Höhengala: 3 nm; rms: 0,40 nm) auf Si-Wafer.

Fig. 4a: SFM images of the surface structure of a super polished Si wafer (left image; height scale: 1 nm; rms: 0.08 nm), a Sc/Si multilayer system (central image; height scale: 2 nm; rms: 0.19 nm), and a Mo/Si multilayer system (right image; height scale: 3 nm; rms: 0.40 nm) on Si wafer.

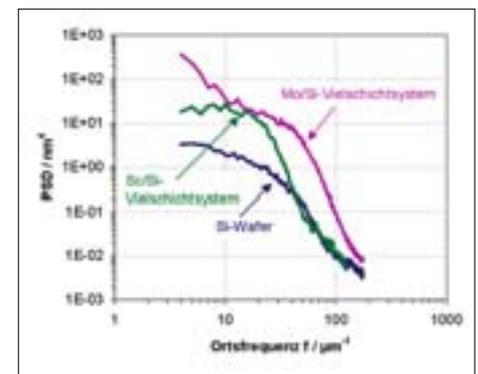


Abb. 4b: PSD-Funktionen der Oberflächenstrukturen aus Abb. 4a.

Fig. 4b: PSD functions corresponding to the surface structures of Fig. 4a.

Untersuchungsgegenstand

Weitere Ergebnisse unserer bisherigen Untersuchungen zeigen, dass beim Übergang zu hohen Ortsfrequenzen ($\geq 100 \mu\text{m}^{-1}$ bzw. laterale Dimensionen $\leq 10 \text{ nm}$), trotz bereits durchführbarer Messungen (s. Abb. 3), beim derzeitigen internationalen Stand der Technik noch fundamentale Unklarheiten über Möglichkeiten und Grenzen sinnvoller Messungen und physikalisch sauberer Interpretation bestehen. In vielen Anwendungen der Nanotechnologie können Strukturen aber durch Rauheitsanteile mit Ortsfrequenzen im Bereich $100 \mu\text{m}^{-1}$ – $1\,000 \mu\text{m}^{-1}$ die Eigenschaften der Oberfläche wesentlich beeinflussen. Deshalb sind systematische experimentell-empirische und messtheoretische Untersuchungen auf der Basis von SFM in Arbeit, die Einflüsse der Messabläufe, Messspitzen und Auswertetechnik unter diesem Aspekt näher untersuchen. Dabei soll u. a. geklärt werden, welche Aussagen die Charakterisierung lateraler Strukturdimensionen liefert, wenn diese im Bereich der Messspitzenausdehnung und darunter liegen.

Als Basis dafür wurde, gestützt auf die bisherigen Ergebnisse, eine erste Fallunterscheidung vorgenommen:

- Messspitze sehr klein gegenüber der niedrigsten zu erfassenden Ortswellenlänge: „getreue Profilwiedergabe“, **Auflösung** der Strukturanteile ist gegeben.
- Messspitze \geq Ortswellenlänge: tatsächliche Auflösung im strengen Sinne nicht mehr gegeben: „modifizierte Profilwiedergabe“. Die Rauheitsanalyse enthält aber **Informationen** über die Nanostrukturen, die für die Anwendungen relevant sind.
- Messspitze sehr groß gegenüber der Ortswellenlänge: Die Rauheitsanalyse enthält keine verwertbaren Informationen mehr.

Weiterhin wird das Problem der Kalibrierung von SFM-Messungen im Nanometerbereich untersucht und in der Mitarbeit im VDI/VDE/GMA Fachausschuss 3.41/43 „geometrische Messgrößen und Kalibrierung“ vorangetrieben.

Außer der Rasterkraftmikroskopie, die Oberflächen lokal bis in Bereiche von ca. $100 \times 100 \mu\text{m}^2$ erfasst, setzen wir für die Nanometrologie weitere Verfahren ein, die größere Messbereiche überdecken und sich mit ihren unterschiedlichen Leistungsparametern ideal mit SFM kombinieren lassen. Das betrifft insbesondere die Streulichtmessung, Weißlichtinterferometrie (WLI) und konfokale Mikroskopie (LSM). Abb. 5 ordnet einige der Verfahren zusammen mit SFM hinsichtlich vertikaler und lateraler Auflösung ein. Die Anordnungen zur Streulichtmessung sind in /3/ und in einem im Beitrag im gleichen Heft /4/ beschrieben.

Literatur:

- /1/ Duparré, A.; Ferré-Borrull, J.; Glied, S.; Notni, G.; Bennett, J. M.: „Surface characterization techniques for determining rms roughness and power spectral densities of optical components“, *Applied Optics* 41 (2002) 154–171.
- /2/ Flemming, M.; Hultaker, A.; Reihls, K.; Duparré, A.: „Modelling and characterization of thin film nanostructures for ultra-hydrophobic surfaces with controlled optical scatter“, *Proc. SPIE* 5250 (2003), im Druck.
- /3/ Duparré, A.: „Untersuchungen der Mikro- und Nanorauheit von Oberflächen durch Streulichtmessung“, *VDI-Berichte* 1669 (2003) 43–50.
- /4/ Glied, S.; Benkert, N.; Duparré, A.: „High-sensitivity light scattering analysis of optical components from the VUV to IR“, *Jahresbericht Fraunhofer IOF* 2003, S. 74–79.

Research topic

Even though some measurements have already been performed at very high spatial frequencies ($\geq 100 \mu\text{m}^{-1}$, or lateral dimensions $\leq 10 \text{ nm}$), see Fig. 3, our investigations reveal that the current state-of-the-art is fundamentally lacking in knowledge regarding the capabilities and limits of useful measurements and clear interpretation within this region. However for a large variety of nanotechnology applications, roughness structures at spatial frequencies from $100 \mu\text{m}^{-1}$ to $1000 \mu\text{m}^{-1}$ can significantly affect surface properties. Therefore, we perform systematic experimental/empirical and methodical theoretical work on the basis of SFM to study the influence of the measurement procedures, tips, and data evaluation within this critical roughness range. One of the main questions to be answered is: What kind of information does the characterization of lateral dimensions provide if these dimensions are of the order of magnitude of the tip size or smaller.

On the basis of results obtained until now our first approach defines the following categories:

- Tip size very small as compared with lowest spatial wavelength to be registered: „true representation of roughness profile“, resolution of the surface structures.
- Tip size \geq spatial wavelength: resolution in the strict sense not possible: „modified profile representation“. However, the roughness analysis contains nano-structural information that is relevant for the applications.
- Tip size very large as compared with spatial wavelength: roughness analysis contains no useful information.

In addition, the calibration problem of SFM measurements in the nanometer range is being investigated and promoted through activities in the VDI/VDE/GMA Committee 3.41/43 „geometric parameters and calibration“.

Besides Scanning Force Microscopy that measures surfaces areas up to $\sim 100 \times 100 \mu\text{m}^2$, we employ measurement techniques for nano-metrology which cover large surface areas and ideally compliment SFM. In particular,

light scattering techniques, white light interferometry and confocal microscopy are used. In the diagram in Fig. 5, some of these techniques together with SFM are depicted with respect to vertical and lateral resolution. The equipment used for light scattering measurement is described in detail in /3/ and in another paper of this annual report /4/.

References:

- /1/ Duparré, A.; Ferré-Borrull, J.; Glied, S.; Notni, G.; Bennett, J. M.: „Surface characterization techniques for determining rms roughness and power spectral densities of optical components“, Applied Optics 41 (2002) 154–171.
- /2/ Flemming, M.; Hultaker, A.; Reihls, K.; Duparré, A.: „Modelling and characterization of thin film nanostructures for ultra-hydrophobic surfaces with controlled optical scatter“, Proc. SPIE 5250 (2003), im Druck.
- /3/ Duparré, A.: „Untersuchungen der Mikro- und Nanorauheit von Oberflächen durch Streulichtmessung“, VDI-Berichte 1669 (2003) 43–50.
- /4/ Glied, S.; Benkert, N.; Duparré, A.: „High-sensitivity light scattering analysis of optical components from the VUV to IR“, Jahresbericht Fraunhofer IOF 2003, S. 74–79.

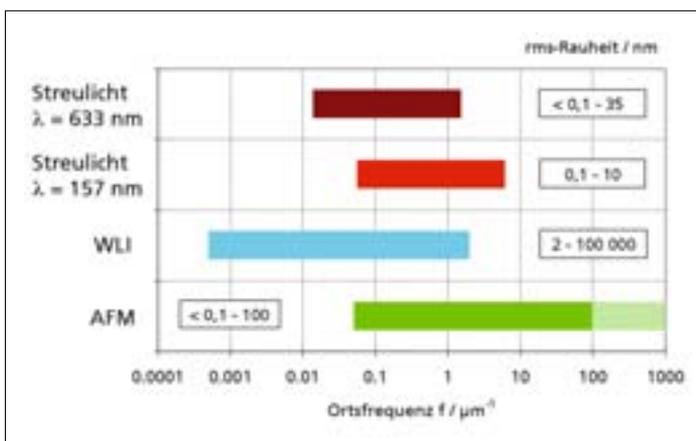


Abb. 5: Vertikale und laterale Auflösung verschiedener Nanometrologie-Verfahren (SFM, WLI, Streulichtmessung).

Fig. 5: Resolution (vertical and lateral) of different Nanometrology methods (SFM, WLI, Scatter measurement).

Flexible Phasogrammetrie – eine neue Methodik zur 3-D-Rundumvermessung

Peter Kühmstedt, Matthias Heinze, Michael Himmelreich, Gunther Notni



Peter Kühmstedt

1. Einleitung

Die Digitalisierung von Modellen und die durchgängige Fertigungskontrolle sind wichtige Teile der modernen industriellen Produktentstehung. Generell müssen bei solchen Messungen sehr hohe Anforderungen an die vollständige Erfassung der Objekte (multi-view) gestellt werden. Man muss deshalb Messstrategien entwickeln, die komplexe Messobjekte vollständig erfassen.

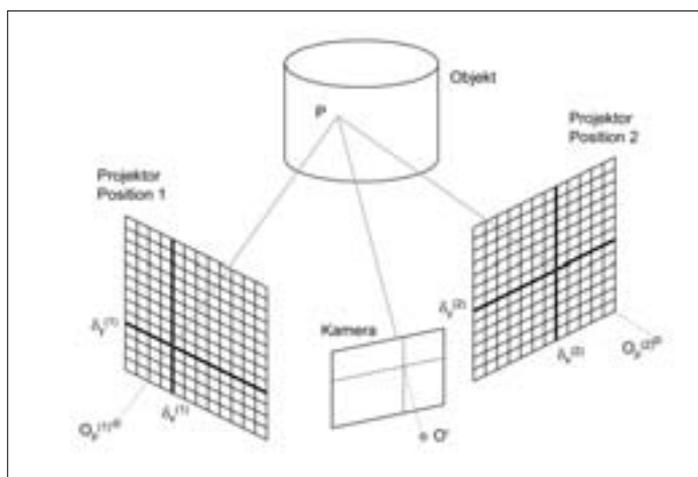
Für die Realisierung der Rundumvermessung wurde in den letzten Jahren vom IOF die Methodik der selbstkalibrierenden Streifenprojektion – die Phasogrammetrie – entwickelt [1], [2].

2. Phasogrammetrie

Die Methode der Phasogrammetrie stellt die mathematisch geschlossene Verschmelzung der Methodik der Photogrammetrie mit denen der aktiven Musterprojektion dar. Das Grundprinzip der Phasogrammetrie besteht darin, dass von mindestens zwei unterschiedlichen Positionen jeweils zwei Serien von Mustersequenzen (z. B. Gray-Code-Sequenzen in Verbindung mit phasenverschobenen Gitterlinien) auf das zu vermessende Objekt projiziert werden, wobei die zweite Serie um einen Winkel von 90° zur ersten Serie verdreht ist und die bildaufzeichnende Kamera ortsfest in Bezug zum Objekt verbleibt. Damit wird jeder Objektpunkt durch mindestens vier Phasenwerte signalisiert. Die am Objektpunkt P gemessenen Phasenwerte $\delta_x^{(i)}$ und $\delta_y^{(i)}$ und ihre zugehörigen Projektionszentren $O_p^{(i)}$ definieren räumliche Strahlenbündel, die wie die Strahlenbündel der Photogrammetrie zur Koordinatenberechnung genutzt werden (siehe Abb. 1).

Abb. 1:
Geometrisches Modell
der Phasogrammetrie.

Fig. 1:
Geometric model of phasogrammetry.



Flexible phasogrammetry – a new method for whole body 3-D measurement

Peter Kühmstedt, Matthias Heinze, Michael Himmelreich, Gunther Notni

1. Introduction

Digitization of models and continuous production control are important aspects of modern industrial product development. The development of appropriate industrial strategies generally requires highly accurate measurements, which encompass a complete registration of the object (multi-view) in question.

The provision of a suitable measuring strategy has led to the recent development of a methodology called phasogrammetry [1], [2] at Fraunhofer IOF, Jena in which whole body measurement is achieved by self-calibrating fringe projection.

2. Phasogrammetry

Phasogrammetry means the combination of photogrammetry and active fringe projection in closed mathematical form. The basic principle of phasogrammetry includes the projection of at least two different positions, each one including two series of pattern sequences (e.g. Gray-Code-sequences in combination with phase-delayed grid lines) onto the object being measured, the second series being rotated 90° with respect to the first one. The recording camera remains in the same position relative to the object. Every spot on the object is therefore characterized by at least four phase values. The phase values $\delta_x^{(i)}$ and $\delta_y^{(i)}$ on the object spot P and its associated projection centers $O_p^{(i)}$ define a spatial bundle of rays, similar to those of photogrammetry, which can be used to calculate the coordinates (see fig. 1).



Matthias Heinze



Michael Himmelreich



Gunther Notni

3. Flexible phasogrammetrische Systeme

Grundvoraussetzung bisheriger phasogrammetrischer Systeme (siehe Abb. 2) ist, dass alle Kameras ortsfest in Bezug zum Objekt sein müssen. Damit ist die Anzahl der Objektansichten beschränkt auf die Anzahl der eingesetzten Kameras /2/. Es ist aber nicht immer sinnvoll (Kosten), die Kameraanzahl zu erhöhen.

3.1 Messablauf

In seiner Grundanordnung besteht das neuartige flexible phasogrammetrische Messsystem nur noch aus einem Sensorkopf, welcher eine Messkamera K_p und einen Streifenprojektor enthält, sowie einer weiteren Kamera, der so genannten Kalibrierkamera K_m .

Im Messablauf wird das Objekt nacheinander aus unterschiedlichen Richtungen mit den aus der Phasogrammetrie bekannten Mustersequenzen beleuchtet. Sowohl die starr angeordnete Kalibrierkamera als auch die mitbewegte Messkamera zeichnen simultan die Bilder auf (Messablauf siehe Abb. 2). Im Ergebnis erhält man neben den Phasenmesswerten der Kalibrierkamera K_m aus jeder Beleuchtungsrichtung Phasenmesswerte von der mitbewegten Messkamera K_p . Die mitbewegte Messkamera hat jedoch während des Messablaufes in Bezug zum Messobjekt eine Ortsänderung erfahren, was im Widerspruch zum Grundprinzip der bisherigen Phasogrammetrie steht.

3.2 Auswertestrategie – das Prinzip der virtuellen Passmarken

Dieser Widerspruch wurde durch das neu entwickelte Prinzip der virtuellen Passmarken gelöst /3/. Dieses beinhaltet den folgenden dreistufigen Selbstkalibrierprozess.

Schritt 1:

Kalibrierung des Projektors P
Mit den Phasenwerten der stationären Kalibrierkamera K_m werden die Orientierungsparameter des Projektors für alle Projektorpositionen N mittels bekannter Methoden des Bündelblockausgleichs berechnet. Die Kalibrierkamera als Übersichtskamera dient zum Registrieren der homologen Punkte bzw. ihre Pixel dienen als „virtuelle Passmarken“.
→ Orientierungsparameter des Projektors

Schritt 2:

Kalibrierung der Messkamera K_p
Mit den Orientierungsparametern des Projektors an der Position 1 und den Phasenwerten der Messkamera an ausgewählten Punkten werden die Orientierungsparameter der Messkamera K_p an der Position 1 berechnet (freier Bündelausgleich).
→ Orientierung der Messkamera an der Position 1

Schritt 3:

3-D-Koordinatenberechnung
Nach dem Prinzip der klassischen Streifenprojektion können jetzt die 3-D-Koordinaten der für die Messkamera K_p sichtbaren Objektpunkte (Sensorposition 1) berechnet werden.
→ 3-D-Koordinaten aus Position 1
Schritte 2 und 3 werden jetzt für alle weiteren N Sensorpositionen durchgeführt.

Im Endergebnis erhält man eine 3-D-Punktewolke des Objekts, gewonnen mit der Messkamera K_p aus N Sensorpositionen und aus der Beobachtungsposition der Kalibrierkamera K_m in einem Weltkoordinatensystem. Die Bestimmung der Passmarken geschieht dabei rein virtuell und automatisch.

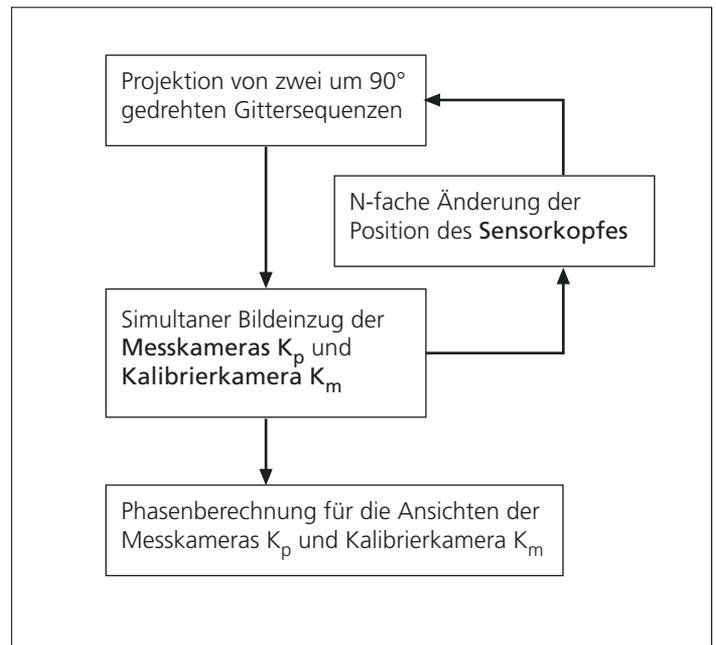


Abb. 2: Aufnahmeprozess der flexiblen Phasogrammetrie.

3. Flexible phasogrammetric systems

The basic precondition of previous phasogrammetric systems is the fixed camera position relative to the object (see fig. 2). Thus the number of object views is limited to the number of simultaneously measuring recording cameras /2/. However, it is not always judicious to increase the number of cameras (cost).

3.1 Measuring process

In its basic form such a flexible phasogrammetric measuring system consists only of a sensor head, which itself is composed of a measuring camera K_p , a fringe projector and another camera, the so-called calibration camera K_m .

During the measuring process, the object is illuminated from different directions with previously established phasogrammetric pattern sequences. Both the stationary calibration camera as well as the mobile measuring camera record the images (see fig. 2). The measured phase values of the stationary calibration camera K_m as well as the measured phase values of the mobile measuring camera K_p are obtained as a result. However contrary to the basic principle of phasogrammetry to date, the measuring camera K_p has moved.

3.2 Analyzing strategy – the principle of virtual landmarks

The contradiction of a moving camera and the requirement for fixation has been resolved by the newly developed principle of virtual landmarks /3/. This includes the following three-step self-calibration process:

Step 1:

Calibration of the projector P
The orientation parameters for the projector are calculated for all projector positions N via well established methods of bundle block adjustment using the phase values recorded by the stationary calibration camera K_m . The pixels of the all-round-view calibration camera are considered as virtual landmarks.

result: orientation parameters for the projector

Step 2:

Calibration of the measuring camera K_p
Knowing the orientation parameter of the projector at position 1 and the phase values at selected points recorded by the measuring camera K_p , the orientation parameters for the measuring camera K_p at position 1 are calculated using free bundle adjustment

result: orientation of the measuring camera at position 1

Step 3:

3-D coordinate calculation
Calculation of the 3-D coordinates of the object points, recorded by the camera K_p (position 1) using classical fringe projection
result: 3-D coordinates for the entire object (from position 1)

The analyzing steps 2 and 3 may now be performed for the second sensor position and afterwards stepwise for each subsequent position.

As a result a 3-D point-cloud of the object is acquired, which was recorded by the camera K_p from N sensor positions and from the viewing position of the calibration camera K_m . Landmarks are hereby determined virtually and automatically.

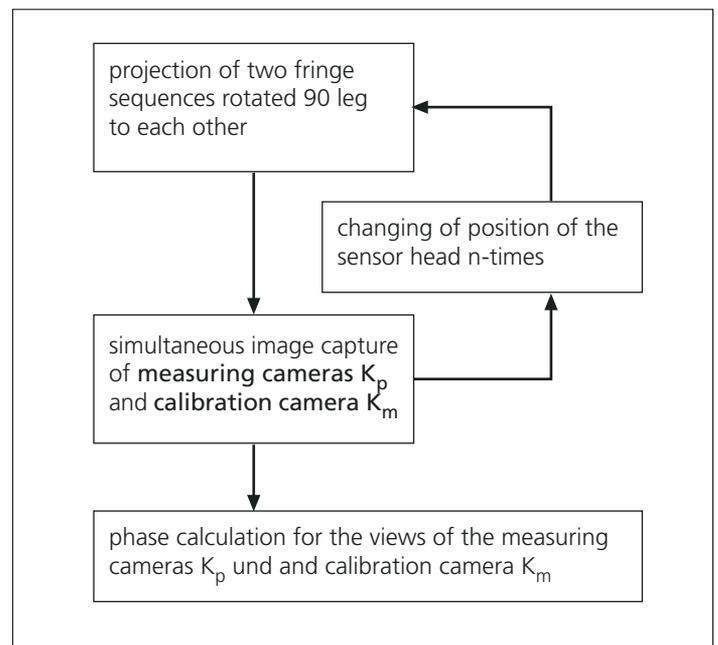


Fig. 2: Measuring process of flexible phasogrammetry.

3.3 Systemrealisierungen

Die Abb. 3 und 4 zeigen Realisierungsvarianten flexibler 3-D-Messanordnungen.

Das System in Abb. 3 leitet sich aus dem System „kolibri“ (siehe /1/) ab. Es ist dahingehend vereinfacht, dass weniger Kameras (hier drei gezeigt) verwendet werden. Durch die mitbewegte Messkamera im Sensorkopf ist die Anzahl der realisierbaren Objektansichten vollständig frei bei gleichzeitiger Reduktion der Messzeit.

Die Abb. 4 zeigt eine Anordnung in Portalbauweise und eine konkrete Realisierung. Der Sensorkopf kann mittels des Portals frei über dem Objekt positioniert werden, ohne spezielle Genauigkeitsanforderungen zu beachten. Es können großflächige komplexe Objekte in einem Messablauf erfasst werden. Es werden z. Z. folgende Messparameter erreicht (Tab. 1):

Tab. 1
Messparameter.

Messvolumen bis zu:	2 000 x 2 000 x 1 000 mm ³
Messunsicherheit:	< 50 µm
Typische Messzeit:	2–15 min

Die Abb. 5 und 6 zeigen Messbeispiele der Vermessung großflächiger Objekte.

4. Zusammenfassung:

Das neu entwickelte Messprinzip der flexiblen Phasogrammetrie ist durch folgende Merkmale gekennzeichnet:

- Vermessung von großen komplexen Objekten möglich.
- Rundumvermessung ohne zusätzliche Matchingprozeduren, ohne objekt feste oder projizierte Passmarken.
- Bewegung des Sensorkopfes: keine teuren, genauen Führungsmittel bzw. Handlingsysteme notwendig.
- Anzahl der zu digitalisierenden Objektansichten frei wählbar.

Literatur:

- /1/ Schreiber, W.; Notni, G.: „Theory and arrangements of self-calibrating whole-body three-dimensional measurement systems using fringe projection technique“, Opt. Eng. 39/2000, S. 159–169.
- /2/ Notni, G.: „360-deg shape measurement with fringe projection – calibration and application“, Proc. Fringe’01 (Eds. W.Osten, W. Jüptner) Elsevier-Verlag 2001, S. 311–323.
- /3/ Notni, G.; Kühmstedt, P.; Heinze, M.; Himmelreich, M.: „Phasogrammetrische 3-D-Messsysteme und deren Anwendung zur Rundumvermessung“ in Photogrammetrie, Laserscanning, Optische 3-D-Messtechnik, Hrsg. Th. Luhmann, Wichmann-Verlag (2003) S. 21–32.



Abb. 3:
Flexibles phasogrammetrisches 3-D-Messsystem „kolibri II“.

Fig. 3:
Flexible phasogrammetric 3-D measuring system „kolibri II“

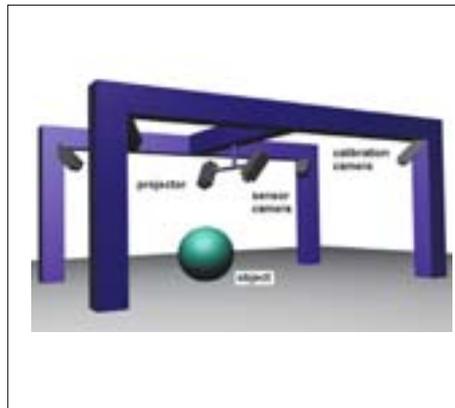


Abb. 4:
Flexibles phasogrammetrisches Messsystem in Portalbauweise – „kolibri – portal“.

Fig. 4:
Flexible phasogrammetric measuring system in overhead style, „kolibri – portal“; photograph of a realized construction.



3.3 System realization

Figures 3 und 4 show variants of the flexible 3-D measuring configurations.

The system in fig. 3 derives from the system „kolibri“ (see /1/). It is technically simplified by using only three cameras in this system. The number of possible object views is freed by using the mobile camera in the sensor head. The measuring time is simultaneously reduced.

Fig. 4 shows a diagram of an overhead construction and the actual construction. The sensor head can be placed above the object anywhere within the portal without specific requirements for accuracy. Even for extensive objects data can be acquired in one measuring procedure. Currently, the following parameters are achievable:

Tab. 1
Parameters.

Measuring volume up to:	2 000 x 2 000 x 1 000 mm ³
Measuring uncertainty:	< 50 µm
Typical measuring time:	2–15 min

Figures 5 and 6 show examples of large surface object measurements.

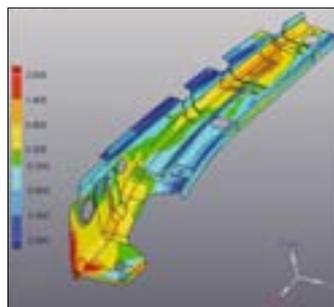
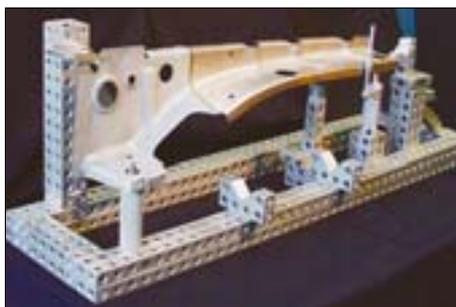


Abb. 5:
Bild und 3-D-CAD-Vergleich einer PKW-Karosseriebaugruppe.

Fig. 5:
Image and 3-D CAD comparison of a car body group.

4. Summary

The newly developed measuring principle of flexible phasogrammetry is characterized as follows:

- Measurement of large complex objects is possible
- Whole body measurement without any additional matching procedures, without object fixed or projected landmarks
- Movement of the sensor head: no accurate and expensive leading or handling systems necessary
- Arbitrary number of digitized object views, may be larger than the number of cameras used

References:

- /1/ Schreiber, W.; Notni, G.: „Theory and arrangements of self-calibrating whole-body three-dimensional measurement systems using fringe projection technique“, Opt.Eng. 39 / 2000, S. 159–169.
- /2/ Notni, G.: „360-deg shape measurement with fringe projection-calibration and application“, Proc. Fringe'01 (Eds. W.Osten, W. Jüptner) Elsevier 2001, S. 311–323.
- /3/ Notni, G.; Kühmstedt, P.; Heinze, M.; Himmelreich, M.: „Phasogrammetrische 3-D-Messsysteme und deren Anwendung zur Rundumvermessung“ in Photogrammetrie, Laserscanning, Optische 3-D-Messtechnik, Hrsg. Th. Luhmann, Wichmann-Verlag (2003) S. 21–32.



Abb. 6:
PKW-Sitz.

Fig. 6:
car seat.

Hochauflösende Streulichtanalyse an optischen Komponenten im VUV bis IR

Stefan Gliech, Nils Benkert, Angela Duparré



Stefan Gliech

Einleitung

Durch die steigenden Anforderungen an optische Oberflächen, Komponenten und Systeme gewinnen Streulichtmessanordnungen zur Analyse von optischen Verlusten, Rauheiten und Defekten an beschichteten und unbeschichteten Komponenten zunehmend an Bedeutung. Darüber hinaus lassen sich winkel- und polarisationsabhängige Transmissions- und Reflexionsverteilungen optischer Komponenten ermitteln. Die Anwendungsgebiete solcher Messtechnik erstrecken sich von der UV-Photolithographie über Kommunikationstechnik, nanostrukturierte Oberflächen, Kamerasystembewertungen etc. bis hin zu technisch rauhen Oberflächen und Aussagen zur „Appearance“ ästhetisch anspruchsvoller Oberflächen.

Im Fraunhofer IOF Jena wurden aus diesem Grund verschiedene Anordnungen zur Messung der totalen und winkelaufgelösten Streuung und der einfallswinkelabhängigen Reflexion und Transmission in einem Wellenlängenbereich vom VUV (Vakuum Ultraviolett) bis ins IR (Infrarot) entwickelt.

Neben der Messtechnikentwicklung wurden anhand von Streulichtmodellen Softwaretools geschaffen, die eine Bewertung der Messergebnisse sowie die Streulichtmodellierung von unbeschichteten und beschichteten Oberflächen ermöglichen.

Bei der Messung der totalen Streuung (TS) wird das Licht, das von einer Probe in den rückwärtigen bzw. vorwärtsgerichteten Halbraum gestreut wird, integral erfasst. Die Messung der winkelaufgelösten Streuung (ARS) liefert Streulichtverteilungen in Abhängigkeit von Einfallswinkel, Streuwinkel und Polarisationszustand. Neben der Erfassung der diffusen Streulichtverteilung (auch als BSDF – Bidirectional Scatter Distribution Function eingeführt) kann unter Beibehaltung der Bedingung Einfallswinkel = Streuwinkel die spekulare Komponente der Reflexion bzw. Transmission ermittelt werden. Eine 2Θ -Messung (Streuwinkeländerung = $2 \times$ Einfallswinkeländerung) ermöglicht die einfallswinkelabhängige Bestimmung von Gittereffizienzen und Reflexionen.

High-sensitivity light scattering analysis of optical components from the VUV to IR

Stefan Gliech, Nils Benkert, Angela Duparré

Introduction

Driven by the ever increasing requirements for optical surfaces, components and systems, increasing attention is paid to scattering techniques for the analysis of optical losses, roughness, and defects of coated and uncoated components. Furthermore, angle- and polarization dependent transmittance and reflectance measurements can be performed. The field of application for such measurements extends from UV photolithography, communication technology, nanostructured surfaces, camera systems etc. to rough engineering surfaces and appearance evaluation of aesthetically demanding surfaces.

To meet these requirements, several techniques have been developed at the Fraunhofer IOF Jena to measure the total and angle resolved light scattering and AOI (Angle Of Incidence) dependent reflectance and transmittance in the VUV (Vacuum Ultra Violet) to IR (Infrared) spectral range.

Besides the measurement techniques, software tools have been developed on the basis of scattering theories, which enable the evaluation of measured data as well as scatter-modeling of uncoated and coated surfaces.

Total scatter (TS) measurements collect the light scattered in the front or rear hemisphere. Angle resolved scatter (ARS) measurements yield the distribution of scattered light as a function of the AOI and scatter angle and polarization. In addition to measuring this scatter distribution (also referred to as BSDF – Bidirectional Scatter Distribution Function), the specular component of reflectance or transmittance can be determined when AOI is kept equal to the scatter angle. A 2Θ measurement (change of scatter angle = 2 x change of AOI) enables the AOI dependent determination of grating efficiencies and reflectance.



Nils Benkert



Angela Duparré

Streulichtmesstechnik

Als Beispiel zeigt die Abb. 1 die TS-Messanordnung für den VUV-Wellenlängenbereich /1/ mit der Möglichkeit des Wechsels der Streulichterfassungsrichtung (Rückwärtsstreuung und Vorwärtsstreuung). Diese Messanordnung unterscheidet sich von der für den UV-VIS-Wellenlängenbereich /2/ hauptsächlich durch die Einhausung in ein Vakuumkammernsystem, durch die ein Betrieb der Messanordnung unter Vakuum, in Stickstoffatmosphäre sowie einer Kombination von beiden möglich ist. Die ARS-Messanordnung für den VUV-Wellenlängenbereich (Schema in Abb. 2) /1/ wurde als Einsatz in die Messkammer der VUV-TS-Messanordnung realisiert. Somit ist es möglich, für beide im VUV betriebenen Messanordnungen die gleiche Strahlaufbereitung zu verwenden.

Für die ARS-Messungen im UV-VIS- sowie IR-Wellenlängenbereich wird eine separate Messanordnung mit Doppelgoniometer und Hexapod zur Probenpositionierung verwendet (Abb. 3) /2/.

Die TS-Messungen werden entsprechend der vom Fraunhofer IOF mitgestalteten Norm ISO 13696 durchgeführt /3/. Für ARS-Messungen ist die Schaffung einer internationalen Norm unter Federführung des Fraunhofer IOF geplant.

Die bei den jeweiligen Wellenlängen erreichten Untergrundsignale bzw. Dynamikbereiche für die TS- und ARS-Messung sind in den Tabellen 1 und 2 zusammengefasst. Der bei der ARS-Messanordnung erreichte Dynamikbereich bei 1064 nm wird z. Z. durch den Einsatz eines gekühlten Detektors erweitert. Der Einsatz der Wellenlänge 1064 nm auch für TS-Messungen ist geplant.

Tab. 1:
Wellenlängen mit zugehörigen Dynamikbereichen bei der winkelaufgelösten Streulichtmessung.

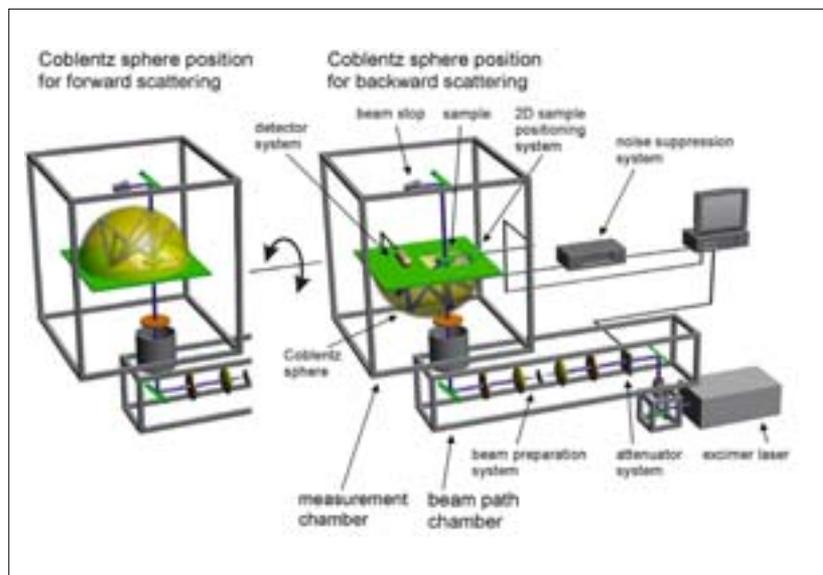
Wellenlängen	Dynamikbereich
157 nm, 193 nm	10 Größenordnungen
325 nm, 442 nm, 532 nm, 633 nm	bis zu 12 Größenordnungen
1064 nm	9 Größenordnungen (wird z. Z. erweitert)

Tab. 2:
Wellenlängen mit zugehörigen Untergrundsignalen bei der totalen Streulichtmessung.

Wellenlängen	Untergrundsignal
157 nm, 193 nm	1×10^{-6}
248 nm, 325 nm, 532 nm, 633 nm	bis zu 5×10^{-8}
10,6 μm	4×10^{-6}

Abb. 1:
Schema der Messanordnung zur Erfassung der totalen Streuung in Vorwärts- und Rückwärtsrichtung bei VUV-Wellenlängen.

Fig. 1:
Schematic picture of the arrangement for total scatter measurement in the forward scatter and backscatter directions at VUV wavelengths.



Light scatter measurement techniques

As an example, Fig. 1 shows the TS measurement set-up for the VUV range /1/ with the capability of measuring forward scatter and backscatter. The VUV- and the UV-VIS arrangements mainly differ from one another by the vacuum chamber system for the VUV system, which allows operation under vacuum, in purge gas, or a combination of the two. The ARS set-up for the VUV range (schematic picture in Fig. 2) /1/ can be introduced into the measurement chamber as another module. This enables the same beam preparation system to be used for both the TS and the ARS measurements.

ARS measurements in the UV-VIS and IR spectral region are performed with a separate system based on the double goniometer with a hexapod for sample positioning, as shown in fig. 3. More details can be found in /2/.

TS measurements are carried out according to the ISO standard 13696 which was developed with the active participation of the IOF /3/. For ARS measurements, more detailed development of a new ISO standard is planned and shall be coordinated by the IOF.

Tables 1 and 2 summarize the background levels achieved and the dynamic ranges of the TS and ARS measurements, respectively. The dynamic range for ARS measurements at 1064 nm is currently being enhanced by implementing a cooled detector. Extension of the TS set-up for 1064 nm measurement is also planned.

Tab. 1: Wavelengths with associated dynamic ranges of ARS measurements.

wavelengths	dynamic range
157 nm, 193 nm	10 orders of magnitude
325 nm, 442 nm, 532 nm, 633 nm	up to 12 orders of magnitude
1064 nm	9 orders of magnitude (currently being extended)

Tab. 2: Wavelengths with background levels of TS measurements.

wavelengths	background level
157 nm, 193 nm	1×10^{-6}
248 nm, 325 nm, 532 nm, 633 nm	up to 5×10^{-8}
10.6 μm	4×10^{-6}

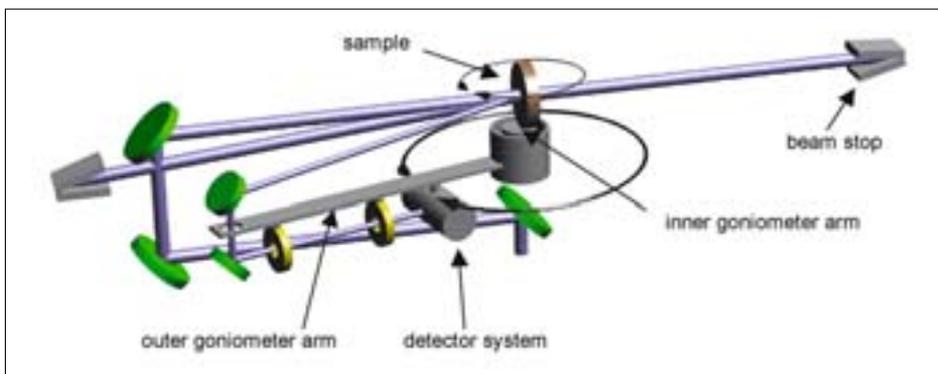


Abb. 2: Schema einer Messanordnung zur Messung der winkelaufgelösten Streuung (ARS), der Transmission (T) und Reflexion (R) bei VUV-Wellenlängen.

Fig. 2: Schematic picture of the arrangement for angle resolved scatter (ARS), transmittance (T), and reflectance (R) measurements at VUV wavelengths.

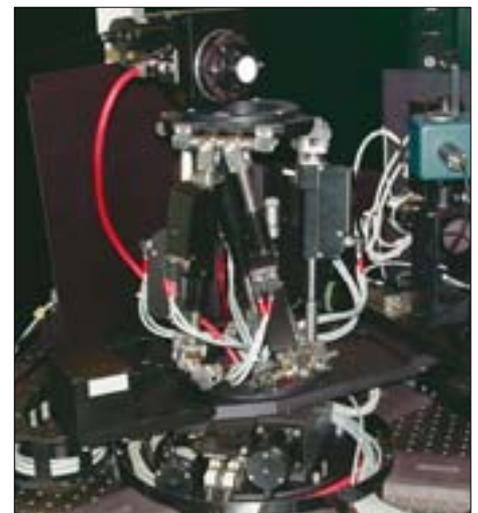


Abb. 3: Doppelgoniometer mit Hexapod, Probe und Detektionssystem der ARS-Messanordnung für den UV-IR-Wellenlängenbereich.

Fig. 3: Double goniometer with Hexapod: sample and detection system of the ARS measurement setup at wavelengths from UV to IR.

Anwendungsbeispiele

Abb. 4. zeigt ARS-Messungen an zwei identisch polierten CaF_2 -Substraten bei 157 nm. In beiden Streurichtungen (Rückwärtsstreuung: $\Theta_s = -90^\circ$ bis 90° , Vorwärtsstreuung: $\Theta_s = 90^\circ$ bis 270°) zeigt sich deutlich die durch Volumensstreuung hervorgerufene Erhöhung des Streuniveaus des einen Substrats zu dem des anderen.

In Abb. 5 sind TS-Messungen (Wellenlänge 633 nm) an einem AR-beschichteten Glas vor und nach Reinigung zu sehen. Die Messung vor der Reinigung weist eine Vielzahl von starken lokalen Streulicht erhöhungen auf, die durch die Kontamination hervorgerufen wurden. Die Messung nach der Reinigung zeigt, dass die Anzahl und Größe der Kontaminationen erheblich gesenkt werden konnte. Durch die Reinigung konnte das Streulicht großflächig auf das Niveau gesenkt werden, das schon bei der ungereinigten Probe an unkontaminierten Stellen vorlag.

Die totale Vorwärts- und Rückstreuung bei 193 nm eines CaF_2 -Substrates mit radial unterschiedlicher Polierqualität ist in Abb. 6 dargestellt. Anhand des erhöhten Streulichtniveaus ist zu sehen, dass der Mittelbereich des Substrates nicht so gut poliert wurde wie der ringförmige Bereich mit einem Durchmesser von ca. 15 mm. Die Streulicht erhöhungen in den Randbereichen bei der Rückstreuung sind auf den Einfluss des Probenhalters bei der Streulichtmessung zurückzuführen.

Die Streulichtverteilung in Rückwärtsrichtung von Dünnschichtfiltern aus der Kommunikationstechnik für den Einsatz bei 1064 nm ist in Abb. 7 dargestellt. Die Messungen wurden bei 1064 nm jeweils unter dem Einsatzwinkel der Komponenten durchgeführt.

Ein Vergleich zwischen der Modellierung und der Messung der winkel- und polarisationsabhängigen Reflexion (2Θ -Messung) eines Si-Wafers bei 633 nm ist in Abb. 8 dargestellt. Die Resultate der Modellierung und der Messung bei TE-polarisiertem Einfallstrahl sind nahezu deckungsgleich.

Weitere Anwendungsbeispiele sind in dem Beitrag von Flemming, Hultaker, Duparré „Metrologie für die Nanotechnik“ in diesem Jahresbericht und u. a. in /4/, /5/ zu finden.

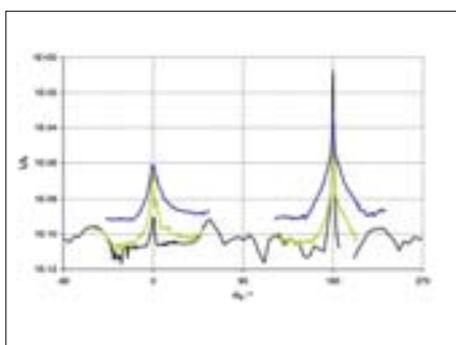


Abb. 4:
ARS-Messungen bei 157 nm an CaF_2 -Substraten mit unterschiedlicher Volumenstreuung (farbige Kurven).
Untere schwarze Kurve:
Untergrundsignal bei 157 nm.

Fig. 4:
ARS measurement at 157 nm of CaF_2 substrates with different volume scatter (colored curves).
Lower black curve: instrument signature at 157 nm.

Literatur:

- /1/ Gliech, S.; Steinert, J.; Duparré, A.: „Light-scattering measurements of optical thin-film components at 157 nm and 193 nm“, in Appl. Opt. 41 (2002) 3224–3235.
- /2/ Duparré, A.; Ferre-Borrull, J.; Gliech, S.; Notni, G.; Steinert, J. and Bennett, J.: „Surface characterization techniques for determining the root-mean-square roughness and power spectral densities of optical components“, in Appl. Opt. 41 (2002) 154–171.
- /3/ ISO 13696: „Optics and optical instruments: Test methods for radiation scattered by optical components“, DIN-Normenausschuss NAFuO, AA 018 AK2, „Optische Komponenten und Werkstoffe“, ISO-Committee ISO/TC 172/SC 9/WG 6.
- /4/ Duparré, A.: „Untersuchungen der Mikro- und Nanorauheit von Oberflächen durch Streulichtmessung“, VDI-Berichte 1669 (2003) 43–50.
- /5/ Gliech, S.; Gessner, H.; Hultaker, A.; Duparré, A.: „157 nm and 193 nm scatter, R and T measurement technique“, Proc. SPIE 5250 (2003) in print.

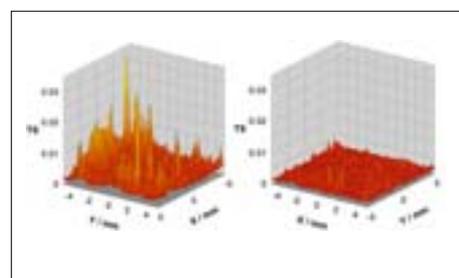


Abb. 5:
Messung der totalen Rückstreuung bei 633 nm an einem AR-beschichteten Glas vor (links) und nach (rechts) der Reinigung.

Fig. 5:
TS backscatter measurement at 633 nm of an AR coated glass before (left) and after (right) surface cleaning.

Examples of application

Fig. 4 displays ARS measurements of two identically polished CaF_2 substrates at 157 nm. In both scatter directions (backscatter: $\Theta_s = -90^\circ$ to 90° , forward scatter: $\Theta_s = 90^\circ$ to 270°) one of the substrates reveals an enhanced scatter level resulting from volume scattering.

Fig. 5 shows TS measurements on contaminated AR coated glass before and after cleaning. A variety of local scatter peaks occur in the measurement before cleaning. These peaks are caused by contamination. As the TS measurement after cleaning demonstrates, the contamination was considerably reduced. The scatter losses were decreased over the whole surface area to the level of the uncontaminated surface parts before cleaning.

The total forward scatter and backscatter at 193 nm of a CaF_2 substrate with radially variant polishing quality can be seen in Fig. 6. The higher scatter values in the central part of the

substrate reveal that this part was less well polished than the outer ring-shaped area. The backscatter enhancement close to the substrate rim is caused by stray light from the sample holder.

Fig. 7 displays the scatter distribution (backscatter direction) of thin film filters for application at 1064 nm in telecommunication. The measurements were carried out at 1064 nm at the angle of application of the components.

A comparison of modeling and measurement of the angle and polarization dependent reflectance (2Θ measurement) of an Si wafer at 633 nm is demonstrated in Fig. 8. The comparison shown with TE polarization demonstrates very good agreement.

More application examples can be found in this annual report in the paper on „Metrology for Nanotechnologies“ by Flemming, Hultaker, Duparré and in /4/, /5/.

References:

- /1/ Gliech, S.; Steinert, J.; Duparré, A.: „Light-scattering measurements of optical thin-film components at 157 nm and 193 nm“, in Appl. Opt. 41 (2002) 3224–3235.
- /2/ Duparré, A.; Ferre-Borrull, J.; Gliech, S.; Notni, G.; Steinert, J. and Bennett, J.: „Surface characterization techniques for determining the root-mean-square roughness and power spectral densities of optical components“, in Appl. Opt. 41 (2002) 154–171.
- /3/ ISO 13696: „Optics and optical instruments: Test methods for radiation scattered by optical components“, DIN-Normenausschuss NAFuO, AA 018 AK2, „Optische Komponenten und Werkstoffe“, ISO-Committee ISO/TC 172/SC 9/WG 6.
- /4/ Duparré, A.: „Untersuchungen der Mikro- und Nanorauheit von Oberflächen durch Streulichtmessung“, VDI-Berichte 1669 (2003) 43–50.
- /5/ Gliech, S.; Gessner, H.; Hultaker, A.; Duparré, A.: „157 nm and 193 nm scatter, R and T measurement technique“, Proc. SPIE 5250 (2003) in print.

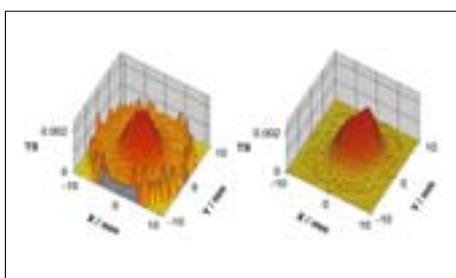


Abb. 6: TS-Messung bei 193 nm an einem lokal unterschiedlich polierten CaF_2 -Substrat (links: Rückstreuung; rechts: Vorwärtsstreuung).

Fig. 6: TS measurement at 193 nm of a locally differently polished CaF_2 (left: backscatter; right: forward scatter).

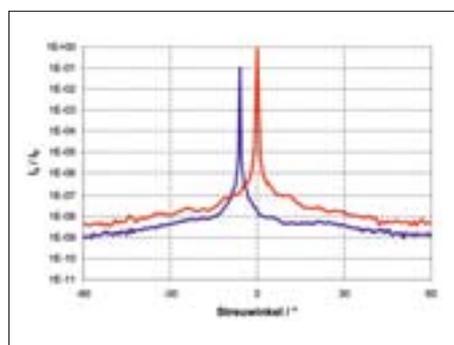


Abb. 7: ARS-Messung (@ 1064 nm, Rückstreuung) an optischen Dünnschichtkomponenten designed für 1064 nm.

Fig. 7: ARS measurement (@ 1064 nm, backscatter) of optical thin film components designed for 1064 nm.

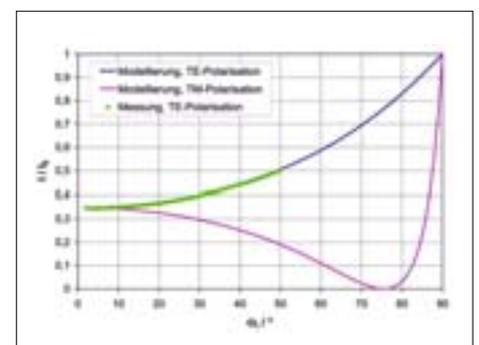


Abb. 8: Winkelabhängige und polarisationsabhängige Reflexion eines Si-Wafers bei 633 nm. Vergleich zwischen Modellierung und Messung.

Fig. 8: Angle-resolved and polarization dependent reflectance of an Si wafer at 633 nm. A comparison between modeling and measurement.



Bürk Schäfer

Einleitung

Die Konzentrationsbestimmung medizinisch relevanter Biomoleküle oder der spezifische Nachweis pathogener Keime bzw. deren Bestandteile ist eine wichtige Aufgabe in der medizinischen Diagnostik. Dabei gewinnen markierungsfrei arbeitende Analysemethoden zunehmend an Bedeutung. Eine der vielversprechendsten Methoden ist dabei die Nutzung der Oberflächen-Plasmonen-Resonanz /1/. Unser Ziel ist die Entwicklung eines einfach zu handhabenden Messsystems zur schnellen und parallelen Bestimmung einer größeren Anzahl verschiedener Parameter in Blut oder Körperflüssigkeiten von Patienten. Die Sensorelemente sind dabei als kostengünstige Einwegartikel ausgelegt. Mit der vorgestellten Lösung ist bei Einsatz geeigneter Fänger-moleküle ebenso eine einfache und sichere Analyse von Proben in der Umweltanalytik oder die gezielte Suche nach Verunreinigungen in der Lebensmittelanalytik möglich.

Messmethode

Der Nachweis bzw. die Bestimmung der Konzentration der zu analysierenden Biomoleküle mit Hilfe des Prinzips der Oberflächen-Plasmonen-Resonanz (surface plasmon resonance, SPR)

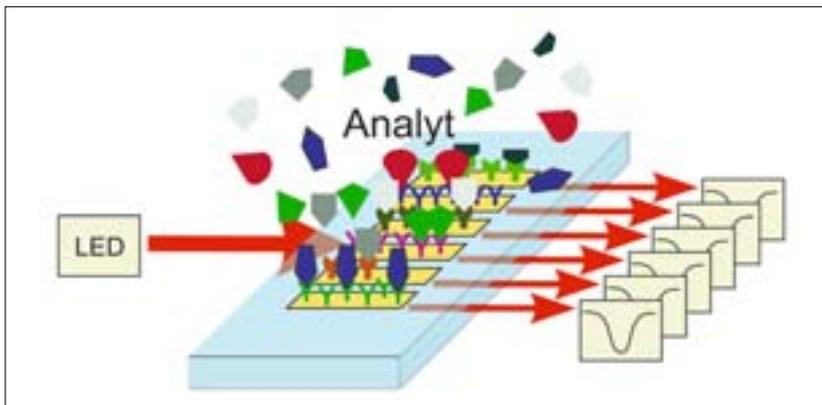
ermöglicht einen hochsensitiven Nachweis ohne den Einsatz zusätzlicher Markierungen, wie z. B. mittels Fluoreszenzmoleküle (Abb. 1). Die Sensorelemente bestehen aus einem optisch transparenten Träger, für den sich aus Gründen der Kosteneffizienz Polymermaterialien wie z. B. PMMA oder TOPAS anbieten. Abb. 2 zeigt ein heißgeprägtes Element, für größere Stückzahlen erfolgt die Herstellung mit Spritzguss.

Sowohl für eine justage-unkritische optische Kopplung mit dem Auswertesystem als auch für eine Vereinfachung des gesamten optischen Aufbaus sind strahlformende optische Elemente in den Träger geprägt /2/. Diese bewirken die Fokussierung kollimiert eingestrahlt Lichts auf die Oberseite des Sensorelements, auf das eine ca. 50 nm dicke Goldschicht aufgebracht ist. Der Messstrahl, der einen Winkelbereich oberhalb der Totalreflexion ausleuchtet, regt damit SPR in der Goldschicht an. Das reflektierte Licht verlässt wiederum kollimiert das Sensorelement und wird mit einer Kamera aufgenommen. Die so detektierte SPR-Kurve zeigt die direkte Abhängigkeit zwischen dem Winkel des Resonanzminimums und der Massenbelegung einer nur wenige 100 nm dicken Oberflächenschicht auf der Goldfläche.

Befinden sich auf der Goldschicht spezifische Rezeptormoleküle, wie z. B. Antikörper, so binden diese nach Zugabe des Analyten ihren entsprechenden Liganden, z. B. das Antigen. Die Anzahl der besetzten Rezeptoren ist dabei abhängig von der Konzentration des Liganden. Der durch diese Bindungsreaktion hervorgerufene Massenzuwachs auf der Goldoberfläche führt zu der Verschiebung des Resonanzminimums und wird als Messsignal detektiert und ausgewertet. Aus ihm ergibt sich die Konzentration der Ligandenmoleküle im Analyten.

Abb. 1: Allgemeines Funktionsprinzip des Sensorelementes mit einer Anordnung paralleler Messflächen.

Fig. 1: Functional principle of the sensor element with an arrangement of parallel measuring spots.



Miniaturized labelfree detection system

Bürk Schäfer, Norbert Danz, Michaela Harz

Introduction

Determining the concentration of medically relevant biomolecules and the specific detection of pathogenic germs or their parts is a major task in medical diagnostics. For this purpose the use of marker-free detection methods is becoming more and more important. One of the most ambitious among various methods is surface plasmon resonance [1]. Our goal is the development of an analysis system which is simple to handle and optimized for a fast and parallel determination of a significant number of different parameters for blood or body fluids of patients. The sensor elements are designed as cost-efficient disposables. In the same way the system presented allows for a simple and precise analysis of samples for environmental monitoring or the specific detection of contamination in food supervision if suitable capture molecules are applied.

Measuring method

The measuring principle of surface plasmon resonance (SPR) allows for high-sensitivity detection or determination of the concentration of biomolecules without the additional use of marker substances such as fluorescence molecules (fig. 1). The sensor elements are made of an optically transparent substrate for which cost-efficient polymer materials such as PMMA or TOPAS are well suited. Fig. 2 shows a sensor element made by hot embossing. If higher quantities are required injection molding should be used.

Beam shaping optical structures, enabling an uncritical optical coupling between the sensor element and the measuring unit as well as simplifying the entire optical set-up, are integrated into the polymer substrate [2].

These structures cause a collimated incoming light beam to be focused on the top of the sensor element, which is coated with a gold layer of around 50 nm thickness. This measuring beam illuminates an angular range above the angle of total internal reflection and excites SPR in the gold layer. The reflected light is re-collimated by the beam shaping structure and subsequently detected by a camera. The SPR angular reflectivity is shown in this image whereby the angle of minimum reflectivity depends on the mass density within a layer of a few 100 nm thickness near the gold surface.

If specific receptor molecules, e. g. antibodies, are immobilized on the gold surface, they will capture its corresponding ligands, e. g. the antigens, after addition of an analyte. The number of occupied receptor molecules depends on the ligand concentration in the analyte. The increase in mass on the gold surface, caused by this coupling reaction results in an angular shift of the resonance minimum. This signal is detected and analyzed.



Norbert Danz



Michaela Harz



Abb. 2: Sensorelement geprägt in Polymer und mit Goldmessflächen strukturiert.

Fig. 2: Sensor element hot embossed onto polymer and patterned with gold spots.

Aufbau und Datenauswertung

Die Sensorelemente in der Größe eines Objektträgers besitzen eine lineare Anordnung von bis zu 50 Messflächen. Neben einer für Referenz und Kontrollzwecke benötigten Anzahl an Flächen stehen ca. 40 Messflächen, die mit unterschiedlichen Rezeptormolekülen belegt sein können, für die Analyse verschiedener Biomoleküle im Analyten zur Verfügung. Die Referenzmessflächen dienen dabei z. B. einer Temperaturkompensation und damit als Ersatz für eine ansonsten notwendige Temperaturstabilisierung des Sensorelementes.

Weiterhin erfolgt nach einer Aufnahme des Messsignals in TM-Polarisationsrichtung eine Aufnahme des analogen Bildes in TE-Polarisationsrichtung. Dieses enthält keine SPR-Information und ermöglicht damit die Normierung des Messsignals, womit sich eine deutliche Fehlerreduzierung und Erhöhung der Messgenauigkeit ergibt.

Die Erfassung der Messdaten erfolgt automatisiert durch die Steuer- und Auswertesoftware und wird über eine graphische Benutzeroberfläche dargestellt (Abb. 3). Nach dem Start der Datenaufnahme erfolgt die Normierung des Messsignals und daran anschließend die Berechnung der winkelabhängigen Intensitätsprofile für jede Messfläche. Eine Regression dieser Profile mit dem elektrodynamischen Modell des Schichtsystems liefert die Werte für den effektiven Brechungsindex und damit die Massenbelegung der aktiven Rezeptorschicht auf jeder Goldfläche. Daraus kann auf die Konzentration der entsprechenden Ligandenmoleküle im Analyten geschlossen werden. Erfolgt zusätzlich die zeitlich aufgelöste Beobachtung der Bindung, ergeben sich Aussagen über die Reaktionskinetik und damit

die Bindungskonstanten der Reaktionspartner /3/. Eine entsprechende Bindungsreaktion von Immunglobulin G an auf der Sensorfläche immobilisiertem Protein A zeigt Abb. 4.

Die Messung erfolgte an einem Sensorelement mit externer Strahlformung.

Schlussfolgerungen und Ausblick

Das vorgestellte System erlaubt eine einfache und kostengünstige Analyse einer größeren Anzahl verschiedener Biomoleküle, die durch die auf dem Sensorelement immobilisierten Fänger-moleküle bestimmt sind. In einer weiteren Entwicklung des Systems ist die Integration von Lab-on-a-Chip-Strukturen in das Sensorelement geplant /2/. Diese würden z. B. eine Filterung größerer Partikel, gefolgt von einer biochemischen Modifikation des Analyten vor Beginn der Messung und direkt auf dem Sensorelement erlauben. Eine Anzahl von notwendigen Schritten zur Probenvorbereitung wäre damit in den Messablauf integriert und würde eine sichere und schnelle Messung ermöglichen.

Literatur:

- /1/ Homola, J.; Yee, S. S.; Gauglitz, G.: „Surface plasmon Resonance sensors: review“, *Sensors and Actuators B54* (1999) 3–15.
- /2/ Danz, N.; Schäfer, B.; Harz, M.; Büttner, A.; Schreiber, P.: „Anordnung und Verfahren zur optischen Detektion von in Proben enthaltenen chemischen, biochemischen Molekülen und/oder Partikeln“, Deutsche Patentanmeldung 103 24 973.7.
- /3/ Green, R. J.; Frazier, R. A.; Shakesheff, K. M.; Davies, M. C.; Roberts, C. J.; Tendler, S. J. B.: „Surface plasmon resonance analysis of dynamic biological interactions with biomaterials“, *Biomaterials* 21 (2000) 1823–1835.

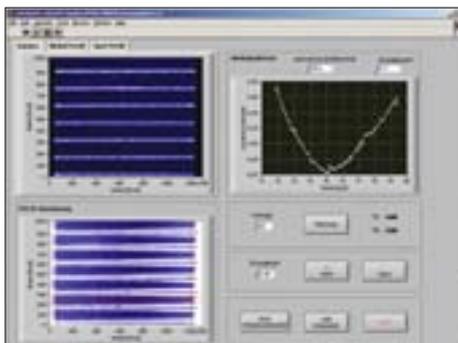


Abb. 3: Graphische Benutzeroberfläche zur Steuerung des Messablaufs sowie zur Auswertung und Darstellung der Ergebnisse.

Fig. 3: Graphical user interface for system control, data analysis and display of the results.

Set up and data analysis

The sensor elements, which have the size of a microscope slide, are coated with a linear arrangement of up to 50 measurement spots. Around 40 of the spots are used for the analysis of different biomolecules in the analyte whereby each spot could be coated with different receptor molecules. The remaining spots are reserved for reference and control measurements. They are used for e. g. temperature control thereby circumventing a hardware temperature stabilization of the sensor element, which would otherwise be necessary.

Furthermore, one image with TM-polarized illumination followed by one image with TE-polarized illumination is taken for each measurement. The TE-image contains no SPR information and is therefore used to normalize the TM-image. This results in a defect reduction and an increase in measurement precision.

The measurement cycle is automated and displayed via the graphical user interface of the control and analysis software (fig. 3). After starting the data acquisition the system normalizes the detected SPR signal followed by a calculation of the angle-dependent intensity profiles for each measuring spot. A regression of this profiles with the electrodynamical model of the system gives the effective refraction index values of the cladding and hence the mass density of the active receptor layer on the gold surface. The concentration of the corresponding ligand molecules in the analyte is calculated from these values. Furthermore, a time-resolved observation of binding kinetics is available thereby providing information about the coupling constants of the reaction partners /3/.

The binding reaction between immunoglobulin G and immobilized protein A is shown in fig. 4. The measurements were taken with a sensor element with external beam shaping.

Conclusion and outlook

The system presented allows for a simple and cost effective analysis of a significant number of different biomolecules by immobilizing different specific capture molecules on each measurement spot. Furthermore, the integration of lab-on-a-chip structures into the sensor element is intended in future system development /2/. This would enable e. g. an on-chip filtration or a biochemical modification of the analyte prior to measurement. The integration of required steps for sample preparation into the measurement system leads to an increased sample throughput and measurement stability.

References:

- /1/ Homola, J.; Yee, S. S.; Gauglitz, G.: „Surface plasmon Resonance sensors: review“, *Sensors and Actuators B54* (1999) 3–15.
- /2/ Danz, N.; Schäfer, B.; Harz, M.; Büttner, A.; Schreiber, P.: „Anordnung und Verfahren zur optischen Detektion von in Proben enthaltenen chemischen, biochemischen Molekülen und/oder Partikeln“, *Deutsche Patentanmeldung* 103 24 973.7.
- /3/ Green, R. J.; Frazier, R. A.; Shakesheff, K. M.; Davies, M. C.; Roberts, C. J.; Tendler, S. J. B.: „Surface plasmon resonance analysis of dynamic biological interactions with biomaterials“, *Biomaterials* 21 (2000) 1823–1835.

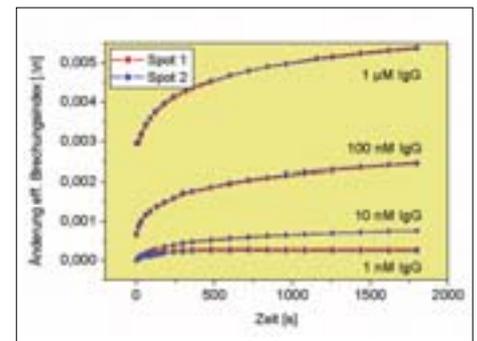


Abb. 4: Reaktionskinetik von humanem Immunglobulin G an immobilisiertem Protein A als Beispiel für eine biochemische Anwendung.

Fig. 4: Binding kinetics of human immunoglobulin G to immobilized protein A as an example of a biochemical application.



Peter Schreiber

Einführung

Optische Sensoren weisen gegenüber elektrischen eine Reihe von Vorteilen wie z. B. Unempfindlichkeit gegen elektromagnetische Störfelder, Potenzialfreiheit und metallfreie Realisierbarkeit auf. Die Detektion von Schallwellen durch optische Abtastung einer Mikrofonmembran ist ein vielversprechendes Einsatzfeld derartiger Sensoren. Um die erforderliche hohe Empfindlichkeit zum Nachweis der Membranauslenkungen im sub-Mikrometerbereich zu erzielen, werden dafür häufig interferometrische Systeme oder singlemode Faserkoppler zur Detektion eingesetzt [1]. Problematisch ist dabei die Verwendung von Laserdioden als Lichtquelle, die auf Grund des Oszillatorauschlags das erzielbare Signal-Rauschverhältnis des Mikrofons begrenzen.

Systemdesign

Ein alternativer Ansatz mit einem konfokalen Defokussensor ermöglicht sowohl den Einsatz einer rauscharmen, lichtemittierenden Diode (LED) als Lichtquelle und die Ankopplung des Sensorkopfs über Multimodefasern als auch die Erzielung einer hinreichenden Wandlungsempfindlichkeit. Dieses Designkonzept wurde im Rahmen eines Projekts mit der Firma Sennheiser electronic entwickelt und als Labormuster realisiert.

In Abb. 1 ist der Aufbau des Mikrofonkopfs schematisch dargestellt. Die Abstrahlung der Sender-Multimodefaser wird von einer asphärischen Linse kollimiert und von dem nachfolgenden Zylinderlinsenarray in einer Reihe von Linienfoki auf die Mikrofonmembran abgebildet. Nach Reflexion an der Membran wird das System in umgekehrter Richtung durchlaufen und das

Licht auf die Empfängerfaser fokussiert. Entsprechend der aktuellen Membranauslenkung ist die Abbildung des Sendefaserkerns auf die Empfängerfaser mehr oder weniger stark defokussiert und damit der Koppelgrad der Anordnung von der Membranposition abhängig. Die Optimierung des optischen Designs erfolgte mit der Raytracing-Software ZEMAX. Die Anwendbarkeit der Strahlverfolgung wurde durch den Vergleich mit Koppelkurven, die durch Freiraum-Wellenpropagation [2] berechnet wurden, bestätigt (Abb. 2). Das Raytracing liefert durch Vernachlässigung von Beugungseffekten in Fokusnähe zu optimistische Werte für den Koppelgrad, im Arbeitspunkt des Mikrofons auf der Flanke der Koppelkurve ist aber eine sehr gute Übereinstimmung beider Verfahren zu verzeichnen.

Bei der Optimierung des Designs sind u. a. folgende Randbedingungen zu beachten:

- Der Luftspalt zwischen Membran und Array sollte 0,2 mm aus akustischen Gründen nicht unterschreiten. Um dennoch eine geringe Arraybrennweite und damit hohe Empfindlichkeit zu erzielen, benötigt man Arrays, deren konvexe Seite zum Fokus orientiert ist. Das wiederum macht den Einsatz stark asphärischer Arrays erforderlich.
- Da die Mikrofonempfindlichkeit proportional zur numerischen Apertur des Arrays ist, ist eine möglichst hohe NA anzustreben. Zu große Werte über 0,5 sind aber wegen der dann zu flachen Austrittswinkel aus der konvexen Linsenfläche und den damit verbundenen Fresnelverlusten nicht sinnvoll.

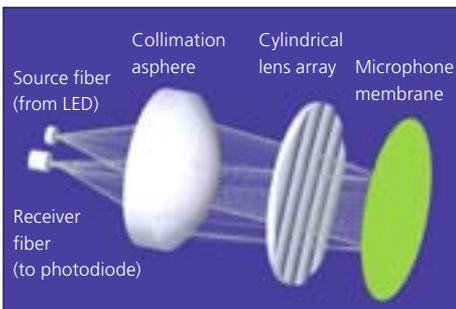


Abb. 1: Optikschemata des Mikrofonkopfs.

Fig. 1: Optics scheme of the microphone head.

Optical microphone

Peter Schreiber, Sergey Kudaev, Ralf Rosenberger, Peter Dannberg, Bernd Höfer

Introduction

Optical sensors exhibit a variety of advantages compared to electrical sensors, they are insensitive with respect to electromagnetic influences, metal-free and electrically isolated. The detection of acoustic waves through measurement of optical displacement of a microphone membrane is a promising field of application for such sensors. To achieve the high level of sensitivity required for distance sensing of the membrane in the sub-micron range, interferometric systems or single-mode fiber-coupling schemes are usually employed /1/. For these types of systems the use of laser diodes as light source limits the achievable signal to noise ratio because of the oscillator noise of the laser.

System design

An alternative approach employing a confocal defocus sensor provides sufficient sensitivity and enables the use of a less noisy light-emitting diode (LED) coupled by a multimode fiber as light source. This design concept was developed and constructed as a laboratory demonstrator in collaboration with the company Sennheiser electronic.

In Fig. 1 the set-up is shown schematically. The light emitted by the transmitter fiber is collimated by an aspheric lens and then focused by a cylindrical lens array into a set of line-foci onto the membrane. After reflection, the light is propagated back through the system and is focused on the core of the receiver fiber. According to the actual axial position of the membrane, the

image is more or less defocused and thus the coupling efficiency of the system depends on the membrane displacement. The optimization of the system layout is carried out with the raytracing software ZEMAX. The applicability of raytracing is verified by a comparison of coupling curves calculated by raytracing and free-space wave propagation (Fig. 2) /2/. Raytracing fails near focus, because in this region effects of diffraction control the spot size. However at the sensor's operating point, at maximum steepness of the curve, both calculations agree well.

For the optimization of the system the following constraints must be considered:

- The air-gap between membrane and array should not be less than 0.2 mm from acoustic considerations. To achieve a short focal width of the array regardless of that constraint, planoconvex arrays, which have their curved side oriented towards the focus, are required. To realize such arrays aspheric lens surfaces are necessary.
- Because microphone sensitivity is proportional to the numerical aperture (NA) of the array, a high NA is desirable. An array-NA exceeding 0.5 is too large and must be avoided, because in such a case large ray exit angles from the curved array surface occur causing increased Fresnel losses.



Sergey Kudaev



Ralf Rosenberger



Peter Dannberg



Bernd Höfer

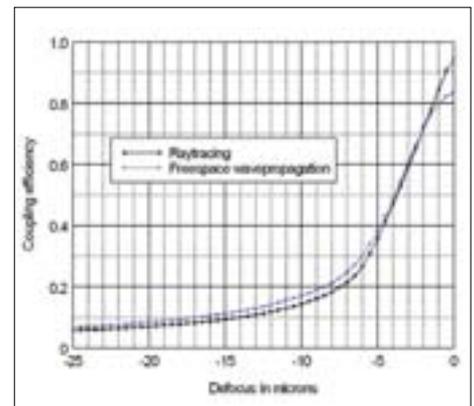


Abb. 2: Koppelgrad eines Systems mit 100 μm -Faser in Abhängigkeit von der Membranauslenkung, berechnet mittels Raytracing und Freiraum-Wellenpropagation.

Fig. 2: Coupling efficiency dependence from membrane displacement for a system with 100 μm -fiber, calculated by raytracing and free-space wave propagation.

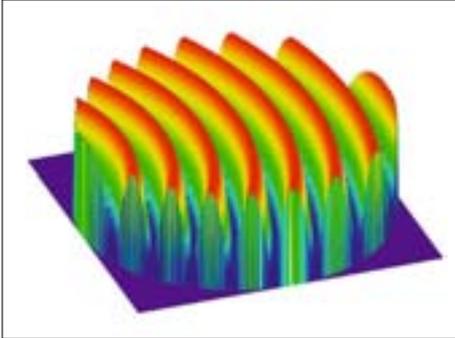


Abb. 3: ZEMAX user-defined surface für SPDT-Zylinderlinsenarray (nicht maßstäblich).

Fig. 3: ZEMAX user-defined surface for SPDT-manufactured cylindrical lens array modeling (not to scale).



Abb. 4: Konstruktion des Labormusters des optischen Mikrofons.

Fig. 4: Construction of optical microphone laboratory demonstrator.



Abb. 5: Montiertes optisches Mikrofon und Mikrophonkapsel mit Array und aufgeklebter Membran (vorn rechts).

Fig. 5: Assembled optical microphone and microphone cartridge with lens array and glued membrane (front right).

Die Erfüllung beider Bedingungen ermöglicht der Einsatz von abgeformten Zylinderlinsenarrays, deren Master durch single-point diamond turning (SPDT) hergestellt wurden /3/. Ein Nachteil derartiger Arrays ist die prozessbedingte Krümmung der Zylinderlinslets senkrecht zum Linsenprofil (Abb. 3). Der Einfluss dieser Krümmung und die Auswirkungen der Totzonen des Arrays auf die Sensorsteilheit wurden durch Raytracing-Simulationen untersucht. Für die vorliegende Designvariante ist mit einer tolerierbaren Verschlechterung der Empfindlichkeit um nur wenige Prozent zu rechnen.

Realisierung

Ein Labormuster des optischen Mikrofons wurde mit 200 µm-Multimodefasern, einer Geltech-Kollimationsasphäre mit 8 mm Brennweite und einem asphärischen Zylinderlinsenarray mit Brennweite 0,2 mm und pitch 0,15 mm, entsprechend einer NA von 0,35, aufgebaut (Abb. 4, 5). Das Array wurde von einem mittels SPDT in Kupfer erzeugten Master abgeformt /3/. Die Abformung erfolgte durch Reaktionsguss eines UV-härtenden Polymers auf Floatglassubstrat /4/. Abb. 6 zeigt die mit einem Planspiegel als Membranmodell gemessene Abstandskennlinie des Labordemonstrators, verglichen mit der Raytracing-Simulation.

Bei der Assemblierung der Komponenten ist besondere Sorgfalt auf die parallele Montage der Mikrofonmembran relativ zum Linsenarray zu verwenden. Um die erforderliche Präzision in der Größenordnung einer Bogenminute zu erzielen, wurde die auf einem Metallring aufgezugene Membran unter aktiver Justage auf dem Arrayträger durch UV-Kleben fixiert. Die Reproduzierbarkeit dieser Technologie konnte durch die Realisierung mehrerer Mikrophonkapseln

nachgewiesen werden. Erste akustische Charakterisierungen des Mikrofons bei der Fa. Sennheiser zeigen mit einfachen Kondensatormikrofonen vergleichbare akustische Eigenschaften (Abb. 7).

Zusammenfassung

Ein konfokales optisches Mikrofon wurde durch Designrechnungen optimiert und als Labordemonstrator realisiert. Die Charakterisierung des Systems zeigte eine gute Übereinstimmung zwischen den berechneten und gemessenen Werten. Das Sensorprinzip ist in unterschiedlichen Ausführungsformen vielfältig für Abstandsmessungen auch in anderen Bereichen, wie z. B. Maschinen- oder Automobilbau, einsetzbar.

Dank

Diese Arbeit wurde im Rahmen des Projekts „Optisches Mikrofon“ der Landesinitiative Mikrosystemtechnik Niedersachsen gefördert. Die Verfasser danken den Mitarbeitern der Fa. Sennheiser electronic für die konstruktive und anregende Zusammenarbeit.

Literatur:

- /1/ Garthe, D.: „Faser- und integriert-optische Mikrofone auf der Basis intensitätsmodulierender Membranabtastung“, VDI Fortschrittsberichte, Reihe 10: Informatik/Kommunikationstechnik Nr. 214 (1992).
- /2/ Duparré, J.; Göring, R.: „Numerical wave analysis of microlens array telescopes and comparison with experimental results“, Appl. Opt. 43 (2003) 3992.
- /3/ Gebhardt, A.; Steinkopf, R.: „Diamant-drehen mikrooptischer Strukturen“, Fraunhofer IOF, Jahresbericht 2003.
- /4/ Dannberg, P.; Mann, G.; Wagner, L.; Bräuer, A.: „Polymer UV-molding for micro-optical systems and O/E-integration“, Proc. SPIE 4179 (2000) 137.

Both conditions can be met by using cylindrical lens arrays replicated from master structures manufactured by single-point diamond turning (SPDT) /3/. One drawback of such arrays is the curvature perpendicular to the lens profile, resulting from the diamond turning process. The influence of that curvature and the array fill factor were simulated by raytracing calculations. For the current design, a tolerable degradation of only a few percent was observed.

Realization

A laboratory demonstrator of the optical microphone was realized using 200 μm multimode fibers, a Geltech asphere with an 8 mm focal width and an aspheric cylindrical lens array with a 0.2 mm focal width and 0.15 mm pitch according to an NA of 0.35 (Fig. 4, 5). The array was replicated from a copper master fabricated by SPDT /3/. The replication process was carried out by UV-molding of a polymer onto a float-glass substrate /4/. Fig. 6 shows the sensor curve recorded with a plane mirror as a membrane model compared to the raytracing simulations.

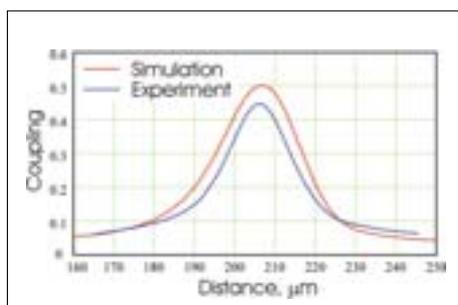


Abb. 6:
Sensorkennlinie, berechnet und gemessen.

Fig. 6:
Calculated and measured sensor characteristics.

During system assembly special attention has to be paid to parallel adjustment of the microphone membrane with respect to the lens array surface. To meet the required precision, which is in the range of one arc minute, the membrane attached to a mounting ring was fixed on the array carrier by UV-curing with active alignment. The reproducibility of that process was proven by successfully mounting a number of microphone cartridges. Initial acoustic characterization of the microphone exhibited properties comparable to simple condenser microphones (Fig 7).

Summary

A confocal optical microphone was optimized by design calculations and constructed as a laboratory demonstrator. Characterization of the system showed good agreement between calculated and measured parameters. The sensor principle is appropriate for a wide variety of applications regarding distance measurement, for instance in engine building and in the car manufacturing industry.

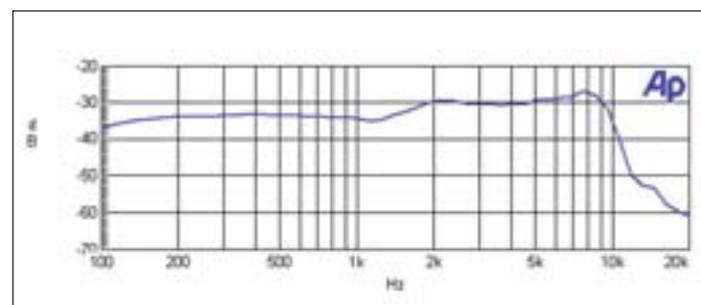


Abb. 7:
Frequenzgang des optischen Mikrofons.

Fig. 7:
Measured frequency response of the optical microphone.

Acknowledgement

This work was sponsored as part of the project „Optisches Mikrofon“ of the Landesinitiative Mikrosystemtechnik Niedersachsen. The authors wish to thank their colleagues from Sennheiser electronic for their constructive and stimulating cooperation.

References:

- /1/ Garthe, D.: „Faser- und integriert-optische Mikrofone auf der Basis intensitätsmodulierender Membranabtastung“, VDI Fortschrittsberichte, Reihe 10: Informatik/Kommunikationstechnik Nr. 214 (1992).
- /2/ Duparré, J.; Göring, R.: „Numerical wave analysis of microlens array telescopes and comparison with experimental results“, Appl. Opt. 43 (2003) 3992.
- /3/ Gebhardt, A.; Steinkopf, R.: „Diamond turning of micro-optical structures“, Fraunhofer IOF, Annual report 2003.
- /4/ Dannberg, P.; Mann, G.; Wagner, L.; Bräuer, A.: „Polymer UV-molding for micro-optical systems and O/E-integration“, Proc. SPIE 4179 (2000) 137.

Mechanik und Optik vereint – Langzeitarchivierung von farbigen Bildern auf Mikrofilm

Stefan Risse, Sandra Müller, Michael Thaut, Gerd Harnisch, Michael Thomas¹, Aleksander Wlodarski², Daniel Fluck³
MikroPicture GmbH, ¹Jenoptik LOS GmbH, ²Präzisionsoptik Gera GmbH, ³Fluck engineering GmbH



Stefan Risse

Einführung

In der Gegenwart und Zukunft werden durch die rasche Vermehrung der Datenmengen Konzepte für die Speicherung und Archivierung großer Datenmengen gefordert. Während in den vergangenen Jahrzehnten die magnetische Speicherung auf Disketten und Bandlaufwerken als fortschrittlich galt, werden heute elektronische Daten fast ausschließlich auf Festplatten oder auf optischem Weg (CD oder DVD) gespeichert /1/. Ein kleinerer Teil dieses weltweit riesigen Marktes ist der Markt für die Datenlangzeitarchivierung von Bildmaterial und elektronischen Daten. Beispiele können Krankenhaus-, Wissenschafts-, Konstruktionsunterlagen oder kunsthistorische Meisterwerke sein.

Eine neue und gleichzeitig altbekannte Variante für die Langzeitarchivierung ist die Analogspeicherung großer Datenmengen auf Mikrofilmen. Dieses Medium ist stets wiederlesbar, kompatibel, zukünftig mittels Scanner rücklesbar, vor Datenverlust und -manipulation sicher und vergleichsweise preiswert.

Im hier vorgestellten Projekt **LASER_COM (Laser computer output on microfilm)** wurden die Grundlagen für eine Langzeitdatensicherung und -archivierung (größer 50 Jahre) auf Filmmaterial mit RGB-Laserquellen untersucht.

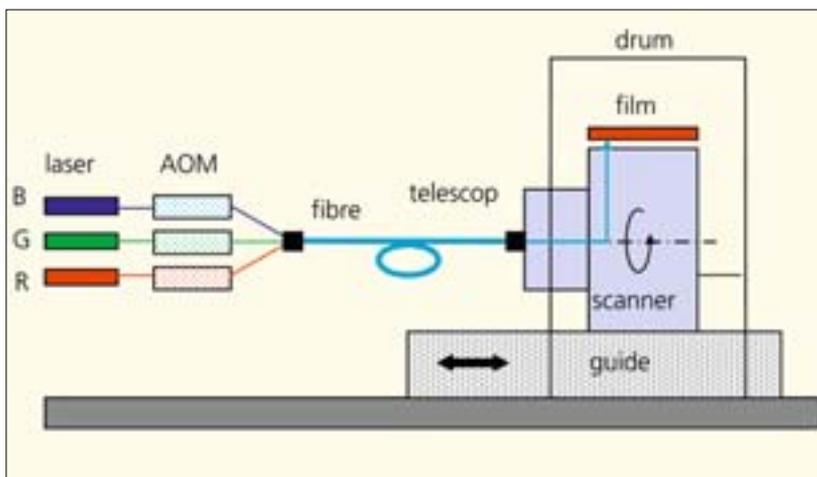
Konzeption

Die Konzeption basiert auf einer patentierten Idee der Firma MikroPicture GmbH (Abb. 1) mit der Zielstellung einer Auflösung von rund 7.700 dpi in Farbe. Die Herausforderung lag dabei in der Entwicklung und Charakterisierung von optischen und mechanischen Modulen, die eine Langzeitarchivierung farbkorrekt mit einem pixelgenauen Bildaufbau im 3,3 µm Raster ermöglichen.

Gelöst wurde diese Aufgabe durch eine Kombination aus Optik- und Mechanikentwicklung, die erstmalig ein Direktschreiben mit RGB-Lasern auf Mikrofilm auf das Format 105 mm x 148 mm erlaubt.

Abb. 1:
Prinzip der Filmbelichtung.

Fig. 1:
Principle of film exposure.



Mechanics and Optics united – long time archival storage of colored pictures on microfilms

Stefan Risse, Sandra Müller, Michael Thaut, Gerd Harnisch, Michael Thomas¹, Aleksander Wlodarski², Daniel Fluck³
MikroPicture GmbH, ¹Jenoptik LOS GmbH, ²Präzisionsoptik Gera GmbH, ³Fluck engineering GmbH

Introduction

There is now and will continue to be an ever increasing demand for archival data storage systems in response to the coincidentally increasing rate of data production. During the last few decades magnetic storage on floppy disks and tape drives was considered progressive but today data is saved nearly exclusively on hard disks or in an optical way (CD or DVD) /1/. A small part of the gigantic, worldwide market demands the long-term data storage of pictures, conventional files and electronic data. Examples are medical data, scientific data, engineering data or historical works of art.

A new method for long-term archival storage of data utilizes the long-established analogue method and stores data at a high density on microfilm. This film is always re-readable (in the future by scanner), compatible, proof against data loss and data abuse and, in comparison to other methods, good value.

In the project **LASER_COM (Laser computer output on microfilm)** the basics of long-term data storage and archiving (over 50 year storage) on film materials by using RGB-Laser sources are investigated.

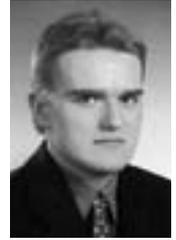
Concept

The concept is based on a patent idea from the MikroPicture GmbH Company (fig.1) the aim of which is to achieve a resolution of 7700 dpi in color. The challenge was the development and characterization of optical and mechanical modules to facilitate long-term storage of images which are faithfully colored and assembled of pixels in a 3.3 µm raster.

The task was completed by using a combination of optical- and mechanical engineering, which resulted in the direct writing of information by RGB-Laser onto microfilm with a format of 105 mm x 148 mm in the first instance.



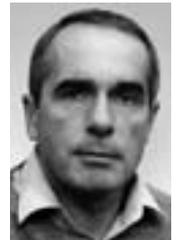
Sandra Müller



Michael Thaut



Gerd Harnisch



Michael Thomas



Aleksander Wlodarski



Daniel Fluck

Hauptkomponenten der Versuchsanlage im Labormaßstab sind das von der Jenoptik LOS GmbH in Zusammenarbeit mit der Firma Fluck engineering entwickelte Lasermodul mit Elektronik (Abb. 2) und das vom IOF und POG GmbH entwickelte Mechanikmodul mit integrierten optischen Baugruppen zur Strahlformung (Abb. 3). Beide Module werden örtlich getrennt über eine optische Faser verbunden. Die elektronisch aufbereitete Bildinformation wird synchronisiert an das Speichermedium Film übertragen. Fragen zur Datenaufbereitung, Farbkalibrierung und zum Filmmanagement wurden durch die MikroPicture GmbH bearbeitet und ermöglichen so eine farbkorrekte Belichtung.

Lasermodul

Die Erzeugung des Laserlichtes erfolgt über zwei Helium-Neon-Laser mit einer Wellenlänge von 632,8 nm (rot) bzw. 543 nm (grün) und einem Argon-Laser, der Licht der Wellenlänge 457,9 nm (blau) emittiert. Die Ausgangsleistung der Laser sind 2 mW weißes Licht. Dieses RGB-Lasersystem arbeitet frequenz- und amplitudenstabil im Bereich $\pm 1,5\%$.

Die Modulation erfolgt über akusto-optische Modulatoren in den einzelnen Farbkanälen. Diese AOM's sorgen für eine Intensitätsregelung und für die Anpassung der notwendigen Schaltfrequenz in Bezug zum Bildaufbau der Scannerbaugruppe. Zur Strahlformung (Aufweitung und Fokussierung) sind optische Bauelemente integriert. Die elektronisch aufbereitete digitale Bildinformation wird über einen Treiber an die akusto-optischen Modulatoren übertragen. Damit wird die Synchronisation zur Mechanik gesichert und sorgt für die zeitgleiche Ansteuerung der drei Farben. Die Farbmischung erfolgt gemäß der Farbkalibrierung in den jeweiligen spezifischen Farbanteilen und in der benötigten Intensität. Die Zusammenführung der einzelnen Farbkanäle wird über Prismenbaugruppen realisiert. Der gemischte Laserstrahl wird zur Weiterleitung des Lichtes zum Mechanikmodul in eine Monomodefaser eingekoppelt. In Abb. 2 ist das optische Prinzip des Lasermoduls (grün) und des Mechanikmoduls (rot) vereinfacht für einen Laser dargestellt.

Mechanikmodul mit Strahlformungsoptik

Die gleichmäßige Belichtung des Filmmaterials erfordert präzise mechanische Bewegungsachsen. Der Bildaufbau erfolgt über eine luftgelagerte Führung (y-Achse) und einen luftgelagerten Rotationsscanner (ϕ -Achse) mit einem integrierten optischen System zur Übertragung der RGB-Laserimpulse auf den Film. Abb. 3 zeigt das Mechanikmodul als CAD-Modell.

Die Bildinformation wird durch die Monomodefaser zentral in den Rotationsscanner eingekoppelt. Über eine Prismenbaugruppe wird das Laserlicht einer filmnahen Fokussieroptik zugeführt. Dabei erfolgt im optischen System eine Transformation der Faserapertur, die typisch 0,12 beträgt und eine Punktgröße von 3...4 μm in der Filmebene realisiert. Das entspricht einer bildseitigen Apertur von 0,2. Der Bereich der Tiefenschärfe beträgt dabei nur 15 μm . Der Fokus wird über ein piezoelektrisches Trackingsystem auf das jeweilige Filmmaterial voreingestellt. Funktionsbedingt rotiert die Fokussieroptik satellitenartig um die Rotationsachse und ist Fliehkräften ausgesetzt.

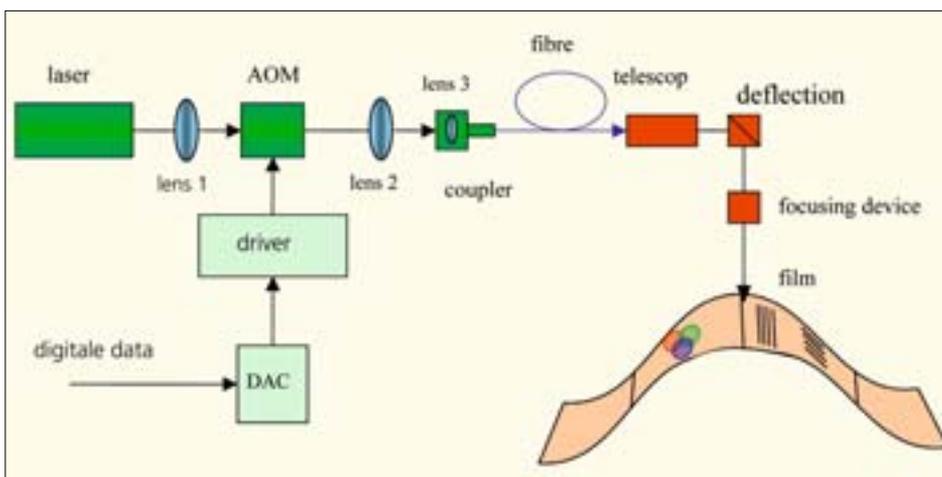


Abb. 2:
Optikkonzept des Lasermoduls (grün)
und des Mechanikmoduls (rot).

Fig. 2:
Optical concept of laser
module (green) and
mechanical
module (red).

The main components of the experimental system are: the laser module including electronic devices, developed in cooperation between JENOPTIK LOS GmbH and the Fluck engineering company (fig. 2) and the mechanical module with an integrated optical device for beam shaping (fig. 3) developed in cooperation between IOF and POG Gera GmbH. The modules are connected by an optical fiber but are otherwise physically separate. The electronically processed picture information is synchronously transmitted to the film. Otherwise questions of data preparation, color calibration and film management are worked out by Mikro-Picture GmbH to produce faithfully colored images.

Laser module

The laser light is generated by a Helium-Neon-Laser at a wavelength of 632.8 nm (red) and 543 nm (green) respectively, and an Argon-Laser which emits light at a wavelength of

457.9 nm (blue). The output power of the lasers is 2 mW white light. This RGB-Laser system works at a frequency and amplitude stability of $\pm 1.5\%$.

The modulation proceeds by acoustic-optical modulators (AOM's) in each single color channel. The AOM's are responsible for regulating the intensity and for the necessary adjustments to the frequency with reference to the picture built up by the scanner device. For beam focusing and expanding, optical components are integrated. The electronically prepared digital picture information is transmitted to the AOM's. Thereby synchronization with the mechanical components, and therefore simultaneous activation of the three colors, is ensured. Color mixing is performed with several specific color portions of the required intensity according to the color calibration. The mixed laser beam is coupled onto a single mode fiber which is responsible for leading the light to the mechanical module. Fig. 2 shows the optical concept for one channel of the laser module (green) and the mechanical module (red).

Mechanical module including beam shaping optical device

Constant exposure of the film material requires a precisely mechanical axes. The picture is built up with an air-bedded guide (y-axis) and an air-bedded rotating scanner device (ϕ -axis) with an integrated optical system for leading the RGB-Laser impulse to the film. The mechanical module is shown in fig. 3.

The picture information is put in the center of the rotating scanner device through a single mode fiber. The laser light then passes a prism device and is lead to a focusing optical component close to the film. Therefore a transformation of the fiber aperture (typically 0.12) and a spot size of 3–4 μm on the film plane are realized by this optical system. This corresponds to a picture side aperture of 0.2. The field of focusing depth here is only 15 μm . A piezo-electronic tracking system adjusts the focus. The component for focusing rotates under centrifugal force like a satellite around the rotation axis.

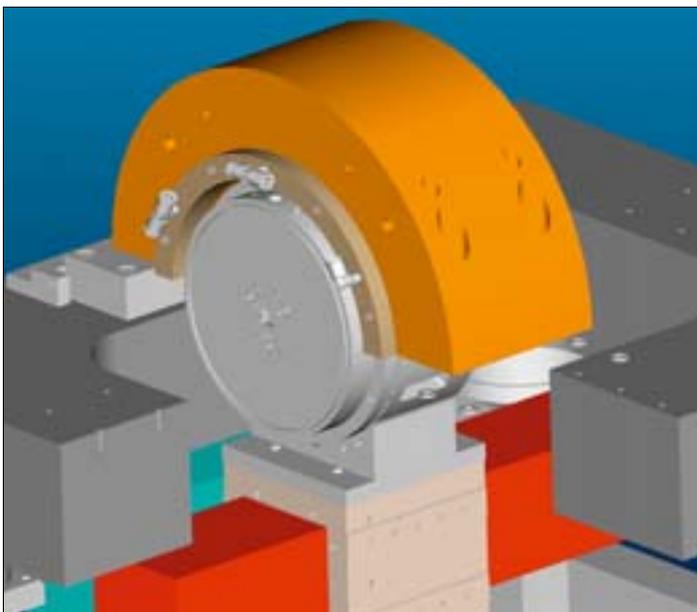


Abb. 3:
CAD-Modell des Mechanikmoduls.

Fig. 3:
CAD-model of mechanical module.

Um eine exakte Belichtung zu realisieren wurde ein neuartiger Rotations-scanner (Abb. 4 und 5) auf Basis eines plan-sphärischen Luftlagers entwickelt (Abb. 6). Als Lagerwerkstoff wurde Glaskeramik mit minimaler thermischer Längendehnung eingesetzt /2/. Die Anwendung klassischer Verfahren der Optikbearbeitung (analog zur Fertigung von Linsen) wurde zur Herstellung der Luftlagerkomponenten genutzt. Die Qualität der so gefertigten planen und sphärischen Lagerflächen entspricht der optischer Bauteile. Die geringe Rauheit und die hohe Formgenauigkeit garantieren, bei Einhaltung des Lagerspaltes, Luftlager mit exakten Laufeigenschaften /3/.

Das gewählte Lagerprinzip ermöglicht die gleichzeitige Aufnahme axialer und radialer Kräfte. Der Effekt der Selbstzentrierung des sphärischen Luftlagers stabilisiert die Baugruppe während der Rotation. Durch ein mehrstufiges Wuchtverfahren wurde die Ur-Unwucht des Rotationsscanners auf eine Größe von kleiner 5 mg absolut reduziert. Angetrieben wird die Baugruppe durch einen direktgekoppelten DC-Antrieb. Die Rund- und Planlauffehler sphärischer Luftlager aus Glas oder Glaskeramik sind kleiner als 50 nm /3/.

Eine luftgelagerte Translationsachse der Firma KUGLER GmbH trägt den Rotationsscanner. Die Bewegung ist gleichförmig und sorgt so für den zweidimensionalen Bildaufbau. Als Antrieb wurde hier ein Reibantrieb der Firma NANOMOTION eingesetzt.

Der zu belichtende Film wird in einer tunnelartigen Trommel über einen Unterdruck-Chuck fixiert. Die mit Ultrapazisionsverfahren hergestellte Trommel hat eine Formabweichung von kleiner 3 μm und definiert die Ablage des Films in Bezug zur rotierenden Belichtungsoptik.

Zusammenfassung

Im Labormaßstab wurden die ersten Mikrofilme erfolgreich belichtet (Abb. 7a).

Zur Zeit wird mit einer Frequenz von 30 Hz gearbeitet. In Testbelichtungen wurde die Auflösung von 3,3 μm Pixelgröße untersucht. An einem ausbelichteten Gitter wurde diese Auflösung nachgewiesen (Abb. 7b). Eine Untersuchung der 150 Linienpaare an einem Lichtmikroskop ergab eine Abweichung von kleiner 2 %.

Die Belichtung von Bilddaten zeigte eine hohe Farbqualität.

Die nächsten Arbeitsschritte sind das Steigern der Belichtungsfrequenz und weitere Untersuchungen z. B. zur Stabilität der Belichtung.

Mit dem vorliegenden Experimental-aufbau steht erstmalig eine Mikro-filmbelichtungsanlage mit RGB-Laserquellen zur Verfügung (Abb. 8). Die Überführung der Technik in ein markt-fähiges Produkt wird durch die Industriepartner betrieben. Bereits im nächsten Jahr soll ein erster Prototyp aufgebaut werden.

Danksagung

Das Projekt LASER_COM wurde unter dem Förderkennzeichen B 509-02001 durch das Thüringer Ministerium für Wissenschaft, Forschung und Kunst, Erfurt, gefördert.

Literatur:

- /1/ Client Server Computing IT 03/2001, S. 62 ff
- /2/ Risse, S.: „Präzisionslager aus Glaskeramik“, Dezember 1997; S.114–115.
- /3/ Risse, S.: „Ein Beitrag zur Entwicklung eines doppelsphärischen Luftlagers aus Glaskeramik“, Dissertation; Technische Universität Ilmenau; 2001.

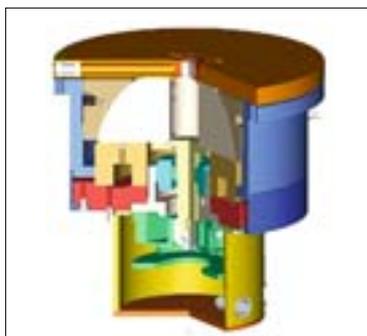


Abb. 4:
Modell des Rotationsscanners mit
Strahlformungsoptik.

Fig. 4:
Model of rotation scanner with beam
shaping optical device.



Abb. 5:
Rotationsscanner zur Strahlableitung.

Fig. 5:
Rotation scanner for beam deflection.



Abb. 6:
Aerostatisches plan-sphärisches Lager.

Fig. 6:
Aerostatic plan-spherical bearing.

To ensure an accurate exposure a new rotation scanner (fig. 4 and 5) was developed on the basis of a plane spherical air bearing (fig. 6). A glass ceramic with low thermal expansion is used as material /2/.

The application of glass or glass ceramic allows the manufacture of plane and spherical bearings with outstanding properties by using production methods and assembly technologies from the optics industry. The quality of the produced plane and spherical bearing surfaces is equal to the quality of optical lenses. The small roughness and the precise geometrical accuracy guarantee precise rotation quality on condition that the distance between the rotor and the stator bearing surfaces is adjusted /3/.

The bearing principle is able to admit axial forces as well as radial forces. The effect of self-centering stabilizes the spherical air bearing during the rotation. By balancing the rotation scanner in several steps any unbalance is reduced to less than 5 mg absolute. The movement is powered by a direct DC-drive. The rotation accuracy and the wobble is better than 50 nm /3/.

The rotation scanner is carried by an air guide, which is manufactured by the company KUGLER GmbH. The drive here is a friction drive from the NANOMOTION Company. The movement is uniform and responsible for the two-dimensional picture built up.

The film which is to be exposed is clamped in a drum like a tunnel and is fixed by a vacuum chuck. The film drum is made by an ultra-precision technique (single diamond turning) and achieves geometrical accuracy of cylinder better than 3 μm . It defines the position of the film with reference to the rotating exposure optic.

Summary

The first microfilms were exposed successfully (fig. 7a). At the moment a rotation frequency of 30 Hz is used. The resolution of the pixel size 3.3 μm is proved. Analysis of the 150 pairs of lines with a microscope shows a deviation of less than 2 % (fig. 7b). The exposure of picture data achieved high color quality.

The next steps are the increase of the exposure frequency and further investigations into, for example, the stability of the process.

The test bench system shown in fig. 8 is the first system to expose microfilm by using RGB-Laser sources. The transfer of this new technology to the worldwide market will be realized by our industrial partners. By next year the first prototype should already be set up.

Acknowledgment

This work was supported under contract no. B 509-02001 by the Thuringia's ministry of science, research and the arts, Erfurt.

References:

- /1/ Client Server Computing IT 03/2001, S. 62 ff.
- /2/ Risse, S.: „Präzisionslager aus Glaskeramik“ Dezember 1997, S.114–115.
- /3/ Risse, S.: „Ein Beitrag zur Entwicklung eines doppelsphärischen Luftlagers aus Glaskeramik“. Dissertation; Technische Universität Ilmenau; 2001.

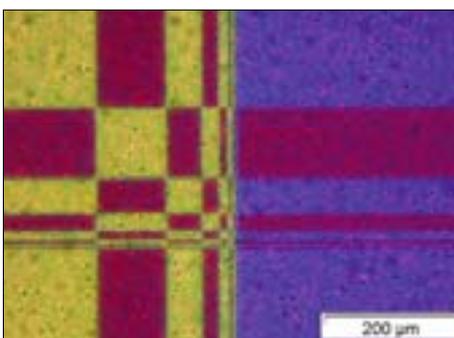


Abb. 7a:
Belichtetes Muster auf einem Mikrofilm.

Fig. 7a:
Exposed pattern on microfilm.

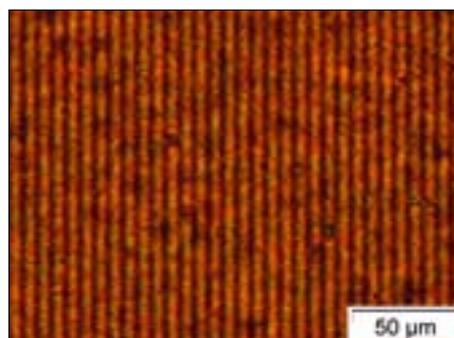


Abb. 7b:
Nachweis der Auflösung an einem ausbelichteten Gitter.

Fig. 7b:
Exposed line pattern with pixel size.



Abb. 8:
Experimentalaufbau des Filmbelichters.

Fig. 8:
Test bench system of film exposure tool.

Kuppelprojektor

Stefan Riehemann, Martin Palme, Gerd Harnisch, Gunther Notni



Stefan Riehemann

Einleitung

In vielen Applikationen ist die Projektion von Bilddaten in eine Halbkugel notwendig, wie zum Beispiel bei (Flug-) Simulatoren, Planetarien oder ophthalmologischen Untersuchungsgeräten. Aktuelle Anordnungen hierfür sind High-End-Systeme im Hochpreissegment, meistens basierend auf Rückprojektion mit bis zu 60 einzelnen Display-Projektoren /1/ oder Laser-Frontprojektion mit mehreren Projektoren /2/. Diese komplexen Systeme erfordern zwar nur Optiken mittlerer Qualität, ein perfektes Bild hinsichtlich Verzeichnungsfreiheit und Bildhomogenität muss aber über sehr leistungsfähige Rechentechnik aus den einzelnen, projizierten Segmenten elektronisch zusammengesetzt und angepasst werden.

Wir haben einen Kuppelprojektor mittels Frontprojektion realisiert /3/, welcher mit einem einzigen Projektor auskommt. Dieses System wurde für den Einsatz in kleinen Halbkugeln (Durchmesser 60–100 cm) der ophthalmologischen Diagnostik konzipiert. Das Hauptziel dieser Systementwicklung war es, einen 160° Kuppelprojektor mit einer hochwertigen Optik, aber einem Standard Video-Eingangssignal (24 bit Vollfarbe vom PC) zu realisieren.

Systemrealisierung und Spezifikationen

Vor der Realisierung eines Kuppelprojektionssystems für die ophthalmologische Diagnostik mussten in der Planungsphase einige aus der Anwendung resultierende technische und optische Randbedingungen berücksichtigt werden:

- Projektion in eine Halbkugel, Raumwinkelbereich mindestens $\pm 80^\circ$,
- Echtfarbenprojektion (24 bit Farbraum) mit hoher Leuchtdichte notwendig,
- keine sequentielle Farbgenerierung erlaubt (über Farbrad oder ähnliches).

Dome projector

Stefan Riehemann, Martin Palme, Gerd Harnisch, Gunther Notni

Introduction

Dome projection is required for a wide variety of applications, such as (flight) simulators, planetariums, and ophthalmologic diagnostics. Recent systems for simulation domes are high-end and high-cost solutions based on multiple rear projection displays (up to 60 projectors, /1/) or laser front projection with multiple projectors /2/. These complex systems require only medium quality optics, but very high performance image processing equipment to ensure that the image is perfectly matched and to generate a uniform image quality.

We developed a front projection dome display /3/ with only one projector, mainly designed for small spheres in ophthalmologic diagnostics (diameter 60–100 cm). The purpose of this system is to generate a 160° dome projection with full color video input from a standard PC and high quality projection optics.

System realization and specifications

For the completion of a dome projection system for ophthalmologic diagnostics, some technical and optical restrictions must be taken into account. These constraints had to be considered while realizing this projection system:

- projection inside a dome of at least $\pm 80^\circ$
- full color, high brightness projection necessary
- no sequential color processing allowed (with color wheel or something similar)



Martin Palme



Gerd Harnisch



Gunther Notni

Entsprechend diesen Systemanforderungen wurde ein entsprechendes Projektionssystem realisiert. Ein Ultra-Weitwinkelobjektiv realisiert die $\pm 80^\circ$ Kuppelprojektion, ein 3-Chip LCoS-Projektor mit farbteilender Polarisationsoptik die Farbprojektion. Das Layout des vollständigen optischen Systems ist in Abb. 1 zu sehen, der Abbildungsstrahlengang des blauen Farbkanals in Abb. 2. Die Projektion realisiert hierbei auf der Objektseite (LCoS-Display) einen quasi telezentrischen Strahlengang. Vor jedem LCoS-Display ist zudem eine Feldlinse platziert. Im Weitwinkelobjektiv ist eine 90° Strahlumlenkung eingefügt, um die beste Projektionsposition im Gesamtgerät zu erzielen. Ein zusätzlicher Aspekt des Systemdesigns war die Realisierung einer hohen Modularität, um einzelne Komponenten des Systems gegen neue, leistungsfähigere Entwicklungen leicht austauschen zu können.

Die Leistungsdaten des neu entwickelten Kuppelprojektionssystems können wie folgt zusammengefasst werden:

- Beleuchtungsstärke im projizierten Bild ca. 800 lx (Lichtstrom ca. 500 lm),
- Homogenität der Bestrahlungsstärke im projizierten Bild $> 75\%$,
- laterale chromatische Aberration $< 200\ \mu\text{m}$ ($< 1/4$ der projizierten Pixelgröße),
- optische Auflösung (spot size) $< 280\ \mu\text{m}$ ($< 1/4$ der projizierten Pixelgröße), Modulationstransferfunktion $> 70\%$ absolut für alle Raumfrequenzen bis hinunter zur Pixelgröße im ganzen Kuppelbereich (siehe Abb. 3).

Da dieses Projektionssystem etliche aus der Anwendung resultierende optische und geometrische Vorgaben erfüllen muss, können die Leistungsdaten nicht 1:1 mit denen kommerziell erhältlicher Multimedia-Beamer verglichen werden, da diese die Randbedingungen nicht erfüllen.

Abb. 1:
160° Kuppelprojektor mit einer 3-Display LCoS Farbprojektionseinheit: prinzipielles Layout der Optik des Projektors.

Fig. 1:
160° sphere projector with 3-chip LCoS color projection: principle layout of the projectors optic.

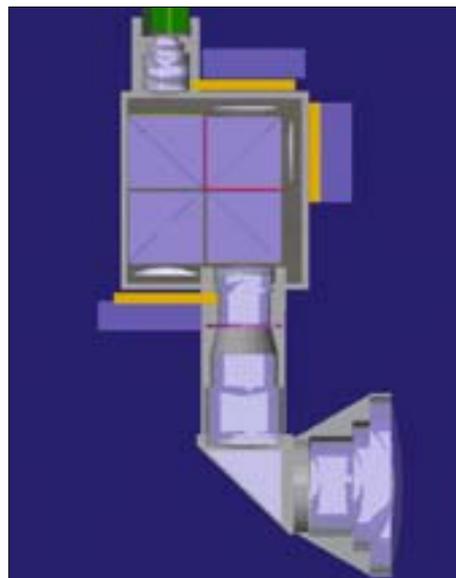
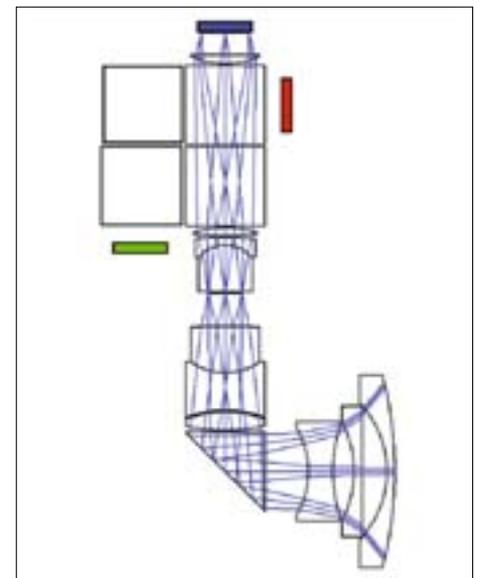


Abb. 2:
160° Kuppelprojektor mit einer 3-Display LCoS Farbprojektionseinheit: Abbildungsstrahlengang für den blauen Farbkanal.

Fig. 2:
160° sphere projector with 3-chip LCoS color projection: imaging ray trace for the blue channel.



According to these system requirements, a projection system was realized. An ultra wide-angle projection lens achieves the $\pm 80^\circ$ dome projection. A three-chip LCoS projector and color splitting polarization optics perform full color projection. The complete optical system is schematically plotted in Fig. 1.

Fig. 2 outlines the imaging ray trace from the blue channel. As can be seen, the projection lens produces a quasi-telecentric ray trace on the LCoS side. In front of the LCoS display, a field lens is placed. A 90° redirection is included in the projection lens to ensure the best projection position of the system within the complete ophthalmologic diagnostic instrument. An additional aspect of the system design was to

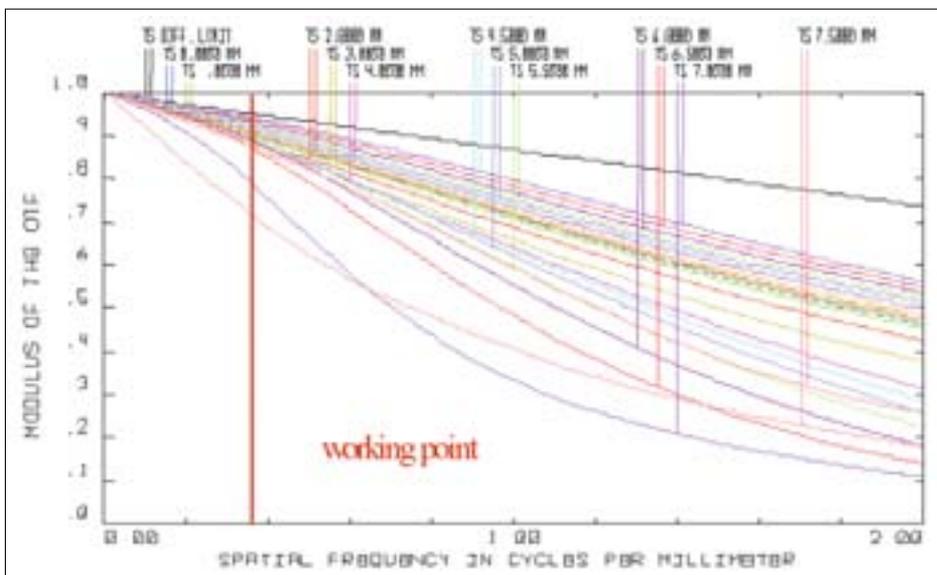
ensure modularity so that individual components can easily be exchanged in response to new developments. The newly developed dome projection system can be characterized by the following parameters:

- illuminance within the projected image approximately 800 lx (luminous flux approx. 500 lm)
- illuminance homogeneity within the projected image $> 75\%$
- lateral chromatic aberration $< 200\ \mu\text{m}$ ($< 1/4$ of the projected pixel size)
- optical resolution (spot size) $< 280\ \mu\text{m}$ ($< 1/4$ of the projected pixel size), modulation transfer function better than 70 % absolute for all spatial frequencies down to the pixel size for the whole dome (see Fig. 3)

As this new projection system has to fulfill many optical and geometrical restrictions, the optical performance of this system cannot be compared directly with standard multimedia beamers, as these commercially available beamers do not fulfill these constraints.

Abb. 3:
Modulationstransferfunktion im projizierten Bild.

Fig. 3:
Modulation transfer function in the projected image.



Systemintegration

In Abb. 4 ist das Projektionssystem in seiner Arbeitsposition in einer 60 cm-Kugel dargestellt, wobei der Abbildungsstrahlengang wiedergegeben ist.

Das realisierte Projektionssystem mit mechanischen Halterungen und Gehäusebauteilen sowie der Displayelektronik kann in Abb. 5 gesehen werden. Bestimmungen des Medizinproduktegesetzes (thermische und elektrische Aspekte) mussten bei der konstruktiven Umsetzung beachtet werden. Unter Nutzung einer 300 W Cermax Lampe und eines Flüssigkeitslichtleiters wurde mit dem Projektionssystem ein Lichtstrom von mehr als 500 lm erreicht.

Die Anordnung und Montage des Projektionssystems innerhalb einer 60 cm-Halbkugel für die ophthalmologische Diagnostik ist in Abb. 6 wiedergegeben. Der Projektor befindet sich seit-

lich neben dem zu untersuchenden Auge, dessen Sichtfeld mittels objektiver, multifokaler Perimetrie untersucht werden soll. Für die Untersuchung des anderen Auges kann das Projektionssystem 180° um die optische Achse des Gesamtsystems geschwenkt werden.

Zusammenfassung

Mikrodisplays öffnen in medizinischen Anwendungen interessante Perspektiven für neue Messtechniken, neue Systemkonzepte und erweiterte Anwendungsgebiete. Für die perimetrische Diagnostik wird zur multifokalen Stimulation des Auges erstmals die Projektion beliebiger Muster in eine Kuppel ermöglicht. Die Kombination dieses Stimulationsprinzips mit der Kuppelprojektion eröffnet neue Perspektiven in der medizinischen Diagnostik /4/.

In der Kuppelprojektion sind generell Systeme mit einer Standardschnittstelle zu konventioneller elektronischer Bildatenerstellung (z. B. Standard-PC oder Video) von Interesse.

Systeme mit nur einem Projektor bieten diese Möglichkeit, benötigen aber speziell an die kugelförmige Projektionsfläche adaptierte, hochwertige Objektive. Das präsentierte optische System eröffnet neue Anwendungsgebiete für die Kuppelprojektion, in der bisherige Hochpreissysteme noch nicht Fuß fassen konnten. Kuppelprojektion mit nur einem Projektor sowie medizinische Diagnosesysteme stellen neue Anwendungsgebiete für Mikrodisplays dar – beides Nischenmärkte der Hochtechnologie mit hohem Potential. Für diese Anwendungsfelder sind jedoch immer speziell angepasste optische Systeme notwendig. Das optische Design wird somit in der Entwicklung entsprechender Systeme eine Schlüsselstellung einnehmen.

Literatur:

- /1/ Blackham, G.: „Recent Advances in Dome Display Systems“, SID 2000 Digest (2000) 968–971.
- /2/ www.zeiss.de/de/planetarium/home.nsf/78be232b5368b1b2c12566fe003b2602/89628edaacd56872c1256cbf0038e2a3?OpenDocument
- /3/ Riehemann, S.; Palme, M.; Kuehmstedt, P.; Notni, G.: „LCoS Based Projection Systems for Optical Metrology“, SID 2002 Digest (2002) 256–259.
- /4/ Patente DE19855848A1, DE19961323A1, DE10146330A1, DE10140871A1.

Abb. 5:
Foto des Kuppelprojektors.

Fig. 5:
Photo of the dome projector.



System integration

In Fig. 4, the projection system is arranged in its working position inside a 60cm diameter sphere and the imaging ray trace of a projected image is outlined. The optical system constructed, including mechanical mounting, electronics and housing, can be seen in Fig. 5. Safety regulations for medical products (thermal and electrical constraints) have been considered while constructing the projector. Utilizing a 300 W Cermax lamp and a fiber optic illumination, a luminous flux of more than 500 lm can be achieved. The principle behind the positioning and mounting of the projector inside a 60 cm diameter dome for ophthalmologic diagnostics are outlined in Fig. 6. The projector is located at the temporal side of the eye whose viewing field should be investigated by objective, multifocal perimetric diagnostics. For investigating the other eye, the complete projection system can be rotated by 180°.

Summary

Micro-displays in medical applications offer interesting perspectives for new measuring devices, new system concepts and extended application areas. For perimetric diagnostics they can provide the projection of any arrangement of patterns for multifocal stimulation of the eye. This stimulation principle in combination with dome projection has not been realized up until now and offers new perspectives in medical diagnostics /4/. For dome projection, systems which can interface with standard electronic image processing equipment (PC or video) are of special interest. Single projector systems offer this interface, but require specially designed optics for projection onto or inside a dome surface. Thus, the optical system presented opens up new application areas for low-cost dome projection systems in medical and non-medical fields. Single projector dome projection and medical diagnostics are both new application areas for micro-

displays. Both of which are high technology niche markets with high potential. But for all these devices, specially adapted optical systems are required. Thus, optical design will play a key role in the development of suitable systems.

References:

- /1/ Blackham, G.: „Recent Advances in Dome Display Systems“, SID 2000 Digest (2000) 968–971.
- /2/ www.zeiss.de/de/planetarium/home.nsf/78be232b5368b1b2c12566fe003b2602/89628edaacd56872c1256cbf0038e2a3?OpenDocument
- /3/ Riehemann, S.; Palme, M.; Kuehmstedt, P.; Notni, G.: „LCoS Based Projection Systems for Optical Metrology“, SID 2002 Digest (2002) 256–259.
- /4/ Patents DE19855848A1, DE19961323A1, DE10146330A1, DE10140871A1

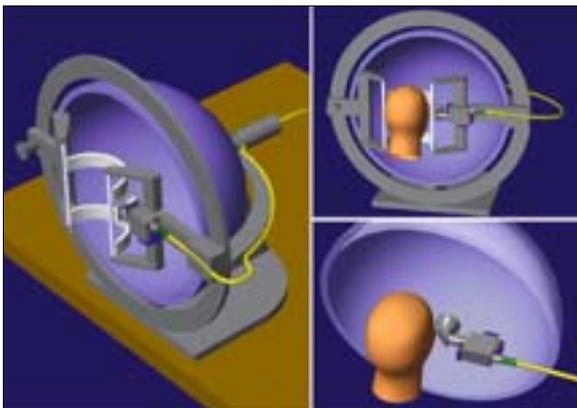


Abb. 6:
Unterschiedliche Ansichten des Projektors in einer 60 cm-Untersuchungshalbkugel der Ophthalmologie.

Fig. 6:
Different views of the projector inside a 60 cm diameter dome for ophthalmologic diagnostics.



Andreas Tünnermann

Einleitung

Die ersten Faserlaser wurden zu Beginn der sechziger Jahre mit Wellenlängen von rund einem Mikrometer und einer Ausgangsleistung von einigen Milliwatt betrieben. Aufgrund jüngster Entwicklungen verlässlicher Festkörper-Pumpquellen mit hoher Leuchtkraft und der Benutzung des Claddingpumpens sind Faserlaser nicht länger auf einen Niedrigleistungsbetrieb beschränkt. Für diodengepumpte Systeme im cw-Betrieb konnten Ausgangsleistungen von mehr als 100 W erreicht werden. Darüber hinaus können Pulsenergien von einigen mJ bei Pulsbreiten in der Größenordnung von 10 ns erzielt werden, was kürzlich anhand von Yb-dotierten Fasern gezeigt wurde.

Mittels der Chirped-Puls Verstärkungstechnik können Pulse so weit gestreckt werden, dass nichtlineare Störungen minimiert und Energien im Bereich der Sättigungsfluenz von seltenerd-dotierten Fasern selbst bei Verwendung ultrakurzer Pulse erreicht werden.

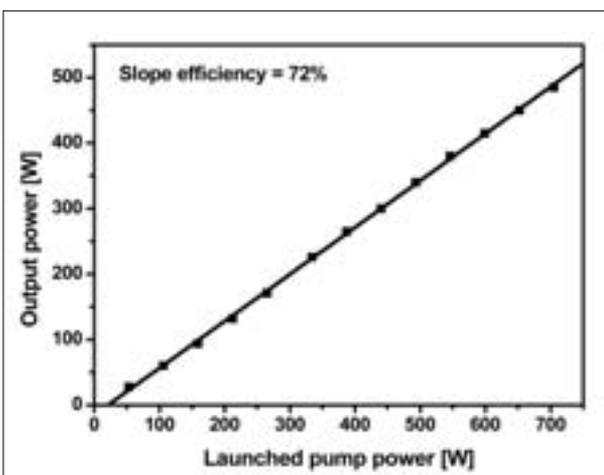
Entwicklung eines Hochleistungs-Faserlasers

In Zusammenarbeit mit dem Institut für Angewandte Physik der Friedrich-Schiller-Universität Jena (IAP) wurde am IOF ein diodengepumptes Doppelkern-Faserlasersystem entwickelt, welches Ausgangsleistungen von bis zu 500 W mit einer beugungsbegrenzten Strahlqualität ($M^2 < 1,3$) erreicht /1/. Der Laser basiert auf einem neuartigen Faserdesign, welches durch einen im Vergleich zu herkömmlichen Fasern vergrößerten Modenfelddurchmesser die Kompensation nichtlinearer Effekte erlaubt.

Für die Experimente wurde eine Yb-/Nd-dotierte Faser mit einer Länge von 35 m, einem Kerndurchmesser von 24 μm und einer numerischen Apertur von 0,086 benutzt. Der Pumpkerndurchmesser betrug 400 μm . In Bezug auf die Pumpleistung konnte ein Wirkungsgrad von mehr als 70 % erreicht werden, was einer thermischen Belastung von ca. 5 W/m entspricht. Obwohl keine aktive Kühlung verwendet wurde, können thermooptische Effekte selbst bei höchsten Ausgangsleistungen vernachlässigt werden, was durch die Linearität der Responsekurve selbst für hohe Ausgangsleistungen belegt wird.

Abb. 1: Input/Output Charakteristik eines Hochleistungs-Faserlasers mit beugungsbegrenztem Strahl.

Fig. 1: input – output characteristics of a high power fiber laser, operating with diffraction limited beam quality.



High power fiber and waveguide lasers

Andreas Tünnermann, Thomas Peschel, Ulf Peschel*, Jens Limpert*

*Friedrich Schiller University Jena

Introduction

The first fiber lasers were operated in the beginning of the sixties at wavelengths around one micron with output powers in the order of a few milliwatts. Owing to recent developments of reliable high brightness all solid state pump sources and the use of cladding pumping these devices are no longer restricted to low-power operation. Output powers of more than 100 W have been achieved for diode pumped systems in cw-operation. The capability of fiber systems for extracting pulse energies as high as several millijoules at pulse durations in the range of 10 ns has been demonstrated most recently in Yb-doped fibers.

Additional sufficient pulse stretching in the time domain using the chirped pulse amplification technique enables to reduce nonlinear pulse distortions in the fiber and to extract energies in the order of the saturation fluence limit of rare-earth doped fibers even in ultra-short pulse operation.

Development of the a high power fiber laser

In collaboration with the Institute of Applied Physics at the Friedrich-Schiller-University Jena (IAP) at the IOF a diode pumped double clad fiber laser system has been developed, delivering output powers up to 500 W with diffraction limited beam quality ($M^2 < 1.3$) /1/. The laser is based on a novel fiber design, which allows for the compensation of nonlinear effects due to an increased mode field diameter of the active doped core compared to conventional step index fibers. For the experiments, an Yb-/Nd-doped fiber of 35 m length has been used with a core diameter of 24 μm and a numerical aperture of 0.086. The pump core diameter was 400 μm . A slope efficiency of more than 70 percent has been measured with respect to the launched pump power, which corresponds to a heat loading of the fiber of about 5 W/m. No active cooling was applied in the experiments. Because of the linearity of the slope even at the highest output powers thermo-optical effects can be neglected.



Thomas Peschel



Ulf Peschel



Jens Limpert

Um das Potenzial zur Leistungssteigerung dieser Fasergeräte zu bestimmen, wurden die thermo-optischen Limits von Faserlasern untersucht. Basierend auf der in Abb. 2 gezeigten Fasergeometrie wurde die eindimensionale Wärmeleitungsgleichung gelöst. Bei einer thermischen Belastung von 5 W/m erhöht sich die Fasertemperatur um weniger als 50 K in Bezug auf die Umgebung. Unter diesen Bedingungen beträgt die Temperaturdifferenz zwischen Faserkern und Faseroberfläche weniger als 5 K, was bedeutet, dass keine wesentliche zusätzliche Spannung innerhalb der Faser durch den Pumpprozess entsteht. Selbst bei einer thermischen Belastung im Bereich von 20 W/m befinden sich die auftretenden Spannungen weit unterhalb der Bruchgrenze von Quarzglas. Aus diesen Daten kann man schlussfolgern, dass beugungsbegrenzte Faserlaser ohne aktive Kühlung mit Ausgangsleistungen im kW-Bereich betrieben werden können (Abb. 3).

Aufbauend auf diesen Erkenntnissen wurden ultraschnelle Faserverstärker entwickelt. Bei Anwendung der Chirped-Puls Verstärkungstechnik in Verbindung mit neuartigen Faserdesigns wurden kürzlich durchschnittliche Ausgangsleistungen im Bereich von 100 W gemessen. Dies eröffnet großartige neue Möglichkeiten zur praktischen Anwendung von ultraschnellen Lasern /2/, /3/. Eine weitere Leistungssteigerung von Faserlasern und Verstärkern im cw- und gepulsten Betrieb ist in der Entwicklung.

Danksagung

Dieses Projekt ist teilweise finanziert durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF).

Literatur:

- /1/ Limpert, J.; Liem, A.; Zellmer, H.; Tünnermann, A.: „500 W continuous-wave fibre laser with excellent beam quality“, *Electron. Lett.* 39, 645 (2003).
- /2/ Limpert, J.; Clausnitzer, T.; Schreiber, T.; Liem, A.; Zellmer, H.; Fuchs, H. J.; Kley, E.-B.; Tünnermann, A.: „76 W average power femtosecond fiber CPA system“, in: *Trends in Optics and Photonics, Optical Advanced Solid-State Lasers*, Editor: John J. Zayhowski, TOPS 83, 414 (2003).
- /3/ Limpert, J.; Liem, A.; Schreiber, T.; Zellmer, H.; Tünnermann, A.: „Power and energy scaling of fiber laser systems based on ytterbium-doped large-mode-area fibers“, *Advances in Fiber Devices*, L. N. Durvasula, ed., *Proceedings SPIE 4974*, 135 (2003).
- /4/ 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“, *In: Optics Express* 11 (2003) 22 p. 2982, ISSN 1094-4087

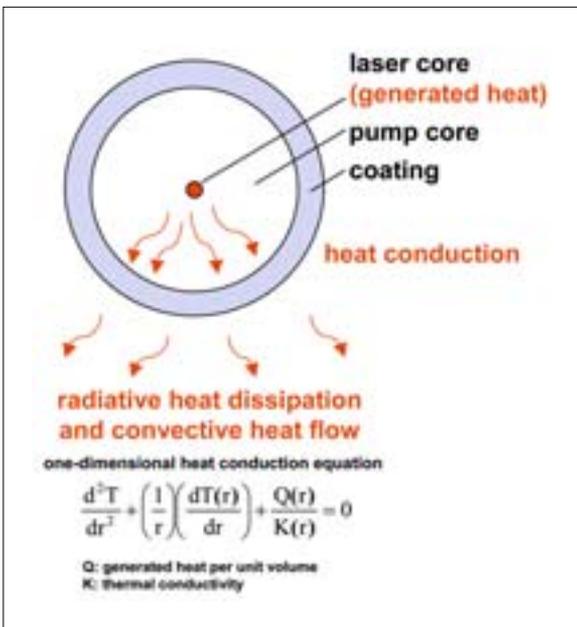


Abb. 2: Doppel-Kern-Faserlasergeometrie. Die Wärme wird in dem dotierten Laserkern erzeugt, welcher von dem Pumpkern und der Beschichtung umgeben ist. Wärmeabstrahlung und -konvektion können an der Faseroberfläche beobachtet werden. Die Temperaturverteilung der Faser $T(r)$ ist durch die eindimensionale Wärmeleitungsgleichung bestimmt.

Fig. 2: Double-clad fiber laser geometry. The heat is generated in the doped laser core, which is surrounded by the pump core and the coating. Radiative heat dissipation and convective heat flow is observed at the fiber surface. The temperature distribution of the fiber $T(r)$ is determined by the one-dimensional heat conduction equation.

In order to determine the power scaling potential of these fiber devices, the thermo-optical limits of fiber lasers have been analyzed. Based on a fiber geometry as illustrated in Fig. 2, the one-dimensional heat conduction equation has been solved. At a thermal loading of 5 W/m the temperature of the fiber is increased by less than 50 K with respect to the ambient air. Under these conditions, the temperature difference between the core and the fiber surface is less than 5 K, indicating, that no significant additional stress is introduced in the fiber due to the pumping process. Even at a thermal loading in the range of more than 20 W/m, the introduced stress is well below the fracture limit of fused silica. From these data it can be concluded, that diffraction limited fiber lasers can be operated without active cooling devices up to output powers in the kW-range (Fig. 3).

Based on this knowledge, ultrafast fiber amplifiers have been developed by us. Applying the chirped pulse amplification technique in combination with novel fiber designs, output powers in the range of 100 W average power have been measured most recently, offering novel avenues for real world applications of ultrafast lasers /2/, /3/. A further power scaling of fiber lasers and amplifiers in cw and pulsed operation is presently under progress.

Acknowledgements

This project is partly funded by the German federal ministry of education and research.

References:

- /1/ Limpert, J.; Liem, A.; Zellmer, H.; Tünnermann, A.: „500 W continuous-wave fibre laser with excellent beam quality”, *Electron. Lett.* 39, 645 (2003).
- /2/ Limpert, J.; Clausnitzer, T.; Schreiber, T.; Liem, A.; Zellmer, H.; Fuchs, H. J.; Kley, E.-B.; Tünnermann, A.: „76 W average power femtosecond fiber CPA system”, in: *Trends in Optics and Photonics, Optical Advanced Solid-State Lasers*, Editor: John J. Zayhowski, TOPS 83, 414 (2003).
- /3/ Limpert, J.; Liem, A.; Schreiber, T.; Zellmer, H.; Tünnermann, A.: „Power and energy scaling of fiber laser systems based on ytterbium-doped large-mode-area fibers”, *Advances in Fiber Devices*, L. N. Durvasula, ed., *Proceedings SPIE 4974*, 135 (2003).
- /4/ 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”, *In: Optics Express* 11 (2003) 22 p. 2982, ISSN 1094-4087

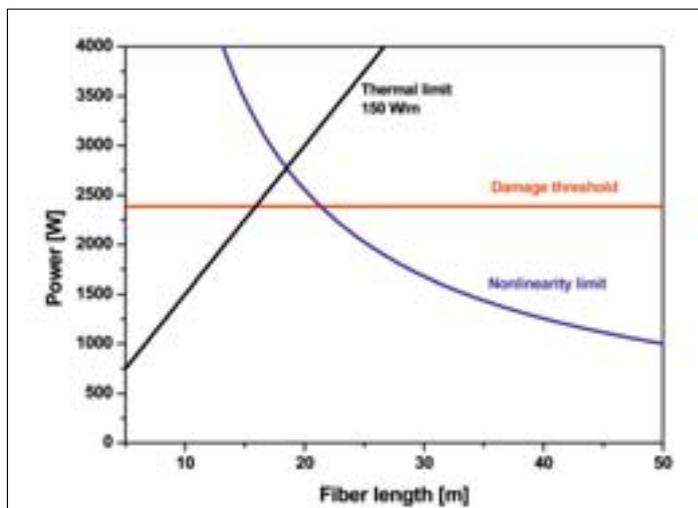


Abb. 3: Leistungsgrenzen eines passiv gekühlten 400 μm cladding-gepumpten Faserlasers mit einem Modenfelddurchmesser von 25 μm . Die nicht-lineare Grenze wird durch auftretende Ramanstreuung festgelegt, während die Zerstörschwelle durch die Beschädigung der Faserendflächen bestimmt wird.

Fig. 3: Power scaling limits of a passively cooled 400 μm pump cladding fiber laser with a mode field diameter of 25 μm . The nonlinearity limit is determined by the stimulated Raman-scattering. The damage threshold is determined by the optical break down of the fiber endfacets.

1. Internationale Gäste International Guests

Dr. Dang Xuan Cu
Ministry of Sciences and Technologies,
Hanoi, Vietnam

Co-Director Giang Dao
Int. SEMATECH, Austin/Texas, USA

Director David Davis
Precitech Inc., Keene/NH, USA

Dr. Sangcholl Han
LG Chemical, Daejeon, Korea

Dr. Keyogi Kamatsu
Tohoku University, Sendai, Japan

Ph. D. Kevin Kemp
Int. SEMATECH, Austin/Texas, USA

Dr. Igor Milytynski
University Charkov, Ukraine

Prof. Dr. Mats Robertson
ACREO, Linköping, Sweden

Prof. Dr. Nikolai Sobolev
University of Aveiro, Aveiro, Portugal

Dr. Jin-Seung Sohn
SAIT Samsung, Suwon, Korea

Prof. Alexander V. Tikhonravov
Research Computing Centre, Moscow, Russia

Dr. Michael K. Trubetskov
Research Computing Centre, Moscow, Russia

Ron Willey
Willey Optical Consultants, Charlevoix, USA

2. Kooperation mit Instituten anderer Länder Co-operation with Institutes in other Countries

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

Netherlands:
University Twente, Prof. Alfred Driessen

France:
Universität St. Etienne, Prof. Oliver Parriaux

Israel:
Technion, Haifa, Prof. Abraham Marmor

Ireland:
Trinity College Dublin, Prof. Werner Blau

Italy:
ENEA Rome, Dr. Enrico Masetti

Sincrotrone Trieste, Dr. Richard Walker

University 'La Sapienza', Rom,
Prof. Francesco Michelotti

Portugal:
University Aveiro, Prof. Nikolai Sobolew

Russia:
Lebedev Institute Moscow,
Prof. Alexander V. Vinogradov

Moscow State University,
Prof. Alexander Tikhonravov

Spain:
University of Barcelona,
Prof. Salvador Bosch i Puig

Switzerland:
CSEM Zurich, Dr. Mike Gale

IMT, University Neuchatel,
Prof. Hans-Peter Herzig

Ukraine:
National Technical University
„Kharkov Polytechnic Institute“,
Prof. Valery V. Kondratenko

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

3. Mitgliedschaften Memberships

3.1 Persönliche Mitgliedschaften Personal Memberships

Dr. Andreas Bräuer:

- Conference Program Committee „Linear Optical Properties of Waveguides“, SPIE, USA
- Mitglied des AMA-Fachausschusses für Optische Sensorik
Member of the AMA advisory board for Optical Sensing
- Gutachter (Referee): „Applied Optics“, „Optical Engineering“, „Optics Letters“
- Fachausschuss 4.2 „Mikrooptik“ der GMMA
Expert committee 4.2 „Microoptics“ of GMMA-association

Dr. Angela Duparré:

- Topical Editor „Applied Optics“, Optical Thin Films
- Assessor Board Member of the Australian Research Council
- Chair International Conference „Advanced Characterization techniques for Optics, Semiconductors, and Nanotechnologies“, SPIE Symposium 2003, San Diego, USA
- DIN-Normenausschuss NAFuO, AA O18 AK2, „Optische Komponenten und Werkstoffe“
- ISO-Committee Member
ISO/TC 172/SC 9/WG 6
- Mitglied des Komitees „Metrologie in der Mikro- und Nanotechnik“
des VDI/VDE/GMA 3.41, 3.43
Member of the committee on „Metrology in Micro- and Nanotechnologies“ of the association of German Engineers,
VDI/VDE/GMA 3.41, 3.43
- Program Committee Member International Conference „Advances in Optical Thin Films“, St. Etienne, France 2003
- Program Committee Member Topical Meeting on Optical Interference Coatings, Tucson, Arizona, June 2004

Dr. Ramona Eberhardt:

- DIN-Normenausschuss NAFuO, AA F3, „Fertigungsmittel für Mikrosysteme“

Dr. Claudia Gärtner:

- Mitglied im DECHEMA
Arbeitsausschuss Mikroverfahrenstechnik
Member of DECHEMA working committee
„Micro Process Engineering“

Dr. Volker Guyenot:

- Mitglied im Wissenschaftlich-Technischen Rat der Fraunhofer-Gesellschaft
Member of the Scientific-Technical Advisory Committee of the Fraunhofer-Gesellschaft
- Mitglied der Hauptkommission des Wissenschaftlich-Technischen Rats der Fraunhofer-Gesellschaft
Member of the Board of the Scientific-Technical Advisory Committee of the Fraunhofer-Gesellschaft
- Kurator im Businessplan-Wettbewerb des Landes Thüringen
Curator of the committee of business competition of Thuringia
- Gutachter (Referee) bei STIFT
- Vorstandsmitglied in
„OphthalmolInnovation Thüringen e.V.“
Member of the Board of
„OphthalmolInnovation Thüringen e.V.“
- Mitglied des Programm-Komitees zum Workshop „Innovative Oberflächen für Uhren und Präzisionstechnik“ in Dresden
Member of the workshop program committee „Innovative Surfaces for Watches and Precision Technologies“ in Dresden

Dr. Norbert Kaiser:

- Member of Program Committee
„5th International Conference on Coatings on Glas“, Braunschweig
- Co-Chair of the „International Symposium on Laser Induced Damage in Optical Materials“, Boulder, USA
- Program Chair „9th Topical Meeting on Optical Interference Coatings“, Tucson, Arizona
- Vorsitzender des Fachausschusses „Dünne Schichten für die Optik und Optoelektronik“ der Europäischen Forschungsgesellschaft für Dünne Schichten
President of technical committee
„Thin Films for Optics and Optoelectronics“ of the European Society of Thin Films
- Chair of High Level Expert Meeting
„Design and Technology of Optical Coatings“, Anzio, Italien
- Mitglied des Vorstandsrats der Deutschen Physikalischen Gesellschaft
Member of the Board of Directors Council of Deutsche Physikalische Gesellschaft
- Leitung des Otti-Profiforums
„Moderne Optische Technologien“, 3.–4.12.2003, Regensburg
Direction of the OTTI professional forum
„Modern optical technologies“, 3.–4.12.2003, Regensburg

Dr. Gunther Notni:

- Beirat (Editorial Board): „Zeitschrift für Angewandte Gewässerökologie“
- VDI/VDE-GMA Fachausschuss 3.32.
„Optische 3-D-Messtechnik“
VDI/VDE-GMA board 3.32.
„Optical 3-D measurement“
- Fachverband Photonik und Präzisionstechnik
SPECTARIS, Fachgruppe „Industrielle Messtechnik und Sensorik“
SPECTARIS Association, board Metering solutions
- Session Chair Int. SPIE Conference
„Optical Measurement Systems for Industrial Inspection“, München, 23.–26.6.2003
- Gutachter (Referee): DFG, VC

Prof. Dr. Andreas Tünnermann:

- Verbundkoordinator BMBF-Leitprojekt: „MICROPHOT“
Joint Coordinator of the „MICROPHOT“ project of the German Ministry of Education and Research
- Board Member European Physical Society – Quantum Electronics and Optics Division
- Member Scientific Advisory Board Optics Communication
- Aufsichtsrat Biocentiv Jena
Member of the board of directors of „Biocentiv Jena“
- Vorstand OptoNet e.V.
Member of the board of managing directors of „OptoNet e.V.“
- Beirat VDI-Kompetenzfeld Optische Technologien
„VDI Field of Competence Optical Technologies“ advisory board member
- General Chair CLEO Europe 2003, München
- Program Committee Member ASSP 2003, San Antonio
- Program Committee Member Micromachining for micro- and nano-optics conference; Photonics West 2003
- Gutachter (Referee): Optical Letters, Optical Community, Applied Physics B, Applied Optics
- Persönliches Mitglied: DPG, EPS, OSA, IEEE, WLT
Personal member of: DPG, EPS, OSA, IEEE, WLT

Dr. Christoph Wächter:

- Program Committee „Integrated Optics Devices VI SPIE – The International Society for Optical Engineering“
- Member Technical Committee Workshop „Optical Waveguide Theory and Numerical Modelling“
- Arbeitskreis „Integrierte Optik“ (AKIO)
Study group „Integrated Optics“

Dr. Uwe-Detlef Zeitner:

- Gutachter (Referee): „Applied Optics“

3.2 Mitgliedschaften des Fraunhofer IOF Memberships of the Fraunhofer IOF

Beutenberg Campus e. V. – BC
www.beutenberg.de

BioRegio e. V.
www.bioregio.com/jena.htm

**DECHEMA Gesellschaft für
Chemische Technik und Biotechnologie e. V.**
www.dechema.de

**Deutsche Gesellschaft für
angewandte Optik e. V. – DGaO**
www.dgao.de

**Europäische Forschungsgesellschaft Dünne
Schichten e. V. – EFDS**
www.efds.org

European Optical Society – EOS
www.europticalsociety.org

Fachverband für Sensorik e. V. – AMA
www.ama-sensorik.de

**fanimat – Funktionelle anorganisch-
nichtmetallische Materialien**
www.fanimat.de

**FasiMit – Aus- und Weiterbildungsnetzwerk
zur Fachkräftesicherung in der
Mikrosystemtechnik in Thüringen**
www.fasimit.de

Fraunhofer-Allianz Rapid Prototyping
www.rapidprototyping.de

Fraunhofer-Allianz Vision
www.vision.fraunhofer.de

**Fraunhofer-Verbund Oberflächentechnik
und Photonik VOP**
www.vop.fraunhofer.de

Industrieverband SPECTARIS
www.spectaris.de

**Kompetenzzentrum Ultrapräzise
Oberflächenbearbeitung e. V. – UPOB**
www.upob.de

Kooperationsverbund Präzision aus Jena
www.praezision-aus-jena.de

Mikrotechnik Thüringen e. V. – MTT
www.mikrotechnik-thüringen.de

**Netzwerk Mikrotechnologie
in Formenbau und Spritzgießtechnik**
www.micromold.net

OphthalmolInnovation e. V.
www.ophthalmolInnovation.de

OptoNet e. V.
www.optonet-jena.de

**Wissenschaftliche Gesellschaft
Lasertechnik e. V. – WLT**
www.wlt.de

4. Besondere Ereignisse Special Events

Feierliche Einweihung des Institutsneubaus
Celebratory inauguration of the new institute
7. März 2003, Fraunhofer IOF, Jena

Winterschule Optische Schichten
Winter school Optical Coatings
13.–14. März 2003 in Tabarz

**1. Thüringer Tage der
Optischen Technologien**
1. Thuringia days of optical technologies
6.–8. Mai 2003, Beutenberg Campus, Jena

**OptoNet Workshop
„Mikrooptische Systeme“**
„Microoptical Systems“
7. Mai 2003, Fraunhofer IOF, Jena

VDI Seminar „Optische 3-D-Messtechnik“
der Fraunhofer-Allianz Vision am IOF
3.–4. Juli 2003, Fraunhofer IOF, Jena

**Ehrenkolloquium anlässlich des Instituts-
leiterwechsels am Fraunhofer IOF**
Colloquium on the occasion of handing over of
the direction at the Fraunhofer IOF
10. September 2003, Fraunhofer IOF, Jena

**DgaO-Schule Optik
Formung von Licht –
Räumliche und zeitliche Modulation**
DgaO school of Optics
Moulding of Light –
Spatial and Temporal Modulation
16.–19. September 2003, Fraunhofer IOF, Jena

**Workshop
„Optical Coating Design and Monitoring“**
19. September 2003, Fraunhofer IOF, Jena

OptoNet Workshop „Optische Schichten“
„Optical Coatings“
22. Oktober 2003, Fraunhofer IOF, Jena

**Fachkräftesicherung in der
Mikrosystemtechnik in Thüringen**
Safeguarding of specialists in Thuringia's micro
systems technology
25. November 2003, Fraunhofer IOF, Jena

5. Preise Prices

Otto-Schott-Forschungspreis 2003
Otto Schott Research Award
Prof. Dr. rer. nat. habil. Andreas Tünnermann

Josef-von-Fraunhofer-Preis
Kratzfeste reflexmindernde Beschichtung
AR-hard® für transparente Kunststoffe
Dr. rer. nat. Ulrike Schulz,
Dipl.-Ing. Peter Munzert,
Dr. rer. nat. habil. Norbert Kaiser

6. Berichterstattung in den Medien Media Coverage

Im Jahr 2003 wurde insgesamt 187 mal über das Fraunhofer IOF in den deutschsprachigen Medien berichtet (kein Anspruch auf Vollständigkeit). Darunter waren 132 Artikel in Zeitungen und Zeitschriften, 38 Berichte im Fernsehen und zusätzlich 17 Artikel in Online-Publikationen.

In the German media there were 187 reports about Fraunhofer IOF in 2003. This includes 132 articles in newspapers and journals, 38 television reports and additional 17 online publications.



Eindrücke von den ersten Tagen der Optischen Technologien
Impressions from the 1. Thuringia days of optical technologies



Fachkräftesicherung in der Mikrosystemtechnik in Thüringen:
Aufmerksame Zuhörer und angeregte Gespräche

Safeguarding of specialists in Thuringia's micro systems technology:
Attentive auditors and motivated discussions

Patents

Patentanmeldungen 2003 Patent Applications 2003

(P1)

Beckert, E.; Damm, C.; Eberhardt, R.; Schreiber, P.
**Keramiksubstrate mit integrierten
mechanischen Strukturen zum direkten
Fassen von optischen Bauelementen**
Anmelde-Az.: 103 47 450.1

(P2)

Danz, N.; Schäfer, B.; Harz, M.;
Büttner, A.; Schreiber, P.
**Anordnung und Verfahren zur optischen
Detektion von in Proben enthaltenen
chemischen, biochemischen Molekülen
und/oder Partikeln**
Anmelde-Az.: 103 24 973.7

(P3)

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**
Anmelde-Az.: 103 22 587.0-51

(P4)

Kalkowski, G.; Damm, C.; Peschel, T.;
Müller, S. (Philips); Kunze, N. (Philips)
**Halterung für optische Elemente sowie
Verfahren zur Herstellung**
Anmelde-Az.: 103 16 926.1

(P5)

Kalkowski, G.; Schreiber, P.;
Waldhäusl, R. (Zeiss Jena); Mühlhoff, D.
(Zeiss Jena); Trölsch, A. (Zeiss Jena)
**Projektionsvorrichtung
mit Feedbackfunktion**
Anmelde-Az.: 103 12 624.4

(P6)

Notni, G.; Kühmstedt, P.; Riehemann, S.
**Vorrichtung und Verfahren zur Vermessung
von Entfernungen und/oder räumlichen
Koordinaten eines Gegenstandes**
Anmelde-Az.: 103 44 051.8

(P7)

Riehemann, S.; Palme, M.; Notni, G.
**Beleuchtungsbaugruppe zur
Vermessung der optischen Eigenschaften
von Linsen und Objektiven**
Anmelde-Az.: 103 44 788.1

(P8)

Risse, S.; Damm, C.; Peschel, T.; Harnisch, G.
**Leichtgewichtsstruktur für Spiegel,
Objekthalter und Trägerplatten und
Verfahren zu ihrer Herstellung**
Anmelde-Az.: 103 23 176.5

(P9)

Schulz, U.; Kaiser, N.;
Schallenberg, U. (mso-Jena)
**Optisches System zur Verringerung der
Reflexion optischer transparenter Substrate**
Anmelde-Az.: 103 46 282.1

(P10)

Schulz, U.; Munzert, P.; Kaiser, N.;
Hofmann, W. (Fresnel Optics); Bitzer, M. (Fresnel
Optics); Gebhardt, M. (Fresnel Optics)
**Verfahren und Werkzeug zur Herstellung
transparenter optischer Elemente aus
polymeren Stoffen**
Anmelde-Az.: 103 18 566.6-51

Deutsche Patenterteilungen 2003 Patent Assignment (Germany)

(P1)
Bräuer, A.; Danz, N.; Waldhäusl, R. (Zeiss Jena);
Kindervater, R. (Gene disc)
**Vorrichtung zur Durchführung
von biochemischen Fluoreszenztests**
Veröffentlichungsnummer: DE 101 12 455

(P2)
Buß, W.; Kleinle, S.; Poßner, T.
**Verfahren und Einrichtung zur optischen
Erfassung eines Fluiddots auf einem Substrat**
Veröffentlichungsnummer: DE 195 10 402

(P3)
Damm, C.; Weber, C.;
Schmidt, I. (Klinikum FSU Jena);
Schmitz, H. (Klinikum FSU Jena);
Markgraf, E. (Klinikum FSU Jena)
**Fingerfixateur mit Bewegungsmöglichkeit
eines Gelenkes an einem
gebrochenen Finger**
Veröffentlichungsnummer: DE 198 56 890

(P4)
Feigl, T.; Kaiser, N.; Yulin, S.
**Verfahren zur Herstellung eines
thermisch stabilen Schichtsystems
zur Reflexion von Strahlung im extremen
ultravioletten Spektralbereich (EUV)**
Veröffentlichungsnummer: DE 100 11 548

(P5)
Glöckner, S.; Göring, R.
**Mikrooptischer Laserscanner
und Abtastverfahren**
Veröffentlichungsnummer: DE 197 52 888

Ausländische Patenterteilungen 2003 Patent Assignment (EP, US)

(P6)
Karthe, W.; Bräuer, A.; Eismann, F. (Carl Zeiss
Jena); Köhler, M. (Carl Zeiss Jena);
Waldhäusl, R. (Carl Zeiss Jena); Danz, N.
**Anordnung zur Detektion biochemischer
oder chemischer Substanzen mittels
Fluoreszenzlichtanregung und Verfahren
zu deren Herstellung**
EP-Veröffentlichungsnummer: EP 0 988 526
US-Veröffentlichungsnummer: US 6,534,011

(P7)
Mohaupt, M.
**Verfahren und Vorrichtung zur Vereinzelung
von ring- oder scheibenförmigen Bauteilen**
EP-Veröffentlichungsnummer: EP 1 086 780

Marken 2003 Marks 2003

(M1)
AR-hard®
Az.: 302 61 784.1/09

Gebrauchsmuster 2003 Petty Patents 2003

(G1)
Feigl, T.; Kaiser, N.; Yulin, S.
**Thermisch stabiles Schichtsystem zur
Reflexion von Strahlung im extremen
ultravioletten Spektralbereich (EUV)**
Az.: 200 23 408.0

1. Vorlesungen Lectures

Dr. Andreas Bräuer
Microoptical Technologies
Institut Teknologi Bandung/Indonesien
Auditorium: Students/scientists from Indonesia,
Malaysia, Thailand, Korea, Australia

Dr. Ramona Eberhardt
Mikromontage
Fachhochschule Jena
Auditorium: Studenten, MBA

Dr. Claudia Gärtner
Microfluidics: Technology and Application
Short Course Photonics West 2003,
San Jose, USA

Dr. Volker Guyenot
Optikmontage
Fachhochschule Jena
Auditorium: Studenten, MBA

Dr. Norbert Kaiser
Beschichtungstechnik
Fachhochschule Jena, Auditorium: Studenten

Dr. Peter Schreiber
Räumliche Formung von Laserbündeln
DGaO-Schule am Fraunhofer IOF in Jena
Auditorium: Mitglieder der DGaO

Ulrich Streppel
Processing of Optical Polymers
Institut Teknologi Bandung/Indonesien
Auditorium: Students/scientists from Indonesia,
Malaysia, Thailand, Korea, Australia

Dr. Uwe-Detlef Zeitner
Interne Formung von Laserstrahlung
DGaO-Schule am Fraunhofer IOF in Jena
Auditorium: Mitglieder der DGaO

2. Diplomarbeiten Diploma Theses

Frank Barkusky
**Strukturoptimierung laserlithographisch
hergestellter mikrooptischer Elemente**
Fachhochschule Hildesheim/Holzminde/
Göttingen, 09/03

Nicolas Benoit
**Radiation stability of EUV optics:
Contamination issues**
Ecole Nationale Supérieure de Physique
de Marseille, 09/03

Patrick Bernitz
**Untersuchungen zur Herstellung
von Mikrostrukturen mittels
Ultrapräzisionsbearbeitung**
Fachhochschule Jena, 04/03

Dominique Buchenau
**Charakterisierung der optischen sowie
elektrooptischen Eigenschaften
reflektierender Flüssigkristallmikrodisplays**
Fachhochschule Jena, 03/03

Lutz Freytag
**Untersuchung von Positionierbewegungen
unter Einleitung von mechanischen
Schwingungen und statischen Kräften**
Fachhochschule Jena, 10/03

Henning Geßner
**Untersuchungen zur winkelaufgelösten
Streuung, Transmission und Reflexion mittels
Excimer-Laser-Strahlung bei 193 nm und
157 nm an optischen Schichtkomponenten**
Friedrich-Schiller-Universität Jena, 01/03

Stefan Guddei
**Entwicklung von Vorrichtungen
zur Handhabung von Haaren**
Fachhochschule Jena, 05/03

Michaela Harz
**SPR-Sensor zur parallelen Detektion von
mehreren biochemischen Proben**
Fachhochschule Jena, 12/03

Ludwig Kuttner
**Entwicklung, Konstruktion, Realisierung und
Test eines Fasermehrfachgreifers**
Fachhochschule Jena, 02/03

Jork Leiterer
**Spektralfotometrie mit Excimerlaser
für den VUV-Spektralbereich**
Friedrich-Schiller-Universität Jena, 11/03

Toni Reitz
**Messtechnische Untersuchungen zur
Rastersondenmikroskopischen Struktur- und
Rauheitsanalyse über ausgedehnte
Ortsfrequenzbereiche für die Vermessung
von Oberflächen und Schichten mit
Nanometerstrukturen**
Fachhochschule Zwickau, 02/03

Nadine Schalm
**Entwicklung eines Messplatzes zur
Bestimmung der Abbildungsqualität von
miniaturisierten Kameraobjektiven**
Fachhochschule Jena, 12/03

3. Dissertationen Dissertations

Dr. rer. nat. Norbert Danz
**Untersuchungen zur spontanen Emission
von organischen Farbstoffmolekülen in
Schichtsystemen**
Friedrich-Schiller-Universität Jena,
Physikalisch-Astronomische Fakultät, 10/03

Dr.-Ing. Stefan Gliedh
**Entwicklung und Anwendung eines
Messsystems zur Bestimmung des totalen
Streulichts von optischen und technisch
rauh Oberflächen**
Technische Universität Ilmenau, 10/03

Dr. rer. nat. Peter Kühmstedt
**Untersuchung zur Messunsicherheit bei
3D-Formmessverfahren mit strukturierter
Beleuchtung**
Ernst-Moritz-Arndt-Universität Greifswald, 04/03

4. Ausbildung und Betreuung Training and Supervision

Azubis, Schüler, Praktikanten/
Trainees, Pupils, Interns

Im Fraunhofer IOF wurden im Jahr 2003 insgesamt 11 Schüler und 17 Praktikanten betreut. Außerdem wurden 11 Jugendliche für einen Beruf ausgebildet, 4 Physiklaboranten, 6 Industriemechaniker und 1 Bürokauffrau.

In the year 2003 the Fraunhofer IOF supervised 11 pupils and 17 interns. 11 youths were trained for a profession including 4 laboratory technicians specialized in physics, 6 industrial mechanic and 1 clerk.

Messebeteiligungen

Science Fair Participation

1. Messebeteiligungen Science Fair Participation

Biotrends 2003

11.2.–14.2., Berlin, Deutschland, Germany

BioAnalytica 2003

1.4.–4.4., München, Deutschland, Germany

Control 2003

Fraunhofer-Verbund Vision,
Fraunhofer-Alliance Vision,
6.5.–9.5., Sinsheim, Deutschland, Germany

Laser 2003

23.6.–26.6., München, Deutschland, Germany

Productronica 2003

11.11.–14.11., München, Deutschland, Germany

Biotechnica 2003

7.10.–9.10., Hannover, Deutschland, Germany

Nanotech 2003

25.11.–27.11., Montreux, Schweiz, Switzerland

Euromold 2003

Fraunhofer Allianz Rapid Prototyping,
Fraunhofer Network Rapid Prototyping,
3.12.–6.12., Frankfurt/Main, Deutschland,
Germany

- **Interferenzschichten auf Plastik und Glas**
Interference films on plastics and glass
- **Antireflexschichten auf PMMA, hergestellt durch Ionenätzen**
Antireflection films on PMMA by ion etching
- **Kratztest für AR-hard® Schichten**
Scratch test for AR-hard® films
- **1:3-Mo/Si Schwarzschildobjektiv für EUV, $\lambda = 13,5$ nm**
1:3 Mo/Si Schwarzschild objective for EUV, $\lambda = 13,5$ nm
- **Optisches Mikrofon z. B. für medizinische Anwendungen (Computertomograph)**
Optical microphone e. g. in life science (computer tomograph)
- **R-G-B-LED-Modul z. B. für die digitale Projektion**
R-G-B LED module e. g. for digital imaging
- **Laserstrahllöten mikrooptischer Baugruppen**
Laser beam soldered microoptical systems
- **Design und Herstellung ultrapräziser Bauelemente**
Design and machining of ultra-precision components
- **Rotationsscanner zur Strahlablenkung**
Rotating scanner for laser beam deflection
- **Vakuum-Chuck für Halbleiteranwendungen**
Vacuum chuck for semiconductor manufacturing
- **Automatische Faserjustierung**
Automatic fibre adjustment
- **Mikrofluidische Systeme für live science Anwendungen**
Microfluidic systems for live science applications



Control 2003



Laser 2003

2. Ausstellungsthemen und Exponate Themes and exhibits

- **Mobiles multi-view 3-D-Messsystem „G-Scan“**
Mobile multi-view 3-D Measurement System „G-Scan“
- **Flexibles 3-D-Messsystem „kolibri-flex“**
Flexible 3-D Measurement System „kolibri-flex“
- **Demonstratoren für Silberinselfilme**
Demonstrator for silver island films



Productronica 2003



Euromold 2003

Scientific Publications

Wissenschaftliche Publikationen Scientific Publications

Bakonyi, Z.; Hui Su; Onishchukov, G.; Lester, L. F.; Gray, A. L.; Newell, T. C.; Tünnermann, A.
High-Gain Quantum-Dot Semiconductor Optical Amplifier for 1300 nm
In: IEEE Journal of Quantum Electronics 39 (2003) 11 p. 1409–1414, ISSN 0018-9197

Bauer, N.; Notni, G.; Zacher, M.
Rundum 3D-Messsysteme für große und komplexe Teile
In: QZ Qualität und Zuverlässigkeit 48 (2003) 5 S. 475–477, ISSN 0720-1214

Becker, H.; Gärtner, C.
Microreplication technologies for polymer-based μ -TAS applications
In: Lab-on-a-Chip: Chemistry in miniaturized synthesis and analysis systems (2003) p. 21–36, ISBN 0-444-51100-8

Bräuer, A.; Dannberg, P.; Zeitner, U.; Mann, G.; Karthe, W.
Application oriented complex polymer microoptics
In: Microsystem Technologies 9 (2003) 5 p. 304–307, ISSN 0946-7076

Danz, N.; Heber, J.; Bräuer, A.; Kowarschik, R.
Fluorescence lifetime of molecular dye ensembles near interfaces
In: Physical Review A 66 (2002) 6 p. 063809-1 – 7, ISSN 0556-2791

Duparré, A.; Gliech, S.; Benkert, N.
VULSTAR: A laser based system for measuring light scattering, transmittance, and reflectance at 157 nm and 193 nm
In: Instruments and Standard Test Procedures for Laser Beam and Optics Characterization Abschlussbericht zum Projekt „CHOCLAB II“, VDI-Technology Center (2003) p. 213–222

Duparré, A.; Gliech, S.; Hultaker, A.
Methodology to evaluate light scatter mechanisms of VUV substrates and coatings
In: Instruments and Standard Test Procedures for Laser Beam and Optics Characterization, Abschlussbericht zum Projekt „CHOCLAB II“, VDI-Technology Center (2003) p. 223–232

Duparré, J.; Göring, R.
Numerical wave optical analysis of microlens array telescopes and comparison with experimental results
In: Applied Optics 42 (2003) 19 p. 3992–4001, ISSN 0003-6935

Duparré, J.; Götz, B.; Göring, R.
Micro-optical 1 x 4 fiber switch for multimode fibers with 600 μ m core diameter
In: Applied Optics 42 (2003) 34 p. 6889–6896, ISSN 0003-6935

Erdem A.; Ultanir, E.A.; Stegemann, G.; Michaelis, D.; Lange, C.; Lederer, F.
Stable Dissipative Solitons in Semiconductor Optical Amplifiers
In: Physics Review Letters 90 (2003) 25 p. 253903, ISSN 0031-9007

Ferrari, M.; Hellige, G.; Schlosser, M.; Frerichs, I.; Damm, C.; Müller, E.; Guyenot, V.; Figulla, H.R.
Percutaneous aortic valve replacement with a self-expandable stent-valve-device in the beating heart – first animal results
In: Journal of the American College of Cardiology 41 (2003) 4a p. 419, ISSN 0735-1097

Ferrari, M.; Hellige, G.; Schlosser, M.; Frerichs, I.; Damm, C.; Müller, E.; Guyenot, V.; Figulla, H.R.
Percutaneous aortic valve replacement with a self-expandable stent-valve-device in the beating heart – in vivo stress testing in an animal model
In: European Heart Journal 24 (2003) Supplement p. 150, ISSN 1520-765X

Ferrari, M.; Schlosser, M.; Frerichs, I.; Müller, E.; Eisold, G.; Tenner, I.; Hellige, G.; Figulla, H.R.
Hämodynamische Eigenschaften eines Aortenklappen-Stents in vivo
In: Zeitschrift für Kardiologie 92 (2003) Supplement 1 p. 392, ISSN 0303-6308

Gatto, A.
Coatings for UV-Free Electron Lasers
In: Optical Interference Coatings, Springer Series in Optical Sciences Volume 88 (2003) p. 335–358, ISBN 3-540-00364-9

Heber, J.; Mühlig, C.; Triebel, W.; Danz, N.; Thielsch, R.; Kaiser, N.
Deep UV laser induced fluorescence in fluoride thin film
In: Applied Physics A 76 (2003) 1 p. 123–128, ISSN 0947-8396

Herda, R.; Liem, A.; Schnabel, B.; Drauschke, A.; Fuchs, H.-J.; Kley, E.-B.; Tünnermann, A.
Efficient side-pumping of fiber lasers using binary gold diffraction gratings
In: Electronics Letters 39 (2003) 3 p. 276–277, ISSN 0013-5194

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
In: Thin Solid Films 442 (2003) 1–2 p. 194–200, ISSN 0040-6090

Houbertz, R.; Fröhlich, L.; Popall, M.; Streppel, U.; Dannberg, P.; Bräuer, A.; Serbin, J.; Chichkov, B.N.
Inorganic-organic hybrid polymers for information technology – from planar technology to 3-D nanostructures
In: Advanced Engineering Materials 5 (2003) 8 p. 551–555, ISSN 1438-1656

Kaiser, N.; Pulker, H. (Editors)
Optical Interference Coatings, Springer Series in Optical Sciences, Volume 88 (2003), ISBN 3-540-00364-9

Kaiser, N.
Some Fundamentals of Optical Thin Film Growth
In: Optical Interference Coatings, Springer Series in Optical Sciences, Volume 88 (2003) p. 59–80, ISBN 3-540-00364-9

Kaufmann, S.; Zeitner, U.D.
Short-periodic measuring of great retardations with a modified Senarmont-method
In: Optik 114 (2003) 8 p. 360–364, ISSN 0030-4026

Liem, A.; Limpert, J.; Zellmer, H.; Tünnermann, A.
100 W single-frequency master-oscillator fiber power amplifier
In: Optics Letters 28 (2003) 17 p. 1537–1539, ISSN 0146-9592

Limpert, J.; Clausnitzer, T.; Liem, A.; Schreiber, T.; Fuchs, H.-J.; Zellmer, H.; Kley, E.-B.; Tünnermann, A.
High average power femtosecond fiber CPA system
In: Optics Letters 28 (2003) 20 p. 1984–1986, ISSN 0146-9592

Limpert, J.; Liem, A.; Zellmer, H.; Tünnermann, A.
500 W continuous-wave fiber laser with excellent beam quality
In: Electronics Letters 39 (2003) 8 p. 645–647, ISSN 0013-5194

Limpert, J.; Schreiber, T.; Nolte, S.; Zellmer, H.; Tünnermann, A.; Iliew, R.; Lederer, F.; Broeng, J.; Vienne, G.; Petersson, A.; Jakobsen, C.
High-power air-clad large-mode-area photonic crystal fiber laser
In: Optics Express 11 (2003) 7 p. 818–823, ISSN 1094-4087

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
In: Optics Express 11 (2003) 22 p. 2982, ISSN 1094-4087

Luthardt, R. G.; Kühmstedt, P.; Walter, M. H.
A new method for the computer-aided evaluation of three-dimensional changes in gypsum materials
In: Dental Materials 19, (2003) 1 p.19–24, ISSN 0109-5641

Michaelis, D.; Peschel, U.; Wächter, C.; Bräuer, A.
Reciprocity theorem and perturbation theory for photonic crystal waveguides
In: Virtual Journal of Nanoscale Science & Technology 8 (2003) 25
In: Physical Review E 68 (2003) 065601(R)

Michaelis, D.; Peschel, U.; Etrich, C.; Lederer, F.
Quadratic cavity solitons – the up-conversion case
In: IEEE Journal of Quantum Electronics 39 (2003) 2 p. 255–268, ISSN 0018-9197

Munzert, P.; Schulz, U.; Kaiser, N.
Transparent thermoplastic polymers in plasma-assisted coating processes
In: Surface and Coatings Technology 174–175 (2003) p. 1048–1052, ISSN 0257-8972

Notni, G.; Kühmstedt, P.
Der digitale Mensch
In: LASER+PHOTONIK (2003) 4 S. 46–48, ISSN 1610-3521

Notni, G.; Kühmstedt, P.
Qualitätskontrolle an Schmiedeteilen – Flächenhafter Soll-Ist-Vergleich
In: Nahbereichsphotogrammetrie in der Praxis (2002) S. 203–206, ISBN 3-87907-385-6

Notni, G.; Kühmstedt, P.
Qualitätskontrolle an Blechbiegeteilen – Maßbestimmung und flächenhafter Soll-Ist-Vergleich
In: Nahbereichsphotogrammetrie in der Praxis (2002) S. 207–210, ISBN 3-87907-385-6

Notni, G.; Kühmstedt, P.
Gesichtsvermessung für die kieferorthopädische Behandlungsplanung und Verlaufskontrolle
In: Nahbereichsphotogrammetrie in der Praxis (2002) S. 241–244, ISBN 3-87907-385-6

Notni, G.H.; Kühmstedt, P.; Heinze, M.; Notni, G.
Simultane Erfassung der 3D-Form und Farbe komplexer Objekte
In: tm – Technisches Messen 70 (2003) 2 S. 79–84, ISSN 0171-8096

Peschel, U.; Michaelis, D.; Weiss, C. O.
Spatial solitons in optical cavities
In: IEEE Journal of Quantum Electronics 39 (2003) 1 p. 51–64, ISSN 0018-9197

Ruske, J.-P.; Werner, E. A.; Zeitner, B.; Tünnermann, A.
Integrated optical ultrashort-pulse picker with high extinction ratio
In: Electronics Letters 39 (2003) 20 p. 1442–1443, ISSN 0013-5194

Schreiber, P.; Höfer, B.; Dannberg, P.
Mikrooptik für die Faserkopplung von Hochleistungs-Diodenlasern
In: Photonik 35 (2003) 6 S. 50, ISSN 1432-9778

Schulz, U.; Schallenberg, U. B.; Kaiser, N.
Symmetrical periods for antireflection coating of plastic optics
In: Applied Optics 42 (2003) 7 p. 1346–1351, ISSN 0003-6935

Skupin, S.; Peschel, U.; Etrich, C.; Lerne, L.; Lederer, F.; Michaelis, D.
Simulation of Femtosecond Pulse Propagation in Air
In: Optical and Quantum Electronics 35 (2003) 4 p. 573–582, ISSN 0306-8919

Stenzel, O.; Heger, P.; Kaiser, N.
The optical response of silver island films
In: Physics, Chemistry and Applications of Nanostructures (2003) p. 158–162, ISBN 981-238-381-6

Stenzel, O.
New Challenges in Optical Coating Design
In: Advances in Solid State Physics 43 (2003) p. 875–887, ISBN 3-540-40150-4

Streppel, U.; Dannberg, P.; Wächter, C.; Bräuer, A.; Kowarschik, R.
Formation of micro-optical structures by self-writing processes in photosensitive polymers
In: Applied Optics 42 (2003) 18 p. 3570–3579, ISSN 0003-6935

Tenner, I.; Ferrari, M.; Lutze, D.; Schlosser, M.; Damm, C.; Guyenot, V.; Tosi, A.; Figulla, H. R.
Vergleich der strömungsdynamischen Eigenschaften von Aortenklappen, Pulmonalklappen und Perikardbioprothesen für den transluminalen Aortenklappensatz
In: Zeitschrift für Kardiologie 92 (2003) Supplement 1 S. 344, ISSN 0303-6308

Tikhonravov, A. V.; Trubetskov, M. K.; Tikhonravov, A. A.; Duparré, A.
Effects of interface roughness on the spectral properties of thin films and multilayers
In: Applied Optics 42 (2003) 25 p. 5140–5148, ISSN 0003-6935

Trompeter, H.; Peschel, U.; Pertsch, T.; Lederer, F.; Streppel, U.; Michaelis, D.; Bräuer, A.
Tailoring guided modes in waveguide arrays
In: Optical Express 11 (2003) 25 p. 3404–3411, ISSN 1094-4087

Ultanir, E.; Michaelis, D.; Lederer, F.; Stegman, G.
Stable Spatial Solutions in Semiconductor Optical Amplifiers
In: Optics Letters 28 (2003) 4 p. 251–253, ISSN 0146-9592

Yulin, S.
Multilayer Coatings for EUV/Soft X-ray Mirrors
In: Optical Interference Coatings, Springer Series in Optical Sciences, Volume 88 (2003) p. 281–308, ISBN 3-540-00364-9

Zeitner, U. D.; Kaufmann, S.; Kley, E.-B.
Mikrooptisches Sensorsystem zur Bestimmung der Doppelbrechung von Textilfasern
In: Photonik 35 (2003) 1 S. 30, ISSN 1432-9778

Vorträge, Poster, Konferenzbeiträge Lectures, Posters, Proceedings

Banse, H.; Beckert, E.; Eberhardt, R.; Stöckl, W.
**Laser beam soldering –
a joining technology for optical assemblies**
Vortrag: Öffentliches Statusseminar der
BMBF-Verbundprojekte Mofa, MOBMO,
BAULIN, IMODAS
14.–15.10.2003, München, Deutschland
In: Tagungsband Statusseminare BMBF Verbund-
vorhaben IESSICA; Mofa; MOBMO; BAULIN;
IMODAS (2003)

Banse, H.; Beckert, E.; Eberhardt, R.; Stöckl, W.
**New assembly technologies
for microoptical systems**
Lecture: Hannover Messe 2003, Forum Micro-
Technology, 7.–12.4.2003, Hannover, Germany

Banse, H.; Beckert, E.; Eberhardt, R.; Stöckl, W.
**Laser beam soldering a new technology for
microoptic system packaging**
Lecture: MST-User Forum, PRODUCTRONICA,
11.–14.11.2003, Munich, Germany

Banse, H.; Beckert, E.; Eberhardt, R.; Stöckl, W.
**Laser beam soldering
of microoptical components**
Lecture: LASER 2003, Photonics Forum,
25.6.2003, Munich, Germany

Beckert, E.
**Integration of optics, electronics and
mechatronics on miniaturized platforms**
Lecture: PRODUCTRONICA, 11.–14.11.2003,
Munich, Germany

Beckert, E.; Damm, C.; Eberhardt, R.; Schreiber, P.
**Integration of optics electronics and
mechatronics on miniaturized platforms**
Lecture: MICRO.tec 2003, 14.–15.10.2003,
Munich, Germany
In: Proceedings MICRO.tec 2003 (2003)
p.179–183

Benkert, N.; Glied, S.; Geßner, H.; Duparré, A.
**Messsystem zur Bestimmung der winkel-
abhängigen Lichtstreuung, Transmission
und Reflexion bei 157 nm und 193 nm**
Poster: 104. Jahrestagung der DGaO,
10.–14.6.2003, Münster, Deutschland

Brakhage, P.; Heinze, M.;
Notni, G.; Kowarschik, R.
**Influence of the pixel size of the camera on
3D measurements with fringe projection**
Lecture: SPIE's International Symposium on
Optical Metrology 23.–26.6.2003, Munich,
Germany
In: SPIE Proceedings Vol. 5144 (2003)
p. 478–483, ISBN 0-8194-5014-6

Bräuer, A.
**Technologische Entwicklungs-
und Anwendungsperspektiven
mikrooptischer Systeme**
Vortrag: Kooperationsforum
„Innovation durch mikrooptische Systeme“,
26.11.2003, München, Deutschland

Bräuer, A.
**Microoptical Systems developed
at Fraunhofer IOF Jena**
Lecture: LASER 2003, Photonics Forum,
25.6.2003, Munich, Germany

Bräuer, A.
**Anwendungsnahe
mikrooptische Technologien**
Vortrag (Eingeladen): Photonic-Net „Optische
Technologien in der Mikrosystemtechnik in
Kooperation mit VDI/VDE-IT“,
Mai 2003, Hannover, Deutschland

Bräuer, A.;
**Anwendungsorientierte
mikrooptische Systeme**
Vortrag: AK „Mikrotechnik Thüringen“,
April 2003, Erfurt, Deutschland

Bräuer, A.; Schreiber, P.
Mikrooptische Systeme
Vortrag: 6. Chemnitzer
Fachtagung Mikrosystemtechnik,
29.–30.10.2003, Chemnitz, Deutschland

Bräuer, A.; Schreiber, P.; Danz, N.
Advances in Microoptical Systems
Invited Lecture: International Symposium on
Modern Optics and Its Applications,
25.–29.8.2003, Bandung, Indonesia

Bräuer, A.; Streppel, U.; Pertsch, T.;
Peschel, U.; Lederer, F.
**Anomalous light propagation and
diffraction control in waveguide arrays**
In: SPIE Proceedings Vol. 4805 (2002) p. 41–48,
ISBN 0-8194-4573-8

Büttner, A., Zeitner, U.D.
**Micro-Optical Component Fabrication
by Laser-Lithography**
Invited Lecture: Micromachine Show,
14.11.2003, Tokyo, Japan

Büttner, A.; Zeitner, U. D.
**Intracavity Beamshaping
in Waveguide Lasers**
Lecture: SPIE International Symposium Optical
Science and Technology,
3.–8.8.2003, San Diego, USA

Clausnitzer, I.; Fuchs, H.-J.; Kley, E.-B.;
Tünnermann, A.; Zeitner, U. D.
**Polarizing metal stripe gratings
for a micro-optical polarimeter**
Lecture: SPIE Annual Meeting Lithographic
and Micromachining Techniques for Optical
Component Fabrication II,
3.–4.8.2003, San Diego, USA
In: SPIE Proceedings Vol. 5183 (2003) p.8–15,
ISBN 0-8194-5056-1

Danz, N.
**Grenzflächeneffekte bei der Fluoreszenz
von organischen Farbstoffmolekülen**
Vortrag: 104. Jahrestagung der DGaO,
10.–14.6.2003, Münster, Deutschland

Duparré, A.
**Untersuchung der Mikro- und
Nanorauhigkeit von Oberflächen mittels
Streulichtmessung**
Vortrag: VDI/VDE Fachtagung
„Mess- und Automatisierungstechnik“,
12.–12.2.2003, Stuttgart, Deutschland
In: Metrologie in der Mikro- und Nanotechnik,
VDI-Berichte 1669 (2003) S. 43–51,
ISBN 3-18-091669-9

Duparré, A.; Singh, B.
Editors
SPIE Proceedings Vol. 5188 (2003),
ISBN 0-8194-5061-8

Duparré, A.; Glied, S.
**Oberflächenanalyse
mit Streulichtmessverfahren**
Vortrag: EFDS Workshop
„Reinigung in der Nano-Oberflächentechnik“,
18.11.2003, Dresden, Deutschland
In: Tagungsband EFDS Workshop
„Reinigung in der Nano-Oberflächentechnik“,
18.11.2003, Dresden, Deutschland

Duparré, J.; Schreiber, P.; Bräuer, A.; Völkel, R.
**Theoretical analysis of an artificial
compound eye for application in ultra flat
digital image acquisition devices**
Poster: Canada-Germany Young Scientists
in Photonics Workshop,
2.–3.9.2003, Ottawa, Canada
Lecture: Canada-Germany Young Scientists
in Photonics Workshop,
2.–3.9.2003, Ottawa, Canada

- Duparré, J.; Göring, G.
Theoretische und experimentelle Untersuchungen zu Mikrolinsenarray-Teleskopanordnungen für variable Strahlableitung
 Poster: 104. Tagung der DGaO, 10.–14.6.2003, Münster, Deutschland
- Duparré, J.; Schreiber, P.; Völkel, R.
Theoretical analysis of an artificial superposition compound eye for application in ultra flat digital image acquisition devices
 Lecture: SPIE's International Symposium on Optical System Design, 29.9.–3.10.2003, St. Etienne, France
- Eberhardt, R.
Aufbau- und Verbindungstechnik mikrooptischer Systeme
 Vortrag: OTTI-Profiforum „Moderne optische Technologien“, 3.–4.12.2003, Regensburg, Deutschland
- Eberhardt, R.
Laser beam soldering – a new technology for microoptical system packaging
 Poster: Fachtagung: Optische Technologien für die Mikrofertigung, PRODUCTRONICA, 11.–14.11.2003, Munich, Germany
- Eberhardt, R.; Banse, H.; Beckert, E.; Stöckl, W.
Laser beam soldering of microoptical components
 Poster: OptiFab 19.–22.5.2003, Rochester, USA
 In: Technical Digest of SPIE – OptiFab 19.–22.5.2003, Rochester, USA (2003) p. 152–154, ISBN 0-8194-5104-5
- Ehlers, H.; Becker, K.; Beckmann, R.; Beermann, N.; Brauneck, U.; Fuhrberg, P.; Gäbler, D.; Jakobs, S.; Kaiser, N.; Kennedy, M.; König, F.; Laux, S.; Müller, J. C.; Rau, B.; Riggers, W.; Ristau, D.; Schäfer, D.; Stenzel, O.
Ion Assisted Deposition Processes: Industrial Network Intlon
 Lecture and Poster: Advances in Optical Thin Films, 30.9.–3.10.2003, St. Etienne, France
- Feigl, T.
EUV and soft X-ray optics
 Lecture: Photonics Forum, Laser 2003, 25.6.2003, Munich, Germany
- Feigl, T.
Schichten für kurze Wellenlängen
 Vortrag: OptoNet Workshop „Optische Schichten“, 22.10.2003, Jena, Deutschland
- Feigl, T.; Frank, M.
Möglichkeiten von Beschichtungen zur Einstellung der spektral selektiven Reflexion von Glasoberflächen
 Vortrag: Workshop „Vogelanprall an Glasflächen“, 28.11.2003, Wien, Österreich
- Feigl, T.; Yulin, S.; Stöckl, W.; Kaiser, N.
Large area sputtering system for EUVL optics
 Poster: 2nd EVVL Symposium, 30.9.–2.10.2003, Antwerp, Belgium
- Feigl, T.; Yulin, S.; Stöckl, W.; Kaiser, N.; Deppisch, G.; Stiegler, J.; Fukarek, W.; Willkommen, U.; Bernitzki, H.; Lauth, H.
Development of a large area sputtering system for EUVL optics
 Lecture: SPIE International Symposium Microolithography, 26.2.2003, Santa Clara, USA
- Feigl, T.; Yulin, S.; Stöckl, W.; Kaiser, N.
New EUV Sputtering System for EUVL optics – first results
 Lecture: Ukrainian-German EUV Workshop, 2.9.2003, Charkov, Ukraine
- Ferrari, M.; Hellige, G.; Schlosser, M.; Damm, C.; Frerichs, I.; Eisold, G.; Lang, K.; Müller, E.; Guyenot, V.; Figulla, H. R.
Erste transluminale Implantation einer Aortenklappe am schlagenden Herzen im Tierexperiment
 Vortrag: Statusseminar, 29.8.2003, Bonn, Deutschland
- Ferrari, M.; Hellige, G.; Schlosser, M.; Frerichs, I.; Damm, C.; Müller, E.; Guyenot, V.; Figulla, H. R.
Percutaneous aortic valve replacement with a self-expandable stent-valve-device in the beating heart – in vivo stress testing in an animal model
 Lecture: ESC Congress 2003, 30.8.–3.9.2003, Vienna, Austria
- Ferrari, M.; Schlosser, M.; Frerichs, I.; Müller, E.; Eisold, G.; Tenner, I.; Hellige, G.; Figulla, H. R.
Hämodynamische Eigenschaften eines Aortenklappen-Stents in vivo
 Vortrag: 69. Frühjahrstagung 2003 der Deutschen Gesellschaft für Kardiologie – Herz- und Kreislaufforschung, 24.–26.4.2003, Mannheim, Deutschland
- Flemming, M.; Hultaker, A.; Reihls, K.; Duparré, A.
Modeling and characterizing thin film nanostructures for ultrahydrophobic surfaces with controlled optical scatter
 Lecture: Optical Systems Design 2003, 29.9.–3.10.2003, St. Etienne, France
- Flemming, M.; Kaless, A.; Reihls, K.; Duparré, A.
Bewertung nanostrukturierter funktionaler Oberflächen: visuelle Inspektion vs. laserbasierte Messung
 Vortrag: 104. Jahrestagung der DGaO, 10.–14.6.2003, Münster, Deutschland
- Flemming, M.; Reihls, K.; Duparré, A.
Characterization procedures for nanorough ultrahydrophobic surfaces with controlled optical scatter
 Lecture: SPIE's 48th Annual Meeting Optical Science and Technology, 3.–8.10.2003, San Diego, USA
 In: SPIE Proceedings, Vol. 5188 (2003) p. 246–253, ISBN 0-8194-5061-8
- Gärtner, C.; Anton, B.; Rötting, O.
The Microfluidic Tool Box – Examples for Fluidic Interfaces and Standardization Concepts
 Poster: Nanotech 2003, 25.–27.11.2003, Montreux, Switzerland
 In: MICRO.tec 2003 : Technologies-Engineering-Applications p. 387–390, ISBN 3-8007-2791-9
 In: Proceedings: Micro System Technologies (2003) p. 424–430
- Gärtner, C.; Becker, H.; Anton, B.; O'Neil, A. P.; Rötting, O.
Polymer-based microfluidic devices – Examples for Fluidic Interfaces and Standardization Concepts
 Lecture: Conference: Microfluidics, BioMEMS and Medical Microsystems 27.–29.1.2003, San Jose, California, USA
 In: SPIE Proceedings Vol. 4982 (2003) p. 99–104, ISBN 0-8194-4782-X
- Gatto, A.; Kaiser, N.; Günster, S.; Ristau, D.; Sarto, F.; Trovo, M.; Danailov, M.
Synchrotron radiation induced damages in optical materials
 In: SPIE Proceedings Vol. 4932 (2003) p. 366–372, ISBN 0-8194-4727-7
- Günster, St.; Blaschke, H.; Ristau, D.; Gatto, A.; Heber, J.; Kaiser, N.; Diviacco, B.; Marsi, M.; Trovo, M.; Sarto, F.; Scaglione, S.; Masetti, E.
Radiation resistance of optical materials against synchrotron radiation
 In: SPIE Proceedings Vol. 4932 (2003) p. 422–428, ISBN 0-8194-4727-7
- Gliech, S.; Gebner, H.; Duparré, A.
System for measuring angle resolved and total light scattering, transmittance and reflectance at 193 nm and 157 nm
 In: SPIE Proceedings, Vol. 4932 (2002) p. 452–457, ISBN 0-8194-4727-7

Gliech, S.; Gessner, H.; Hultaker, A.; Duparré, A.
**157 nm and 193 nm scatter,
R and T measurement technique**
Lecture: SPIE International Symposium
Optical Systems Design,
30.9.–3.10.2003, St. Etienne, France

Gliech, S.; Hultaker, A.; Benkert, N.; Duparré, A.
**157 nm light scattering effects
and nanostructure of CaF₂**
Lecture: SPIE's 48th Annual Meeting Optical
Science and Technology,
3.–8.10.2003, San Diego, USA

Götz, B.; Helm, O.; Wächter, C.
**Microoptical components
for optical-signal transmission**
Lecture: MICRO.tec,
Öffentliches Statusseminar „MOBMO“,
14.–15.10.2003, München, Deutschland
In: Broschüre des VDE zur Abschlusspräsentation
MOBMO, MICRO.tec 2003 (2003) p. 183–188

Guyenot, V.
Mikrowelten – Mikroteile – Mikromontage
Vortrag: IHK Tag der Wissenschaft
6.3.2003, Erfurt, Deutschland

Guyenot, V.
**35 Jahre Justierdreien –
Ein Beitrag zur Montagetechnologie von
Hochleistungsobjektiven HLO**
Vortrag: Verein Technikgeschichte e. V.
29.4.2003, Jena, Deutschland

Guyenot, V.
**Vom Prototyp zur
automatisierten Mikrooptik-Montage**
Vortrag: Oberseminar TU München,
Fakultät für Elektrotechnik,
23.6.2003, München, Deutschland

Guyenot, V.
Adjustment of fiber-optical components
Lecture: LASER 2003, Photonics Forum,
25.6.2003, Munich, Germany

Guyenot, V.
Mikro- und Optikmontage
Vortrag: Leica Camera,
10/2003, Solms, Deutschland

Guyenot, V.; Gebhardt, A.
**Mikrozerspannung (Diamantdrehen,
Mikrofräsen) zur Erzeugung
finish-bearbeiteter Flächen**
Vortrag: Workshop EFDS & UPOB „Innovative
Oberflächen für Uhren und Präzisionstechnik“,
9.10.2003, Dresden, Deutschland
In: Proceedings zum Workshop EFDS & UPOB
„Innovative Oberflächen für Uhren und
Präzisionstechnik“,
9.10.2003, Dresden, Deutschland (2003)

Guyenot, V.; Siebenhaar, C.;
Damm, C.; Gebhardt, A.
**Some thoughts on lens assembly
and lens centering**
Poster: OptiFab 19.–22.5.2003, Rochester, USA
In: SPIE Vol. TD02 (2003) p. 149–151,
ISBN 0-8194-5104-5

Heber, J.; Gatto, A.; Kaiser, N.
Spectrophotometry in the vacuum-UV
In: SPIE Proceedings Vol. 4932 (2003)
p. 544–548, ISBN 0-8194-4727-7

Heber, J.; Mühlig, C.; Triebel, W.;
Danz, N.; Thielsch, R.; Kaiser, N.
Luminescence of UV thin films
In: SPIE Proceedings Vol. 4932 (2003)
p. 269–275, ISBN 0-8194-4727-7

Heger, P.; Stenzel, O.; Kaiser, N.
Metal island films for optics
Lecture: Advances in Optical Thin Films,
30.9.–3.10.2003, St. Etienne, France

Heger, P.; Stenzel, O.; Kaiser, N.
**The spectral response of
plasmon resonant silver island films**
Lecture: Canada-Germany Young Scientists
in Photonics Workshop,
2.9.2003, Ottawa, Canada

Houbertz, R.; Domann, G.; Serbin, J.;
Chichkov, B.N.; Streppel, U.; Dannberg, P.;
Bräuer, A.
**Inorganic-organic hybrid polymers for
information technology to 3-D nanostructures for
application in photonic devices**
Poster: Nanofair,
International Nanotechnology Symposium,
20.–21.11.2003, Dresden, Germany

Hultaker, A.; Benkert, N.; Gliech, S.; Duparré, A.
**Characterizing CaF₂ for VUV optical
components: roughness, surface scatter
and bulk scatter**
Lecture: 7th International Workshop
on Laser Beam and Optics Characterization,
18.–20.9.2003, Boulder, USA
In: SPIE Proceedings Vol. 4932 (2003)
p. 444–451, ISBN 0-8194-4727-7

Hultaker, A.; Gliech, S.; Benkert, N.; Duparré, A.
**VUV light scattering measurement
of substrates and thin film coatings**
Lecture: SPIE International Symposium Optical
Science and Technology SPIE's 48th Annual
Meeting, 3.–8.8.2003, San Diego, USA
In: SPIE Proceedings Vol. 5188 (2003)
p. 115–122, ISBN 0-8194-5061-8

Hultaker, A.; Gliech, S.; Gessner, H.; Duparré, A.
**Characterization of CaF₂ substrates
for VUV fluoride coatings**
Lecture: SPIE's International Symposium
Optical Systems Design,
30.9.–3.10.2003, St. Etienne, France

Kaiser, N.
**Beispiele industrieller
Gemeinschaftsforschung**
Vortrag (Eingeladen):
Workshop Materialtechnik und -prüfung (MTP),
29.1.2003, Rostock, Deutschland

Kaiser, N.
Nanoschichtsysteme für die Optik
Vortrag (Eingeladen):
Jenaer Carl-Zeiss-Optikkolloquium,
18.3.2003, Jena, Deutschland

Kaiser, N.
Design optischer Schichten
Vortrag (Eingeladen):
6. OTTI-Fachforum Schichten auf Glas,
16.4.2003, Bamberg, Deutschland

Kaiser, N.
**Optische Schichten für
den UV-Spektralbereich**
Vortrag (Eingeladen):
6. OTTI-Fachforum Schichten auf Glas,
16.4.2003, Bamberg, Deutschland

Kaiser, N.
Materials for optical coatings
Invited Lecture: Glass Workshop/Umicore,
27.3.2003, Zoersel, Belgium

Kaiser, N.
**Optical Coatings for the DUV-, VUV-, EUV-
and Soft X-Ray Spectral Region**
Invited Lecture: 46th Annual Society of
Vacuum Coaters, Technical Conference
Short Course C-316,
4.5.2003, San Francisco, USA

Kaiser, N.
The future of optical coatings
Lecture: LASER 2003, Photonics Forum,
25.6.2003, Munich, Germany

Kaiser, N.
**Improved reflectivity and stability
of Sc/Si multilayers**
Lecture: Hugh Level Expert Meeting,
Design and Technology of Coatings,
23.9.2003, Bonassola, Italy

Kaiser, N.
Optik metallischer Nanostrukturen
Vortrag (Eingeladen): OTTI-Profiforum Nano-
technologie in der industriellen Anwendung,
4.11.2003, Würzburg, Deutschland

- Kaiser, N.
Struktur und Eigenschaften dünner Schichten für die Optik
Vortrag (Eingeladen): Arbeitsgruppe Dünnschichttechnologie (Prof. Mergel, Prof. Buck), 16.1.2003, Universität Essen, Deutschland
- Kaiser, N.; Yulin, S.; Feigl, T.; Bernitzki, H.; Lauth, H.
EUV and soft X-ray multilayer optics
Lecture: „Advances in Optical Thin Films (OSD02)“ at SPIE’s Optical Design Symposium, 30.9.2003, St. Etienne, France
- Kalkowski, G.; Damm, C.; Peschel, T.; Leitel, A.; Kunze, N.
Segmented lens mount for projection optics
Poster: OptiFab 19.–22.05.2003 Rochester, USA
In: Technical Digest of SPIE – OptiFab 19.–22.5.2003 Rochester, USA (2003) p. 155–157, ISBN 0-8194-5104-5
- Kalkowski, G.; Kamm, F. M.
Electrostatic chucking: EUV issues and related experiences at IOF
EUV Mask Task Force Meeting, Santa Clara, 24.2.2003, Santa Clara, USA
- Kalkowski, G.
LTEM electrostatic chucks: vacuum and humidity forces
EUV mask standards & chucking workshop, 3.10.2003, Antwerp, Belgium
- Karthe, W.
Einfluss von Mikro- und Nanotechnologie auf Sensor- und Automatisierungstechnik
VDI-Fachtagung, 13.3.2003 Jena, Deutschland
- Karthe, W.
Optische Mikrosysteme
VDE-Forum Dresden Mikroelektronik, 5.6.2003, Dresden, Deutschland
- Kudaev, S.; Schreiber, P.; Duparré, J.
High-sensitive axial displacement sensor with multimode fiber
Vortrag: 104. Tagung der DGaO, 10.–12.6.2003, Münster, Deutschland
- Kühmstedt, P.
Praxisbericht: Multi-View 3-D-Messsysteme in Rapid Prototyping- und Qualitätssicherungs-Prozessketten
Vortrag: VDI Wissensforum, Seminar mit Praktikum „Optische 3-D-Messtechnik“, 20.–21.11.2003, Fraunhofer IFF, Magdeburg, Deutschland
- Kühmstedt, P.
Robuste multi-view 3-D-Messsysteme in Rapid Prototyping- und Qualitätssicherungs-Prozessketten
Vortrag: VDI Wissensforum, Seminar mit Praktikum, „Optische 3-D-Messtechnik für die Qualitätssicherung in der Produktion“, 3.–4.7.2003, IOF, Jena, Deutschland
- Kühmstedt, P.; Gerber, J.; Heinze, M.; Notni, G.
Analysis of the measurement capability of optical fringe projection systems
Lecture: SPIE’s International Symposium on Optical Metrology 23.–26.6.2003 Munich, Germany
In: SPIE Proceedings Vol. 5144 Vol. 4440 (2003) p. 728–736, ISBN 0-8194-5014-6
- Kühmstedt, P.; Notni, G.; Heinze, M.
Self calibrating 3D-measurement system with fixed and moved cameras – the concept of virtual reference points
Poster: SPIE’s International Symposium on Optical Metrology, optical Measurement Systems for industrial Inspection III, 23.–26.6.2003, Munich, Germany
- Kühmstedt, P.; Notni, G.; Himmelreich, M.; Heinze, M.
Flexible 3-D-Rundumvermessung – Das Konzept der virtuellen Passmarken
Vortrag: 104. Jahrestagung der DGaO, 10.–14.6.2003, Münster, Deutschland
- Liem, A.; Limpert, J.; Höfer, S.; Zellmer, H.; Tünnermann, A.
90-W single-frequency fiber amplifier
Invited Lecture, Invited Paper: Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO) 1.–6.6.2003, Baltimore, USA
- Limpert, J.; Tünnermann, A.
Perspectives of fiber lasers and amplifiers in high power operation
Lecture tutorial: OSA Annual Meeting, 5.–9.10.2003, Tucson, USA
- Limpert, J.; Liem, A.; Schreiber, T.; Zellmer, H.; Tünnermann, A.
Power and energy scaling of fiber lasers based on ytterbium-doped large-mode-area fiber
Invited Lecture, Invited Paper: Photonics West 2003, San Jose, USA
- Limpert, J.; Schreiber, T.; Liem, A.; Zellmer, H.; Tünnermann, A.
High-power femtosecond fiber laser system
Invited Lecture, Invited Paper: Photonics West 2003, San Jose, USA
- März, R.; Burger, S.; Hermann, C.; Michaelis, D.
Waveguide by dielectric Waveguides and Photonic Crystals
Vortrag: Kleinheubacher Tagung der U.R.S.I (International Union of Radio Science), 29.9.–2.10.2003, Kleinheubach, Deutschland
- Michaelis, D.; Peschel, U.; Wächter, C.; Bräuer, A.
A photonic crystal waveguide as a strongly coupled discrete system
Lecture: ECIO 2003, 2.–4.4.2003, Prague, Czech Republic
- Michaelis, D.; Peschel, U.; Wächter, C.; Bräuer, A.
A photonic crystal waveguide as a strongly coupled discrete system
Lecture: CLEO EUROPE EQEC, 23.–26.6.2003, Munich, Germany
- Michaelis, D.; Peschel, U.; Wächter, C.; Bräuer, A.
Coupling Coefficients of Photonic Crystal Waveguides
Lecture: Photonics West 2003, 25.–31.1.2003, San Jose, USA
In: SPIE Proceedings Vol. 4987(2003) p. 114–125, ISBN 0-8194-4787-0
- Michaelis, D.; Peschel, U.; Wächter, C.; Bräuer, A.; Lederer, F.
Photonic crystal waveguides in highly dispersive materials
Lecture: ECIO 2003, 2.–4.4.2003, Prague, Czech Republic
- Mohaupt, M.; Eberhardt, R.; Beckert, E.
Module des Greiferbaukastens – Greifsystem für Lichtleitfasern
Vortrag: Abschlusspräsentation BMBF Verbundprojekt, Greiferbaukasten für die Montage von Mikrosystemen, auf Messe Motek, 23.9.–26.9.2003, Sinsheim, Deutschland
- Mohaupt, M.; Eberhardt, R.; Beckert, E.; Banse, H.; Siebenhaar, C.; Guyenot, V.
Assembly of optical fibers
Lecture: MICRO SYSTEM Technologies 2003, 7.–8.10.2003, Frankfurt, Germany
In: Proceedings of MICRO SYSTEM Technologies 2003 (2003) p. 94–101, ISBN 3-7723-7020-9
- Müller, E.; Brode, W.; Buß, W.; Heymel, A.; Kaschlik, K.; Seifert, D.; Weiland, E.
LTCC materials and technology for anodic bonding and embossing optical structures
Poster: 8th European Congress and Exhibition on Advanced Materials and Processes EUROMAT, 1.–5.9.2003, Lusanne, Switzerland

Munzert, P.; Schulz, U.; Kaiser, N.
PVD-Beschichtung von hochtemperaturbeständigen Polymeren für die Optik
Vortrag: Optonet Workshop
„Optische Schichten“,
Oktober 2003, Jena, Deutschland

Munzert, P.; Schulz, U.; Kaiser, N.
Hochtransparente Thermoplaste in plasma-gestützten PVD-Beschichtungsprozessen
In: Polymerwerkstoffe 2002: Eigenschaften, Verarbeitung, Modifizierung, Anwendung, (2002) S. 544–547, ISBN 3-86010-656-2

Munzert, P.; Schulz, U.; Kaiser, N.
PVD-Coating for optical applications on temperature resistant thermoplastics
Lecture: SPIE's International Symposium on Optical System Design
29.9.–3.10.2003 St. Etienne, France

Notni, G.
Optische 3-D-Datenerfassung und -verarbeitung – Messen im 3-D-Bild
Vortrag: Seminar ZBS Ilmenau,
12.–13.09.2003 Ilmenau, Deutschland

Notni, G.
Streifenprojektion
Vortrag: VDI Wissensforum, Seminar mit Praktikum „Opt. 3-D-Messtechnik“,
20.–21.11.2003, Fraunhofer IFF, Magdeburg, Deutschland

Notni, G.
Automatisierte multi-view 3-D-Messtechnik auf der Basis der Phasogrammetrie
Vortrag: DAKOM 2003,
20.11.2003 Darmstadt, Deutschland
In: Tagungsband DAKOM 2003

Notni, G.
Streifenprojektionstechniken
Vortrag: Optische 3-D-Messtechnik für die Qualitätssicherung in der Produktion,
3.–4.7.2003, IOF, Jena, Deutschland

Notni, G.; Kühmstedt, P.; Heinze, M.;
Himmelreich, M.
Phasogrammetrische 3D-Messsysteme und deren Anwendung zur Rundumvermessung
Vortrag: 2. Oldenburger 3D-Tage,
27.–28.2.2003 FH Oldenburg/JAPG, Deutschland
In: Photogrammetrie – Laserscanning – Optische 3D-Messtechnik: Beiträge der Oldenburger 3D-Tage 2003 (2003) S. 21–32, ISBN 3-87907-404-6

Notni, G.H.; Kühmstedt, P.; Notni, G.
Nutzung von Farbinformationen zur 3D-Datenauswertung
Poster: 104. Jahrestagung der DGaO,
10.–14.6.2003 Münster, Deutschland

Notni, G.H.; Notni, G.;
Digital fringe projection in 3D Shape Measurement – an Error Analysis
In: SPIE Proceedings Vol. 5144 (2003)
p. 372–380, ISBN 0-8194-5014-6
Lecture: SPIE's International Symposium on Optical Metrology,
23.–26.6.2003, Munich, Germany

Peschel, U.; Michaelis, D.; Bakonyi, Z.;
Onishukov, G.; Lederer, F.
Dissipative solitons in communication lines
Invited Lecture: The Third IMACS International Conference on nonlinear Evolution Equations and Wave Phenomena: Computation and Theory,
7.–10.4.2003, Athens, Georgia, USA

Popall, M.; Fröhlich, L.; Houbertz, R.; Streppel, U.;
Dannberg, P.; Westernhöfer, S.; Gale, M.
ORMOCERS - Inorganic-organic Hybrid Materials for Integrated, Diffractive and Refractive Micro Optics: Synthesis, Processing and Applications in Optical Components
Invited Lecture: DGG-Symposium: „Processing and Applications of Optical Components“,
27.–26.5.2003, Leipzig, Germany

Reihs, K.; Malkomes, N.; Müller, P.; Claessen, R.;
Cavaleiro, P.; Stahlschmidt, O.; Renker, S.;
Duparré, A.
Durable „self cleaning“ coatings in optical quality
Lecture: GPD Glass proceedings days,
15.–18.6.2003, Tampere, Finland

Riehemann, S.; Palme, M.;
Kühmstedt, P.; Notni, G.
Einsatz von Mikrodisplay-basierten Projektionssystemen in der optischen Messtechnik
Vortrag: 104. Jahrestagung der DGaO,
10.–14.6.2003, Münster, Deutschland

Riehemann, S.; Palme, M.;
Kühmstedt, P.; Notni, G.
LCoS based Projection Systems for Optical Metrology
Lecture: SID International Symposium
18.–23.5.2003, Baltimore, USA
In: SID International Symposium Digest of Technical Papers, Volume XXXIV, Book I 34
(2003) p. 256–259, ISSN 0003-966X

Risse, S.
Air bearings made of glass for laser beam deflection
Lecture: LASER 2003, Photonics Forum,
25.6.2003, Munich, Germany

Schäfers, F.; Yulin, S.; Feigl, T.; Kaiser, N.
At-wavelength Metrology on Sc-based Multilayers for the VUV and Water Window
Lecture: International Symposium on Optical Science and Technology,
3.8.2003, San-Diego, CA USA
In: SPIE Proceedings Vol. 5188 (2003)
p. 138–145, ISBN 0-8194-5061-8

Schmidt, J.-P.; Anders, K.; Siebenhaar, C.;
Vogel, J.; Kaulfersch, E.
Bonding and Soldering for Precision Joining of Microoptics
Lecture: MICRO.tec,
Öffentliches Statusseminar „MOBMO“,
14.–15.10.2003, Munich, Germany

Schulz, U.
Optical coatings on plastic
Lecture: LASER 2003, Photonics Forum,
25.6.2003, Munich, Germany

Schulz, U.
Polymere in plasmagestützten Beschichtungsverfahren
Vortrag: OTTI-Seminar
„Neue Oberflächen für Kunststoffe“,
26.3.2003 Bamberg, Deutschland

Schulz, U.
PVD-Beschichtung von Kunststoffen für optische Anwendungen
Vortrag: OTTI-Seminar Schichten auf Glas,
10.9.2003, Regensburg, Deutschland

Schulz, U.
Beschichtung transparenter Polymere mit hoher thermischer Beständigkeit
Vortrag: 11. NDVaK, Neues Dresdner Vakuumtechnisches Kolloquium zur Beschichtung und Oberflächenmodifizierung von Kunststoffoberflächen,
15.–16.10.2003, Dresden, Deutschland

Schulz, U.
Optical coatings on plastic
Lecture: International expert meeting „Design and Technology of Coatings“,
24.–26.9.2003, Bonassola, Italy

Schulz, U.; Kaiser, N.
Thermal stress in antireflective coatings on polymer substrates
Lecture: 46th Annual SVC Technical Conference,
3.–8.5.2003, San Francisco, USA

Stenzel, O.
New Challenges in Optical Coating Design
Vortrag (Eingeladen): Frühjahrstagung des Arbeitskreises Festkörperphysik bei der DPG,
24.–28.3.2003, Dresden, Deutschland

Stenzel, O.
**Oberflächenplasmonen
in dünnen Schichten II**
Vortrag: OptoNet- Workshop
„Optische Schichten“,
22.10.2003 IOF, Jena, Deutschland

Stenzel, O.; Kaiser, N.
**Laterally heterogeneous optical films as
design tools for reflectors and absorbers**
Lecture: Advances in Optical Thin Films,
30.9.–3.10.2003, St. Etienne, France

Stenzel, O.; Kaiser, N.
**Stopband position and width in resonant
grating waveguide structures**
Poster: CLEO Europe 2003,
22.–27.6.2003, Munich, Germany

Stenzel, O.; Heger, P.; Kaiser, N.
The optical response of silver island films
Lecture: Nanomeeting 2003,
20.–23.5.2003, Minsk, Belarus
In: Physics, Chemistry and Applications
of Nanostructures (2003)
p. 158–162, ISBN 981-238-381-6

Streppel, U.; Michaelis, D.; Bräuer, A.
**UV induced self organization
in optical polymers**
Lecture: International Symposium
on Modern Optics and Its Applications,
25.–29.8.2003, Bandung, Indonesia

Streppel, U.; Dannberg, P.; Wächter, C.;
Michaelis, D.; Bräuer, A.; Kowarschik, R.
**Influence and utilization of UV-induced
refractive index changes of photopolymers
for the fabrication of 3-D micro-optical
elements**
Lecture: Photonics West 2003,
25.–31.1.2003, San Jose, USA
In: SPIE Proceedings Vol. 4991 (2003)
p. 321–332, ISBN 0-8194-4791-9

Streppel, U.; Michaelis, D.; Bräuer, A.
**Self-organized filamentation of
photoresponsive polymers during UV curing**
Lecture: Photonics West 2003,
25.–31.1.2003, San Jose, USA
In: SPIE Proceedings Vol. 4991 (2003)
p. 467–477, ISBN 0-8194-4841-9

Tenner, I.; Ferrari, M.; Lutze, D.; Schlosser, M.;
Damm, C.; Guyenot, V.; Tosi, A.; Figulla, H. R.
**Vergleich der strömungsdynamischen
Eigenschaften von Aortenklappen,
Pulmonalklappen und Perikardbioprothesen
für den transluminalen Aortenklappenersatz**
Vortrag: 69. Frühjahrstagung 2003 der
Deutschen Gesellschaft für Kardiologie –
Herz- und Kreislaufforschung,
24.–26.4. 2003, Mannheim, Deutschland

Trutschel, U.; Langbein, U.; Wächter, C.;
Duguay, M.
**Modesolver für zylindersymmetrische
Wellenleiterstrukturen mittels Constraint
Optimierung**
Vortrag und Poster: 104. Jahrestagung der
DGaO, 10.–14.06.03 Münster, Deutschland

Tünnermann, A.
Faserlaser
Vortrag: 327. JENAER Carl-Zeiss-
Optikkolloquium,
4.11.2003, Jena, Deutschland

Tünnermann, A.; Kley, E.-B.
**Photonics crystals in low index contrast
for application in telecommunication**
Invited Lecture: 9th Microoptics
Conference MOC'03, 2
8.–31.10.2003, Tokyo, Japan

Wächter, C.
**Microring resonators:
materials, technologies and limits**
Invited Lecture: International School of Quantum
electronics, 39th Course Microresonators as
building blocks for VLSI Photonics,
18.–25.10.2003, Erice, Italy

Yang, M.
**Uniformity analysis and design optimization
of multi-layer thin film filter used in fiber
optics communication system**
Poster: SPIE's International Symposium
on Optical System Design
29.9.–3.10.2003, St. Etienne, France

Yulin, S.; Feigl, T.; Kaiser, N.
EUV and soft X-ray multilayer optics
Lecture: XI International Conference
on Laser Optics,
2.7.2003, St. Petersburg, Russia

Yulin, S.; Kuhlmann, T.; Feigl, T.; Kaiser, N.
**Thermal stability of Cr/Sc multilayers
for the soft X-ray range**
In: SPIE Proceedings, Vol. 4782 (2002)
p. 285–291, ISBN 0-8194-4549-5

Yulin, S.; Feigl, T.; Kaiser, N.
Development of multilayer optics in IOF
Lecture: 4.9.2003, National Technical University
„KhPI“, Kharkiv, Ukraine

Yulin, S.; Schäfers, F.; Feigl, T.; Kaiser, N.
**High – performance Cr/Sc multilayers
for the soft X-ray range**
Poster: International Symposium on Optical
Science and Technology,
7.8.2003, San-Diego, USA

Yulin, S.; Schäfers, S.; Feigl, T.; Kaiser, N.
**Enhanced reflectivity and
stability of Sc/Si multilayers**
Lecture: International Symposium on Optical
Science and Technology,
8.8.2003, San-Diego, USA

Zeitner, U. D.
**Laser-Mode Engineering by
Generalized Resonator Concepts**
Invited Lecture: SPIE International Symposium
Optical Science and Technology SPIE's 48th
Annual Meeting, 3.-8.8.2003, San Diego, USA

Zeitner, U. D.; Kaufmann, S.; Kley, E.-B.
**Micro-optical sensor system for birefringence
characterization of textile-fibers**
Lecture: SPIE International Symposium Optical
Science and Technology SPIE's 48th
Annual Meeting,
3.–8.8.2003, San Diego, USA

Zubaryev, Y. M.; Kondratenko, V. V.;
Bugayev, Y. A.; Pinegin, V. I.; Sevrjukova, V. A.;
Kaiser, N.; Feigl, T.; Yulin, S.
**The structure and optical properties
of X-ray multilayer mirrors**
Lecture: 13.11.2003, IOF, Jena, Germany

Bahn/Busverbindung

(ca. 20 Minuten inkl. Gehweg)
Ab Bahnhof Jena-Paradies (Nord-Süd-
verbindung) ca. 5 Minuten Fußweg in
die Innenstadt. Von dort aus ab Teich-
graben 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-Westverbin-
dung) ca. 1 Minute zur Haltestelle
Magdelstieg, dann die gleiche Bus-
verbindung nutzen.

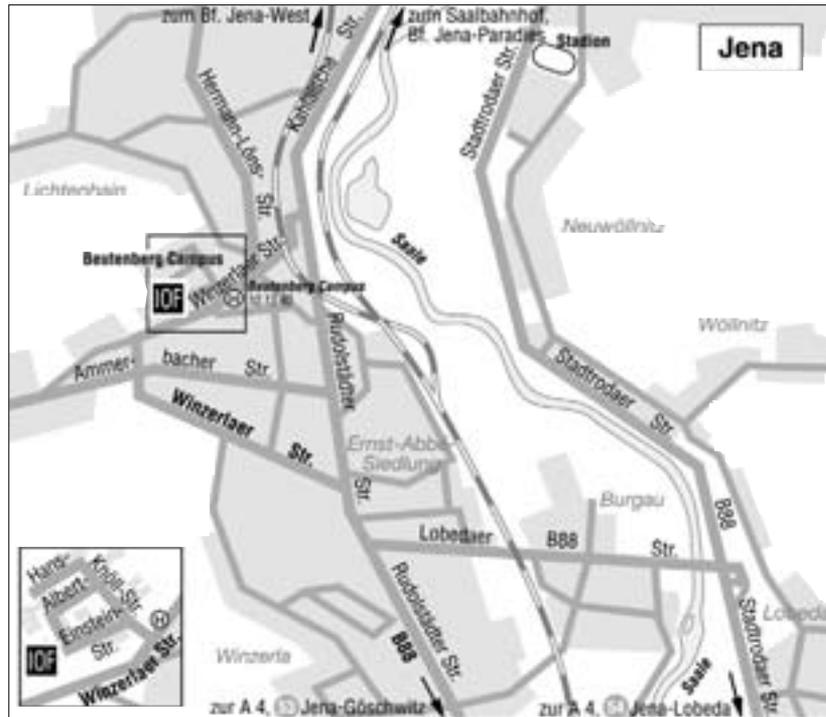
Auto

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
A4 Richtung Frankfurt wechseln; diese
dann bei Jena-Göschwitz verlassen,
weiter siehe Auto.

Oder ab Flughafen Erfurt auf der Auto-
bahn A 4 Richtung Dresden bis Abfahrt
Jena-Göschwitz.



Direction of Fraunhofer IOF

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 Magdelstiege. 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 A9 motorway to the south (direction Munich) up to the Hermsdorfer Kreuz. Here you have to change the motorway, follow the A4 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.

Impressum

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

Presse und Öffentlichkeitsarbeit Press and Public Relation

Dipl.-Ing. Annedore Munde
Telefon: +49 (0) 36 41/8 07-3 70
E-Mail: annedore.munde@iof.fraunhofer.de

Gestaltung und Druck Graphic design and Print

Schneider Media GmbH
Haarbergstraße 47
99097 Erfurt

