Tätigkeitsbericht
2000/2001

Institut für Oberflächenmodifizierung e. V.
– Wissenschaftsgemeinschaft Gottfried Wilhelm Leibniz –

Institut für Oberflächenmodifizierung e. V.
– Wissenschaftsgemeinschaft Gottfried Wilhelm Leibniz –

Post:	Permoserstraße 15, 04303 Leipzig
Versand:	Permoserstraße 15, 04318 Leipzig
Telefon:	0341 – 235 2308
Telefax:	0341 – 235 2313
E-Mail:	brausch@rz.uni-leipzig.de
	mehnert@rz.uni-leipzig.de
http://	www.iom.uni-leipzig.de
Vorstand:	Prof. Dr. Bernd Rauschenbach
	Prof. Dr. Reiner Mehnert

Titelseite: Beispiele der ultragenauen Formgebung und 3D-Strukturübertragung mittels Ionen- und Plasmastrahltechnik. Applikationsfelder sind die Optikhochtechnologie, die Mikrooptik und die Mikrosystemtechnik bis in den Nanometerbereich.
Strahlenhärtbare Acrylate oder Epoxide werden in Verbindung mit UV- und Elektronenstrahlen als Funktionsschichten auf flexiblen oder festen Substraten abgeschieden und vernetzt. Beispiel dafür sind UV-härtbare Druckfarben, Trenn- und Barriereschichten sowie strukturierte Schichten.

Vorwort

Das Institut für Oberflächenmodifizierung e. V. (IOM) Leipzig legt mit dem Jahresbericht 2000/2001 einen Überblick über seine wissenschaftlichen, technologischen und applikativen Ergebnisse und Aktivitäten vor. Diesem Jahresbericht können Sie entnehmen, dass das Institut für Oberflächenmodifizierung e. V. Leipzig eine außerordentlich erfreuliche Entwicklung in den letzten zwei Jahren durchlaufen hat. Dem Auftrag des Instituts verpflichtet, angewandte Grundlagenforschung zur Wechselwirkung von Strahlung und Materie zu betreiben, können die Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter des Institutes auf eine Reihe von hervorragenden Forschungs- und Entwicklungsergebnissen verweisen.

Im Januar 2001 wurde in der abschließenden Stellungnahme des Wissenschaftsrates der Bundesrepublik Deutschland zur Evaluation aller Institute der Wissenschaftsgemeinschaft Gottfried Wilhelm Leibniz dem Institut für Oberflächenmodifizierung e. V. diese hervorragende Entwicklung bestätigt. Es konnte u. a. festgestellt werden, dass erfolgreiche Forschungsarbeit geleistet wird, die wissenschaftliche Qualität der Forschungsarbeiten sehr gut ist, das Institut in der materialwissenschaftlichen Forschung in Deutschland eine herausgehobene Stellung einnimmt, erfolgreich naturwissenschaftliche Grundlagenforschung und technisch-industrielle Anwendung verknüpft und auf eine beeindruckende Drittmittelbilanz verwiesen werden kann.

Seit Mitte des Jahres 2000 hat die Leitung des Institutes für Oberflächenmodifizierung e. V. der neue Direktor, Herr Prof. Dr. B. Rauschenbach, von seinem Vorgänger, Herrn Prof. Dr. F. Bigl, übernommen.

Eine Entspannung der extrem begrenzten Büro- und Laborkapazität am Institut wurde durch den Neubau eines Forschungs- und Technologiegebäudes im Herbst 2001 erzielt. Mit Unterstützung der Bundesrepublik und des Freistaates Sachsen wurde fristgerecht und im Rahmen der vorgegebenen Mittel ein mehr als 2000 qm umfassendes Gebäude errichtet, das u. a. eine Technologiehalle für die Aufnahme von Pilotanlagen, einen Reinraum höchster Reinheitsklasse, physikalische und chemische Laboratorien sowie diverse Büroräume für Wissenschaftler und die Verwaltung umfasst.

Die Publikationstätigkeit am Institut hat sich mit einer wachsenden Zahl von Veröffentlichungen in international angesehenen Zeitschriften sehr erfreulich entwickelt. Mitarbeiter des Institutes wurden zu gefragten Vortragenden auf nationalen und internationalen Konferenzen. Hervorhebenswert sind die ständig steigenden Drittmitteleinnahmen aus Projekten mit der chemischen, mikroelektronischen und optischen Industrie. Das IOM Leipzig ist eines der führenden Institute bei der Drittmitteleinwerbung pro Wissenschaftler innerhalb der Wissenschaftsgemeinschaft. Im Berichtszeitraum kann das Institut auf zwei Ausgründungen, die IOT GmbH und die Solarion GmbH verweisen.

In einer Festveranstaltung anlässlich des 10. Jahrestages der Gründung des Institutes für Oberflächenmodifizierung e. V. in Leipzig wurde in Gegenwart des Präsidenten der Wissenschaftsgemeinschaft Gottfried Wilhelm Leibniz, Herrn Prof. Dr.-Ing. H.-O. Henkel, Vertretern des Bundesministeriums für Forschung und Technologie, des Staatsministeriums für Wissenschaft und Kunst des Freistaates Sachsen, kooperierender Universitäten, Institute und Industriefirmen sowie der Stadt Leipzig die Leistungen in den vergangenen Jahren gewürdigt und über die weitere Entwicklung intensiv diskutiert. Während der Veranstaltung wurde bekannt gegeben, dass der Gründungsdirektor des Institutes für Oberflächenmodifizierung Leipzig, Herr Prof. Dr. F. Bigl, für seine Verdienste um die Neugestaltung der sächsischen Wissenschaftslandschaft am Standort Leipzig mit dem Bundesverdienstkreuz erster Klasse ausgezeichnet wird.

Prof. Dr. Bernd Rauschenbach
Prof. Dr. Reiner Mehnert

Leipzig, Januar 2002

INHALTSVERZEICHNIS

Iom im Überblick **0**

- Organisationsstruktur des Institutes 0
- Historie 1
- Gremien 1

Fachberichte **2**

Abstracts **2**

ESH- (UV-) Mechanismen **11**

- Maleimide als Photoinitiator: Quantenausbeuten 11
- Heterogen photokatalysierte Polymerisation von Acrylaten durch Pigmente 12
- Photoinitiator-freie UV-Härtung von Acrylaten 13
- Tieftemperatur-EPR-Untersuchungen an Acrylaten 14
- Quantenchemische und EPR-Untersuchung von Lacton-Radikalkationen und ihrer Transformation 15

ESH- (UV-) Funktionsschichten **16**

- Strahlengehärtete Nanokomposit-Beschichtungen 16
- Prototypische Entwicklung einer *in-line*-Kaschierung für strahlenhärtbare Verpackungsverbunde im Flexodruck 17
- Besonderheiten offener VUV-Excimerstrahler und deren Anwendung 18
- Offener Argon-Strahler zur Modifizierung von Oberflächen 19
- Untersuchungen zur Optimierung kontinuierlicher 3D-Mikroreplikationsverfahren 20
- UV-vernetzende Haftklebstoffe 21
- Optimierung strahlentechnologischer Basisprozesse 22

Projekt: Degradation von Schadstoffen **23**

- Abluftreinigung mittels Elektronen- und UV-Bestrahlung 23

Ladungstransportprozesse und Ionenstrahlquellen **25**

- Optimierung des Strahlprofiles von Breitstrahl-Ionenquellen 25
- 3D-Effekte in Ionenextraktionssystemen 26
- Lineare Ionenstrahlquelle LISQ 27
- Feinstrahlionenquelle 28

Präzisions-Oberflächenformgebung **29**

- Lokale Dickenkorrektur von Nanometer-Dünnschichten auf Si-Wafern mittels Ionenstrahlätzens 29
- Plasmastrahlbearbeitung optischer Materialien 30
- Entwicklung einer miniaturisierten Ionenstrahlschrägschliffanlage 31

µm- und nm-Strukturen **32**

- Diffraktive optische Elemente für DUV-Hybrid-Optiken 32
- Nanospitzen aus Silizium für die Feldemission 33
- Diffraktive Grautonmasken 34
- Ionenstrahlvergütete Laserdioden 35
- Laserätzen von transparenten Materialien in Flüssigkeiten 36
- Selektives Entfernen von Klebemitteln mit dem Excimerlaser 37

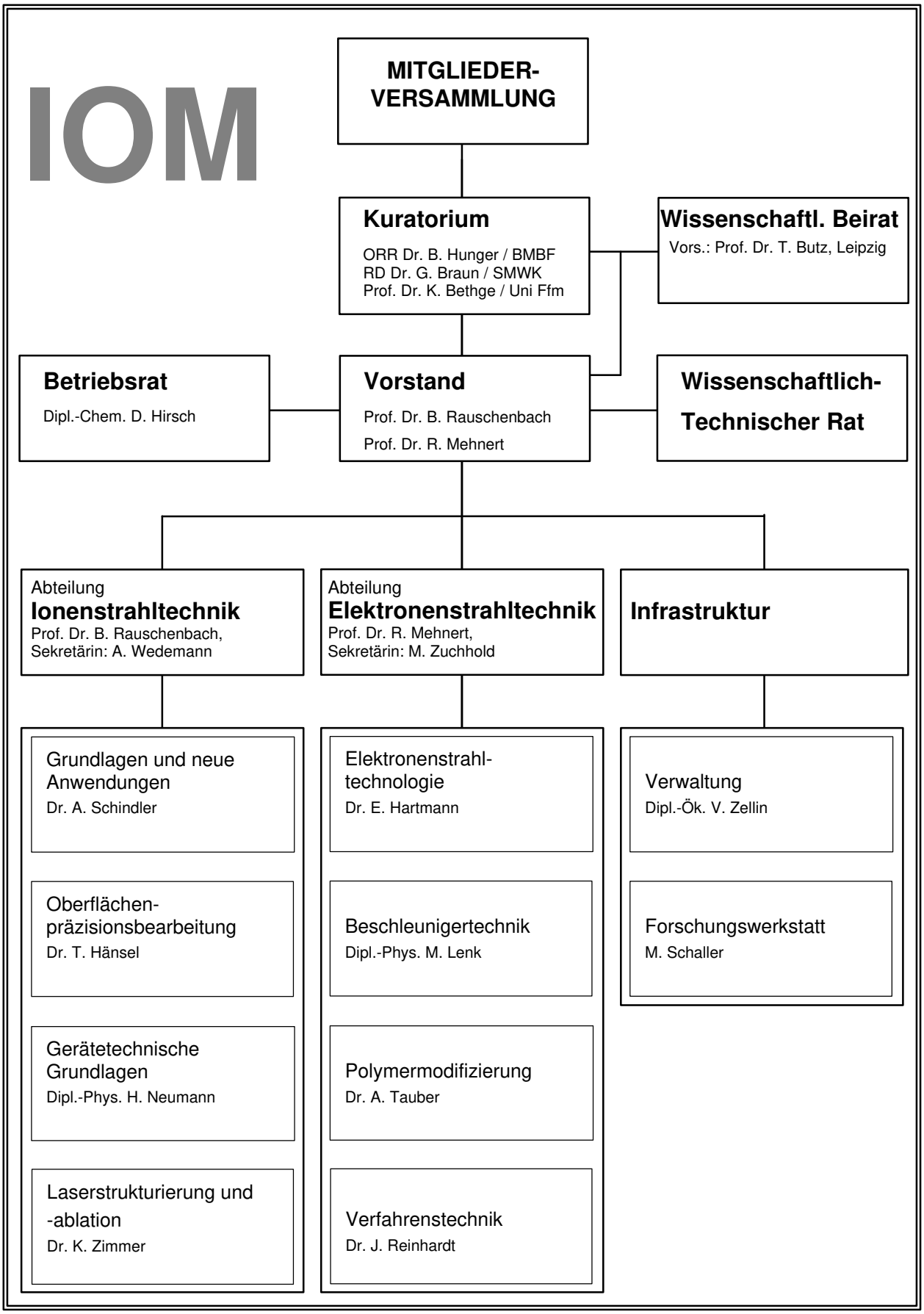
Oberflächenmodifizierung und anorganische Schichten **38**

- Ionenstrahlerosion von Quarz-Glasoberflächen 38
- Selbstorganisierende Nanometerstrukturen durch Ionenstrahlerosion 39
- Sputtercharakteristik von Kohlenstoff-Kohlenstofffaser-Verbundwerkstoff 40
- Chemische und elektronische Eigenschaften modifizierter InP-Grenzflächen 41
- Charakterisierung der niederenergetischen Ionenstrahlnitridierung von III-V-Halbleitern mittels XPS und NEXAFS 42
- Charakterisierung von Mo/Si-Multilayerbeschichtungen für EUV-Lithographiemasken 43
- Modellvorstellung zur Ionenstrahlgestützten Abscheidung epitaktischer GaN-Dünnschichten 44
- Epitaktisches Wachstum und Selbstorganisation bei der Abscheidung von Sulfid-schichten auf III-V-Halbleiteroberflächen 45
- Leitungstypkonvertierung von p-Typ $CuInSe_2$ 46
- In-situ-Charakterisierung bei der Synthese von vergrabenen Übergangsmetalloxid-Schichten durch Hochenergie-Ionenbestrahlung 47
- Oberflächenbehandlung von Titanwerkstoffen für biomedizinische Implantate 48
- Elektrochrome Schichtsysteme für die Modulation der Wärmestrahlung metallischer Oberflächen 49

Veröffentlichungen und Wissenschaftsbeziehungen **51**

- Veröffentlichungen 51
- Kolloquien am IOM 58
- Vorträge/Poster 59
- Bearbeitete Projekte 67
- Patente 68
- Förderung/Qualifizierung 69
  - Ehrungen/Preise/Berufungen 69
  - Lehrveranstaltungen 69
  - Dissertationen 69
  - Gegenwärtig beschäftigte Doktoranden 69
  - Diplomarbeiten 70
  - Praktika 70
  - Gastwissenschaftler 70
- Sonstiges 70
  - Beteiligungen und Mitgliedschaften des IOM 70
  - IOM-Beteiligung an Messen und Ausstellungen 70

Organisationsstruktur des Institutes



Historie

Das Institut für Oberflächenmodifizierung e. V. wurde am 1.1.1992 auf Empfehlung des Wissenschaftsrates mit dem Ziel gegründet, „...anwendungsorientierte Grundlagenforschung zur Wechselwirkung von Strahlung mit Materie zu betreiben, u. a., um die Mechanismen strahleninduzierter Reaktionen aufzuklären, das Verständnis der Ätz- und Abscheideprozesse zu verbessern und die gewonnenen Erkenntnisse in technologische Anwendungen umzusetzen“.
Das Institut ist Mitglied der Wissenschaftsgemeinschaft Gottfried Wilhelm Leibniz und zu gleichen Teilen von der Bundesrepublik Deutschland und dem Freistaat Sachsen finanziert. Gegenwärtig sind am Institut etwa 130 Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter beschäftigt.

Gremien

Die Organe des IOM e. V. sind die Mitgliederversammlung, das Kuratorium, der Vorstand und der Wissenschaftliche Beirat.

Dem **Kuratorium** gehören folgende Mitglieder an:

ORR Dr. Dr. B. Hunger,	Bundesrepublik Deutschland, BMBF Berlin
RD Dr. G. Braun,	Freistaat Sachsen, SMWK Dresden
Prof. Dr. K. Bethge,	Universität Frankfurt/Main

Der Vorsitz wird im jährlichen Wechsel durch die Vertreter des Bundes und des Landes wahrgenommen.

Dem vom Kuratorium berufenen **Wissenschaftlichen Beirat** aus Experten der Industrie, des Hochschulbereiches und der außeruniversitären Forschung gehören folgende Mitglieder an:

Prof. Dr. T. Butz, Leipzig (Vorsitzender)

Dr. W. Arden, München
Prof. Dr. G. Bräuer, Braunschweig
Prof. Dr. O. Brede, Leipzig
Dr. H. Grünwald, Darmstadt
Prof. Dr. W. Gudat, Berlin
Prof. Dr. H. E. Hintermann, Schweiz
Dr. A. Leitel, Jena
Dr. D. Roth, Wüstenbrand
Prof. Dr. R. Szargan, Leipzig

Mitglieder des **Vereins**:

BMBF Bonn	vertreten durch ORR Dr. Dr. B. Hunger
SMWK Dresden	vertreten durch RD Dr. G. Braun
Bruker Saxonia Analytik GmbH Leipzig	vertreten durch Dr. D. Koch
Leybold Optics GmbH Hanau	vertreten durch Dr. H. Hagedorn
IST Metz GmbH	vertreten durch Dr. P. Holl
Prof. F. Bigl	Ehrenmitglied
Prof. K. Bethge	persönliches Mitglied
Prof. Dr. A. Bradshaw	persönliches Mitglied
Dr. H. Grünwald	persönliches Mitglied
Prof. Dr. A. Heuberger	persönliches Mitglied
Prof. Dr. C. v. Sonntag	persönliches Mitglied
Prof. Dr. K. Unger	persönliches Mitglied

Ein von wissenschaftlichen Mitarbeitern des Institutes gewählter **Wissenschaftlich-Technischer Rat** unterstützt den Vorstand in wissenschaftlichen und technischen Fragen.

Ein **Betriebsrat** vertritt die Belange der Mitarbeiter gegenüber dem Vorstand.

MALEIMIDES AS PHOTOINITIATORS: QUANTUM YIELDS

J. von Sonntag, W. Knolle (p. 11)

The knowledge of quantum yields of triplet states and, moreover, of initiating radicals is a crucial prerequisite to evaluate any novel photoinitiator system. This work provides triplet quantum yields of *N*-methylmaleimide (0.03 ± 0.01), *N*-ethylmaleimide (0.07 ± 0.01) and *N*-propylmaleimide (0.05 ± 0.02) determined by relative actinometry using laser flash photolysis and acetone sensitisation. Unsubstituted maleimide on the other hand shows rapid triplet state deprotonation, not allowing the application of relative actinometry with triplet sensitisation. The triplet quantum yield was then determined by comparing the transient conductivity of the enolate formed with conductivity actinometry; it is close to unity.
The yield of initiating radicals is only a ca. 10 % fraction of the triplet yield, as the electron transfer reaction includes an efficient back donation and stands in competition to cyclobutane dimerization.

HETEROGENOUS PHOTOCATALYSED INITIATION OF ACRYLATE POLYMERIZATION BY PIGMENTS

C. Damm, T. Scherzer, R. Mehnert (p. 12)

Pigment catalysed photopolymerization of an acrylate was studied by means of real-time FTIR spectroscopy. The formulations were illuminated by polychromatic UV light ($\lambda > 350$ nm). In the presence of co-catalysts (electron donors or acceptors) the pigments TiO_2 and copper(II)-phthalocyanine are able to initiate polymerization. The activity of TiO_2 pigments depends on their crystal structure: Under the conditions used, only anatase-type pigments show remarkable polymerization of acrylates.

PHOTOINITIATOR-FREE UV-CURING OF ACRYLATES

T. Scherzer, W. Knolle, S. Naumov, R. Mehnert (p. 13)

The direct initiation of the photopolymerization of acrylates without any photoinitiator by short-wavelength UV light was investigated. Irradiation was performed with the 222 nm emission of a $KrCl^*$ excimer lamp. The reactivity of various commercial acrylates was studied by real-time FTIR-ATR spectroscopy. A possible mechanism of the initiation of the reaction was proposed on the basis of laser photolysis experiments and accompanying quantum chemical calculations. Moreover, it was demonstrated that photoinitiator-free UV curing of acrylate coatings also works in pilot scale.

LOW-TEMPERATURE EPR STUDY OF ACRYLATES

W. Knolle, I. Janovský, S. Naumov, H. Langguth, V. Feldman (p. 14)

Using low-temperature EPR spectroscopy, transformations of radical cations of methyl and ethyl acrylate radiolytically generated in freon ($CFCl_2CF_2Cl$, CF_3CCl_3 and $CFCl_3$) and in argon matrices were investigated. The assignment of the EPR spectra was made with the help of partially deuterated acrylates. In addition, quantum chemical calculations were performed to obtain information on the electronic structure, the hfs constants, and energy levels of the transient species observed. The primary radical cations (spin localised on carbonyl oxygen) transform quickly by hydrogen transfer from the ester group to the carbonyl oxygen leading to terminal-type distonic radical cations. In the case of CF_3CCl_3 matrix, warming the samples to temperatures above 130 K results in the simultaneous formation of two new species, assigned to six- and five-member ring structures formed by intramolecular cycloaddition of the terminal radical to the vinyl double bond. The formation of the propagating radical $–CH_2–CH°–R$ due to ion-molecule reaction is observed in $CFCl_2CF_2Cl$ at temperatures above 98 K; this process was also detected in other freons under the conditions of matrix softening.

QUANTUM CHEMICAL AND EPR INVESTIGATIONS OF LACTON RADICAL CATIONS AND THEIR TRANSFORMATION

S. Naumov, I. Janovský, W. Knolle, R. Mehnert (p. 15)

The formation and stability of lactone radical cations was studied using low-temperature EPR spectroscopy and density functional calculation (B3LYP). The relative rigid geometrical structure of the 5- to 7-member lactone rings made the correct calculation of Hfc-coupling constants even for β–protons possible thus enabling an easier assignment of the observed spectra to the primary radical cation and two

reaction products formed by either deprotonation or H-shift from the ring to the carbonyl oxygen. The calculated activation energy corresponds well to the observed stability of the primary radical cation.

RADIATION-CURED POLYMERIC NANOCOMPOSITES

H.-J. Gläsel, S. Rummel, F. Bauer, E. Hartmann, D. Hirsch, H. Langguth, R. Mehnert (p. 16)

Through *in situ* heterogeneous hydrolytic condensation of functionalized alkoxysilanes onto surface-localized hydroxyl groups of anorganic (e.g. SiO_2) nanoparticles and by consecutive radiation induced heterogeneous copolymerization of the nanodispersion films, polymeric coatings of a high scratch and abrasion resistance are obtained. Further effort is invested towards generalizing the nanomodification scheme by employing polymerisation-inactive organofunctionalized silanes, thus stressing the aspect of a mere organophilation. Moreover, by the application of a more efficient deglomeration route and by addition of a micropowder component, an attempt is made to evade dilatancy which is exceedingly detrimental in coating technology.

UV-CURABLE ADHESIVES FOR FLEXO IN LINE PRODUCTION

P. Klenert (p. 17)

Some UV-curable adhesive formulations were investigated to applicate on several foil laminates. It could be found a well suited acrylat hybrid system for in line technology. The demands of peel and sealing strength on unprinted substrate were achieved and pilot scaled tests realized.

SPECIAL FEATURES OF OPEN VUV EXCIMER SOURCES AND THEIR APPLICATION

M. Lenk, L. Prager (p. 18)

The development of open Ar excimer sources in the Institute for Surface Modification has reached a level allowing for routine investigation of surface modification and micro-structuring phenomena as well as chemical vapor deposition (CVD) of pure silicon in the VUV excimer plasma from the gas phase etc. First application-oriented experiments have been successfully carried out with partners from industry and other institutes.

OPEN ARGON EXCIMER LAMP FOR SURFACE MODIFICATION

C. Elsner (p. 19)

The energy of 126 nm photons of a windowless argon excimer lamp is sufficient to break all chemical bonds up to 9.6 eV. This offers the possibility for non-thermal surface modifications under atmospheric pressure up to 100 nm depht. The studies describe the utilisation of the windowless argon excimer lamp for surface etching, the degradation of organic material, and the activation of inert substrates for subsequent surface modification processes.

INVESTIGATION OF 3D-MICROREPLICATION PROCESSES

C. Elsner, A. Sobottka (p. 20)

Replica moulding combined with UV-curing offers a possibility to fabricate 3D-micro- and nanostructures at low-cost and high throughput. Using acrylates as UV-curable liquids the 3D-microstructures formed after UV-curing are of excellent geometrical quality and mechanically stable enough to be used as masters in subsequent replication processes. The studies describe the utilisation of polyacrylate replicas as masters in replica moulding including investigations of the optimisation of the replication process.

UV-LIGHT INDUCED CROSSLINKING OF PRESURRE SENSITIVE ADHESIVES

A. Tauber, T. Scherzer, I. Weiß (p. 21)

Real-time FTIR spectroscopy was used to study the UV-light induced crosslinking of a pressure sensitive adhesive based on a saturated acrylic polymer bearing a photoreactive functional group in the side chain. To simulate technical parameters, e.g. cure speed and number of required UV lamps, single or multiple UV-light flash experiments were performed which have shown that the amount of crosslinked polymer

chains in the adhesive depends on the applied UV dose. The same result was observed by varying the intensity of the UV-light. The properties of the pressure sensitive adhesive, e.g. peel and shear strength, were determined by UV-curing using a laboratory irradiation unit. These results were compared with those of the RTIR spectroscopy experiments.

OPTIMISATION OF RADIATION-TECHNOLOGICAL PROCESSES

M. Tartz, E. Hartmann, M. Lenk, L. Prager, H. Neumann (p. 22)

A simulation tool was completed and applied to UV photodegradation of chlorinated exhaust gases, yielding a comprehensive and plausible idea of the reactor employed. The modelling of ion extraction and broad beam formation was methodologically generalized, including now routes based on an explicite multi-particle scheme. A separate consideration is given to dedicated applications which can enhance the national ion-beam technological competence. A novel cold electron emission (FE) was found to be accompanied by pronounced simultaneous photoemission (FEPES), urgently calling for practical applications.

EMISSION CONTROL OF EXHAUST GASES BY IRRADIATION WITH FAST ELECTRONS AND UV-LIGHT

L. Prager, (p. 23)

The BMBF-network-project 02 WT 9655/56/57/58 “Development and test of a technology for degradation of aromatic hydrocarbons (BTEX) in strip-gas from ground water remediation plants by electron beam irradiation” including the sub-project II treated at IOM “Degradation of single compounds and of mixtures of BTEX among themselves and with chlorinated hydrocarbons” was accomplished. Together with the partners of this project, a technology was worked out for purification of BTEX loaded air or oxygen-argon mixtures originating from the stripping process of contaminated ground water. The emphasis was laid on prevention of toxic residual waste. Fig. 1 showes the flow diagram of a closed loop technology comprising the electron beam treatment of the air, the scrubbing of gaseous products, and the filtration of aerosols. An Ar/O_2 mixture is proposed as the strip-gas thus avoiding the formation of hazardous nitro compounds. Before dumping into municipal canalization system, the waste water from the gas scrubber and the aerosol filter has to be pretreated by a microbiological process whose effectivness was studied on waste water from technical scale experiments.

OPTIMISATION OF THE ION BEAM EXTRACTION SYSTEM

M. Tartz, E. Hartmann, R. Deltschew, H. Neumann (p. 25)

In broad-beam ion sources, an inhomogeneous plasma distribution has a strong effect on the maximum extractable ion current, the broad-beam profile, and the grid lifetime. It is demonstrated that the description of the broad-beam profiles can be significantly improved by taking into account the plasma profile. The simulated dependences of the beamlet parameters allow for an adaption of the extraction geometry to the plasma profile in order to achieve a broad homogeneous beam profile.

3D-EFFECTS IN ION EXTRACTION SYSTEMS

M. Tartz, E. Hartmann, R. Deltschew, H. Neumann (p. 26)

Geometrical perturbations of the axial-symmetric extraction channels by off-axis shifts of the accelerator grid holes give rise to an ion beamlet tilt that under certain conditions is dependent on the beamlet current. The characteristics of the beamlet deflection have been investigated which were obtained by a 3D trajectory simulation. The thrust-vector migration in a RIT10 ion thruster test (Astrium GmbH) may be traced back to a slight grid misalignment.

LINEAR ION BEAM SOURCE LISQ

F. Scholze, H. Neumann, B. Faust., B. Dathe, R. Woyciechowski (p. 27)

A linear type ion beam source with a length of 600 mm has been developed. The modular design allows an up scaling in the meter-scale and therefore industrial applications like ion beam deposition, cleaning

before PVD-deposition and modification (e. g. hardening of stainless steel, polymer surface modification). Measurements of the ion beam current, accelerator grid current, and ion current density as function of microwave input power, gas flow, and grid voltages point (?) to the performance of this special broad beam source. Ion beam currents up to 1 A at beam voltages up to 1500 V are available. An ion current density peak at the longitudinal center of 2.7 mA/cm^2 could be achieved at 1100 V beam voltage in a distance of 20 cm with a focusing grid system.

FINE ION BEAM SOURCE

R. Deltschew, B. Faust, M. Tartz, H. Neumann (p. 28)

A new ion beam source with a beam diameter of less than 1 mm was developed as required for optical ion beam polishing technologies. Two types of plasma generation principles were employed – hot cathode DC plasma and inductive coupled RF plasma. A footprint received by ion milling of Si-surfaces with the Ar-ion beam is used for beam shape and density determination. The fine beam ion source achieves maximum ion beam current densities up to 30 mA/cm^2 with Gaussian shape half width between 0.25 and 0.6 mm. The conical 5-grid ion optics allowed a shift of the beam focus from 5 to 8 mm in distance to grid 5. The figuring or polishing of concave substrate surfaces is possible up to a minimal radius of 150 mm.

LOCAL THICKNESS CORRECTION OF NANOMETER THIN FILMS ON SI-WAFERS BY MEANS OF ION BEAM ETCHING

T. Hänsel, A. Nickel, H.-J. Thomas, A. Schindler (p. 29)

A dwell time algorithm based local ion beam etching technology using a Gaussian shaped beam density profile has been developed for the local thickness correction of thin films such as aluminum or SiO_2 on Si-wafers for future processing application in the production technology of active and passive microelectronic elements. The goals of the development a thickness uniformity within 5 nm range over 6 inch wafer area and processing cycles compatible with production needs have been achieved.

PLASMA JET ETCHING OF OPTICAL MATERIALS

G. Böhm, Th. Arnold, W. Frank, A. Schindler (p. 30)

Plasma Jet Chemical Etching (PJCE) of fused silica and silicon was performed in order to further develop this technology for the free form figuring of large area optical surfaces. Using this alternative process subsurface damages are avoided in contrast to abrasive techniques like Computer Controlled Polishing (CCP) or Magneto Rheological Finishing (MRF). In the case of silicon a shape error less than 5 % was reached. Thus, absolute accuracy < 1 µm can be realized within a few figuring cycles. Thereby, a slight decrease of the (intrinsic) surface roughness was found. Nevertheless, subsurface damages resulting from mechanical pre-processing steps like cutting, grinding, and polishing and their transfer into deeper levels are still limiting the achievable overall surface smoothness at present. Investigation to manage this problem is in progress.

DEVELOPMENT OF A MINIATURISED ION BEAM SPUTTER ETCHING UNIT

W. Frank, A. Schindler, J. Piltz, K. Barucki (p. 31)

For ex situ preparation of samples for nanometer scale depth profiling using the lateral resolved total reflection X-ray fluorescence line scan method across a beveled section of the sample a miniaturized ion beam sputter etching unit was developed.
The main parts are a vacuum chamber equipped with a 40 mm diameter HF-type ion source and a two-axis precision motion system with a new developed sample load-lock. The vacuum system and the ion beam etching process are fully computer controlled.
To demonstrate the performance of the apparatus developed Ar^+-beam ramp etching (600 eV, 1 mAcm^{-2}, normal incidence) of layer systems (860 nm SiO_2 on Si) was carried out. The mechanical profile of the 12 mm long beveled section was determined by step height measurement and shows the reproducibility of the expected linear behavior.

DIFFRACTIVE OPTICAL ELEMENTS FOR DUV-HYBRIDE OPTICS

R. Fechner; R. Steiner, A. Schindler, B. Dobschal, K. Rudolf, M. Burkhardt R. Brunner (p. 32)

A technology for the production of diffractive optical zone lenses in fused silica for UV-application has been developed. The main processing steps are holographic lithography for the 3D-mask fabrication and reactive ion beam etching for the proportional transfer of the 110 nm deep resist structure into a 330 nm deep blazed structure in fused silica. The diffraction efficiency at 193 nm wavelength has been measured to be between 60 and 70 % depending on the grating period.

SILICON NANOTIPS FOR FIELDEMISSION

J. Dienelt, K. Zimmer (p. 33)

Nanotips of silicon with a tip radius of 10 nm, a height of 1200 nm and a bottom width of 600 nm were produced with commonly used dry etch techniques. The usage of a wide band gap material increases the emission property; better the thermal stability and the resistivity against rest gas molecules. Therefore, the silicon tips were deposited with a 60 nm diamond like carbon layer.

DIFFRACTIVE GRAY-SCALE MASKS

A. Braun, K. Zimmer (p. 34)

A new type of gray scale mask capable of fabricating a variety of microstructures is presented. The mask is entirely made of quartz and makes use of tailored diffractive gratings, which deflect parts of the originally illuminating laser beam beyond the solid angle of the imaging system used. The mask was tested in static laser ablation of polycarbonate. The potential for high pulse energy laser applications is supported by ablation thresholds at 248 nm being as high as 20 J/cm² for diffractive gratings made in crystalline quartz, and 14 J/cm² for gratings in fused silica.

ION-BEAM REFINED LASER DIODES

H. Herrnberger, K. Otte, J. Dienelt, F. Pietag, R. Schwabe, V. Gottschalch, G. Benndorf (p. 35)

Mobile Fourier-transform infra-red (FTIR) spectrometers gain increasingly in importance for the analysis of pollutants. Further miniaturization of such equipments is highly desirable which can be achieved using miniaturized opto-electronic semiconductor devices such as laser diodes as reference-light sources in the FTIR spectrometers. These diodes have to operate in single-mode, i.e., they have to possess extremely high side-mode suppression. Because of the required high laser-light powers - about 10 mW - usual ridge wave-guide lasers have to be used, high-power devices, whose device parameters can be perfectly refined by ion-beam etching techniques.

ETCHING OF TRANSPARENT MATERIALS AT THE INTERFACE TO LIQUIDS

R. Böhme, A. Braun, K. Zimmer (p. 36)

Excimer laser etching at the interface to liquids has been studied for the fabrication of well-defined microstructures in UV-transparent materials (fused silica, sapphire, CaF_2, MgF_2, glass and Pyrex®). The etch rate and the threshold fluence of fused silica are 0.2 µm/pulse and 300 mJ/cm², respectively. Laser etched three-dimensional microstructures fabricated by mask projection and scanning contour mask techniques are characterized by a low surface roughness and steep walls. Additionally, almost no debris has been observed.

SELECTIVE REMOVAL OF ADHESIVES BY EXCIMER LASER

K. Zimmer, E. Salamatin (p. 37)

The aim of this work was the selective removal of adhesives from optical components without altering the polished surface. Epoxide based adhesive was removed by excimer laser ablation in specific environmental conditions up to 100 µm depth. To avoid debris deposition, which results in increased surface roughness, mask projection, light gases, specific liquids, and additional metal layers have been applied

and evaluated. The optimized laser etching process makes possible to remove the glue without increasing the surface roughness (1 to 2 nm rms) of the polished fused silica.

ION BEAM EROSION OF QUARTZ GLASS

F. Frost, D. Flamm, D. Hirsch (p. 38)

Atomic force microscopy was used to study the evolution of the surface topography of quartz glass during low-energy Ar^+ ion beam sputtering. Depending on the incidence angle of the ion beam different surface topographies emerge. Beyond a critical incidence angle ripple structures with a characteristic wavelength are developed. Regarding the kinetics of surface topography, power law scaling relations for the surface roughness $w \sim t^{\beta}$ and ripple wavelength $\lambda = t^{\gamma}$ were found. The scaling exponents β und γ are determined by the ion beam parameters. Additionally, the surface evolution with simultaneous sample rotation was examined. In contrast, at incidence angles 50° extremely smooth surfaces were created, offering the possibility of surface smoothing by ion beams down to a Sub Ångstrom level.

SELF-ORGANIZED NANOMETERSTRUCTURES BY ION BEAM EROSION

F. Frost (p. 39)

The formation periodic ripple structures on surfaces bombarded with ions under oblique (off-normal) incidence are a well-known and intensely studied phenomenon. In contrast to these, long standing investigations a new and fascinating phenomenon was noticed for ion sputtering under oblique ion incidence with simultaneous sample rotation. Due to the rotation-induced abolishment of the anisotropy in the evolution of the surface topography, naturally given by the direction of the ion incidence, the formation of nanometer-sized islands can be observed. For preceding sputtering these island or dot structures are characterized by relatively uniform size distribution and a striking large degree of spatial ordering showing a mostly hexagonal symmetry. This technique offers the self-organized formation of nanometer-sized dots on various semiconductor surfaces. It is the subject of a recently started research project supported by the DFG.

SPUTTER CHARACTERISTICS OF CARBON-CARBON COMPOUND MATERIAL

R. Deltschew, M. Tartz, E. Hartmann, H. Neumann, H. J. Leiter (p. 40)

Because of the growing interest in carbon-carbon compound materials as a grid material of electrostatic thrusters the sputter yield at low energy (100-1500 eV) Xenon ion bombardment was studied and compared to conventional high-density graphite sputter yields. The Carbon-Carbon sputter yield exceeds that of graphite by a factor of 2 to 3, which is an effect of the pronounced macroscopic cylindrical surface structure.

CHEMICAL AND ELECTRONIC PROPERTIES OF MODIFIED InP-INTERFACES

R. K. Gebhardt, A. B. Preobrajenski, T. Chassé (p. 41)

Interface reactions and electronic properties at atomically modified interfaces of InP were studied using XPS/SXPS, UPS, XPD, and LEED. Arsenic and sulfur-modifications were tested on a monolayer thickness scale. As-modified interfaces turned out to be chemically passivated regarding interface reactions with deposited ultrathin films of Ge, Sn, Ag, while the S-modifications could not suppress reactions completely. Significant electronic effects due to the interface modifications were observed, as the reduction of the valence band offset for Ge/InP (110) or the reduction of the n-type Schottky barrier heights on S-modified metal-semiconductor interfaces, which could be assigned to reaction-induced interface donors.

CHARACTERISATION OF LOW-ENERGY NITRIDATION OF III-V SEMICONDURCTORS BY MEANS OF XPS AND NEXAFS

J.-D. Hecht, F. Frost, A. B. Preobrajenski, S. Krasnikow, L. Zhang, D. Hirsch, T. Chassé (p. 42)

This work is focused on the investigation of surface nitridation using in situ X-ray absorption and photoemission measurements. The GaAs, InAs, InP and InSb (100) wafers were nitrided using low-energy N_2^+ bombardment for different ion beam parameters and substrate temperatures. A detailed analysis of the XPS N 1s peaks reveals the presence of nitride and interstitial nitrogen. The evolution of the nitridation process was also studied in dependence of the ion dose. NEXAFS measurements were performed at the

nitrogen (and oxygen) K-edge in order to probe the chemical bonding of the implanted nitrogen species. This characteristic feature is assigned to interstitial molecular nitrogen. Extended photoemission studies permit the proposal of a model that describes the surface nitridation steps.

CHARACTERISATION OF Mo/Si MULTILAYERS FOR EUV LITHOGRAPHY MASKS

T. Chassé, H. Neumann, G. Otto, W. Frank, F. Frost, A. Schindler, D. Hirsch, B. Rauschenbach, B. Ocker, M. Scherer, M. Haidl, S. Müllender, G. Wagner, M. Lorenz, M. Zeuner (p. 43)

Mo/Si multilayers were deposited on 4" Si wafers using a CYBERITE IBD system. Characterization by TEM, AFM, SNMS, SIMS, X-Ray Reflectometry, and Reflectometry at 12-14 nm wavelength reproducibly revealed excellent multilayer periodicity of 6.7 nm, smooth interfaces and surfaces despite some interface mixing, and very good reflectivities at 13.4 nm of 64-65 %. Therefore, ion beam deposition of Mo/Si multilayers may be considered a competitive technology for EUVL mask production.

ION BEAM ASSISTED GROWTH OF EPITAXIAL GALLIUM NITRIDE THIN FILMS

J. W. Gerlach, S. Sienz, H. Neumann, B. Rauschenbach, A. Anders, J. Keckes (p. 44)

In order to enhance the epitaxial growth of high-quality hexagonal gallium nitride thin films on c-plane sapphire substrates, ion beam assisted deposition is applied. Key parameter is the ion energy, which must be carefully chosen. Otherwise, the enhancement is not present or the growth is disturbed by creation of residual ion beam induced point defects, resulting in films of minor crystalline quality with a distinct amount of the cubic GaN polytype. The experimental investigations show that an ion energy of about 25 eV is well suited for ion beam assisted epitaxy.

EPITAXIAL GROWTH AND SELFASSEMBLY DURING DEPOSITION OF SULFIDE LAYERS ON III-V-SEMICONDUCTOR SURFACES

A. B. Preobrajenski, K. Barucki, T. Chassé (p. 45)

Interface reactions, growth mode, and structure of ultrathin MBE-films of the semiconductors PbS and CdS on InP (110) and InP (001)-(2 x 4) were investigated using XPS, XPD, LEED, and AFM. As revealed from LEED epitaxial films of good crystalline quality were obtained for comparatively low deposition temperatures up to about 200 °C starting already at room temperature for PbS. In case of the PbS-deposition on InP (110) at 270-300 °C epitaxial PbS islands of unique shape and orientation, which form a system of Self-Assembled Dots (SAD), were obtained. This mechanism of island growth is significantly different from Stranski-Krastanov mode and offers new opportunities for structure formation during growth of materials with disparate structures.

CONDUCTIVITY TYPE CONVERSION OF P-TYPE $CuInSe_2$

K. Otte, G. Lippold, T. Chassé, A. Schindler (p. 46)

Low-energy hydrogen implantation of p-type $CuInSe_2$ at increased substrate temperature results not only in a complete removal of surface oxides and contaminations but also in a conductivity type conversion as observed by the shift of the valance band maximum measured with X-ray photoelectron spectroscopy. A defect model has been proposed suggesting the formation of hydrogen-interstitials acting as donors as well as the passivation of copper vacancies. The resulting Cu-depleted surface is the result of the downward band bending and the migration of Cu into the bulk by the built-in electric field.

SYNTHESIS OF BURIED TRANSITION METAL OXIDE LAYERS BY HIGH ENERGY ION IMPLANTATION USING IN SITU ANALYSIS

Y. Bohne, B. Rauschenbach (p. 47)

Using an in situ experimental facility be made of high energy and fluence oxygen ion implantation, x-ray diffraction (XRD) and electrical resistance measurements in a wide temperature range opens the possibility to analyze the phase transformation during synthesis of buried transition metal oxide layers. Titanium and molybdenum are used as implant materials. The influence of high energy (0,5-1,5 MeV) and high

fluence (2,5 x 10^{18} ions/cm^2) ion implantation, implantation temperature (-150-1000 °C) and thermal post treatment of titanium- and molybdenum oxide formation are investigated.

SURFACE TREATMENT OF TITANIUM FOR BIOMEDICAL IMPLANTS

S. Mändl, R. Sader, J. K. Gregory, B. Rauschenbach (p. 48)

The goal of this work was to improve the integration behavior as well as biocompatibility of biomedical titanium implants. Complex parts made of Ti Grade 2 were treated using plasma immersion ion implantation (PIII) in homogeneous oxygen plasma at temperatures ranging from 200 °C to 550 °C. This treatment results in the formation of a closed TiO_2 layer on the surface. The tendency for oxygen to diffuse into the titanium increased with increasing treatment temperature. Slight changes in the microstructure were also observed. No change in tensile properties could be detected. An improvement of the biocompatibility could be proven by biomechanical and cell biological investigations.

ELECTROCHROMIC DEVICES FOR METALLIC SURFACE HEAT RADIATION CONTROL

E. Schubert, H. Neumann, M. Schubert, C. L. Trimble, J. A. Woollam (p. 49)

All-solid-state electrochromic devices for thermal emittance modulation on metallic surfaces at 300 Kelvin based on crystalline WO_3 (electrochromic layer), Ta_2O_5 (ion conductor), and amorphous WO_3 (ion storage layer) were fabricated and tested. Die emissivity modulation $\Delta\varepsilon$ calculated from experimentally measured emission spectra normalized of the 300 K blackbody emission spectra reveal 18 %.

FACHBERICHTE

- ESH- (UV-) MECHANISMEN
- ESH- (UV-) FUNKTIONSSCHICHTEN
- PROJEKT: DEGRADATION VON SCHADSTOFFEN

Maleimide als Photoinitiator: Quantenausbeuten

J. von Sonntag, W. Knolle

Die mechanistische Untersuchung der Photochemie der Maleimide /1-3/ hat einige Zwischenstufen identifizieren können: zuerst einmal den monomeren Triplettzustand, daneben einen dimeren Triplett /4/, auf einer späteren Zeitskala Radikalanionen /2/ und Radikalkationen. Für eine Bewertung hinsichtlich technischer Anwendbarkeit von Maleimid-initiierten Beschichtungen ist eine Kenntnis der Quantenausbeuten von Bedeutung, da die zu applizierenden Lichtströme einen wesentlichen Kostenfaktor darstellen.

Die wirksame Quantenausbeute an initiierenden Radikalen setzt sich aus dem Produkt der Triplettquantenausbeute und der dazu relativen Radikalausbeute zusammen.
Triplettquantenausbeuten können meist mit relativer Aktinometrie durch Vergleich der direkt angeregten Spektren (Abb. 1) mit den über Triplettsensibilisatoren (hier: Aceton, Abb. 2) erhaltenen bestimmt werden.

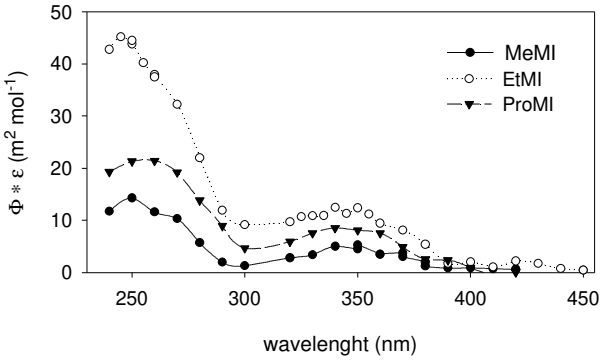


Abb. 1: Direkt angeregte Triplettspektren von *N*-alkylierten Maleimiden.

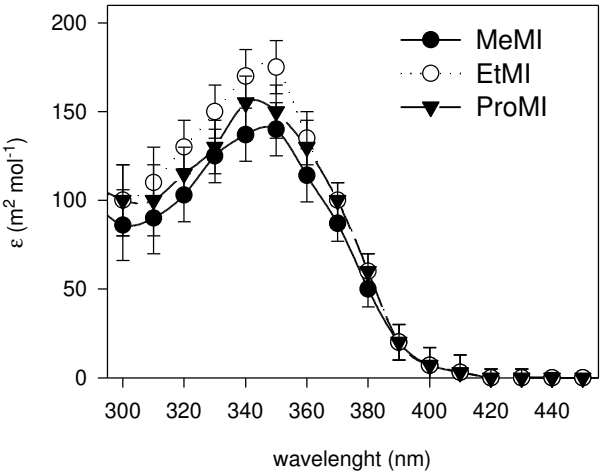


Abb. 2: Sensibilisierte Triplettspektren der *N*-Alkylmaleimide. Sensibilisator: Aceton, 0,17 mol dm^{-3}.

Die erhaltenen Quantenausbeuten für die *N*-Alkylmaleimide sind eher gering: 0.03 – 0.07. (Details in /3/).
Interessanter ist der Fall für das unsubstituierte Maleimid. Hier kann die Quantenausbeute nicht über Sensibilisierung bestimmt werden. Die schnelle Deprotonierung des Maleimidtripletts verändert die Spektren /4/. Als Ausweg dient hier genau diese Deprotonierung. Ihre Ausbeute ist ein direkter Nachweis einer Triplettausbeute.

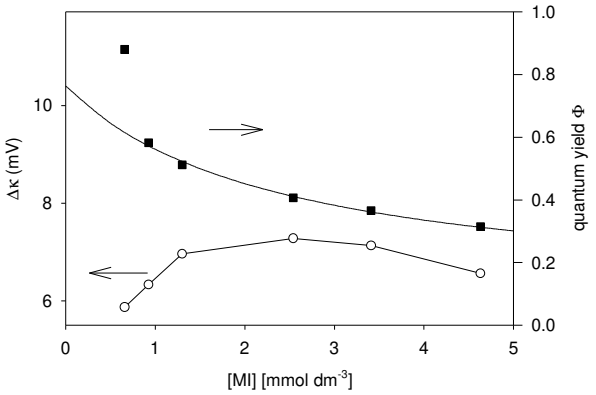


Abb. 3: Leitfähigkeitssignal im Maximum von direkt angeregtem Maleimid als Funktion der Maleimidkonzentration (unten), daraus berechnete Quantenausbeute der Deprotonierung (oben).

Unter Berücksichtigung, dass die Deprotonierung selbst wieder Zeit benötigt und daher etwas geringere Quantenausbeuten hat als der Triplett, ergibt sich eine Triplettquantenausbeute von etwa 1.

Die Triplettquantenausbeute ist aber nur die eine Seite, für die Photopolymerisation ist die Ausbeute an initiierenden Spezies viel bedeutender. Dies sind die Radikalkationen, deren Ausbeute über die Ausbeute an konjugierten Radikalanionen bestimmt wird. Hier zeigt sich, dass die *N*-Substitution wenig Einfluss auf diesen Reaktionskanal hat: ca. 10 % der Triplettzustände reagieren mit Monomeren zu Radikalionen /3/. Weitere 50 % bilden jedoch über einen kurzlebigen Dimertriplett inaktive und potenziell gesundheitsgefährdende Cyclobutandimere /4/, die restlichen 40 % sind produktfreie Rückreaktion.

/1/ J. von Sonntag, *Kinetische Untersuchungen zur Photochemie des Maleimids und seiner Derivate. Beiträge zum Mechanismus selbstinitiierter radikalischer Polymerisationen*, Dissertation, Universität Leipzig (2000).
/2/ J. von Sonntag, D. Beckert, W. Knolle, R. Mehnert, *Electron transfer as the initiation mechanism of photocurable maleimide - vinyl ether based resins*, Radiat. Phys. Chem. **55** (1999) 609.
/3/ J. von Sonntag, W. Knolle, *Maleimides as electron transfer photoinitiators: quantum yield of triplet states and radical ion formation*. J. Photochem. Photobiol. A: Chem. **136** (2000) 133.
/4/ J. von Sonntag, W. Knolle, S. Naumov, R. Mehnert, *Deprotonation and dimerization of maleimide in the triplet state*. A Laser flash photolysis study with optical and conductometric detection, J. Am. Chem. Soc. eingereicht (2001).

Heterogen photokatalysierte Polymerisation von Acrylaten durch Pigmente

C. Damm*, T. Scherzer, R. Mehnert

* Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg, Institut für Organische Chemie

Die photochemische Härtung pigmentierter Formulierungen findet Anwendung in der Drucktechnik und in Beschichtungstechnologien. Die Formulierungen enthalten Photoinitiatoren, die bei Belichtung die Polymerisation starten. Nachteile dieser Photoinitiatoren sind deren hohe Kosten sowie die oft recht hohe Human- und Ökotoxizität. Außerdem verbleiben Spaltprodukte der Photoinitiatoren in der ausgehärteten Formulierung, was sich negativ auf die Produkteigenschaften auswirken kann.
Alternativ könnten photoaktive Pigmente wie Titandioxid oder Phthalocyanine als Initiatoren eingesetzt werden. Die bei Belichtung in den Pigmenten generierten Ladungsträger (Elektronen bzw. Löcher) können ihre Radikaleigenschaften direkt oder indirekt auf Monomere übertragen und damit eine Polymerisation auslösen (heterogene Photokatalyse). Im Rahmen dieses Projektes wurde untersucht, unter welchen Bedingungen Pigmente in der Lage sind, eine Photopolymerisation von Acrylaten zu initiieren.
Zur Klärung dieser Frage dienten Real-Time-FTIR-Untersuchungen, wobei ca. 20 µm dicke Schichten der Pigment/Acrylat-Formulierungen unter weitgehendem Ausschluss von Luftsauerstoff mit polychromatischem Licht mit $\lambda > 350$ nm bestrahlt wurden. Eine Eigenabsorption durch das Acrylat ist somit ausgeschlossen.
Es zeigte sich, dass in Gegenwart von Cokatalysatoren (Elektronen-Donatoren bzw. Akzeptoren) sowohl anorganische als auch organische Pigmente eine Photopolymerisation auslösen können. Abbildung 1 zeigt die Kinetik der Photopolymerisation von mit TiO_2 pigmentierten Formulierungen auf der Basis von ethoxyliertem TMPTA im Vergleich zum pigmentfreien Acrylat. Als Cokatalysator dient der Elektronenakzeptor Dichlor-Maleinsäureanhydrid (DCMSA).
Die Kristallstruktur bestimmt die initiierende Wirkung des TiO_2 (vgl. Abb. 1). Formulierungen mit der Anatas-Modifikation polymerisieren schneller als die pigmentfreie Vergleichsprobe. Wegen seiner Heterostruktur initiiert das kommerzielle TiO_2 P25 (80 % Anatas, 20 % Rutil) die Polymerisation wesentlich besser als reiner Anatas: Nach einer Bestrahlungszeit von 10 s ist hier etwa die Hälfte des Monomeren umgesetzt. Amorphes TiO_2 sowie die Modifikation Rutil initiieren die Photopolymerisation des Acrylates nicht.

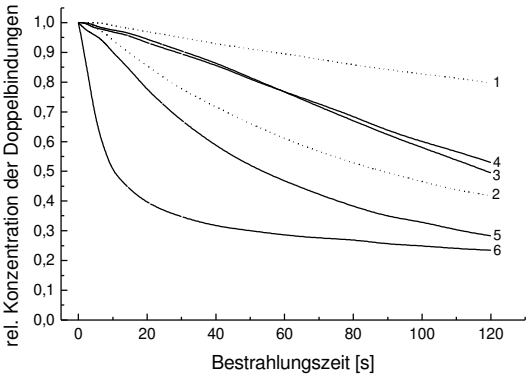


Abb. 1: Kinetik der Photopolymerisation von ethoxyliertem TMPTA unter Zusatz verschiedener Titandioxid-Pigmente sowie DCMSA
1: reines Acrylat (SR415)
2: 6,6 mol% DCMSA in SR415
3: 13,6 % amorphes TiO_2, 6,6 mol% DCMSA in SR415
4: 13,8 % Rutil, 6,6 mol% DCMSA in SR415
5: 13,7 % Anatas, 6,6 mol% DCMSA in SR415
6: 13,5 % P25 (80 % Anatas/20 % Rutil), 6,6 mol% DCMSA in SR415

Abb. 2 demonstriert die Initiierung der Photopolymerisation von ethoxyliertem TMPTA durch Kupfer(II)-Phthalocyanin (CuPc). Als Cokatalysator dient hier der Elektronendonator Triethanolamin (TEA).

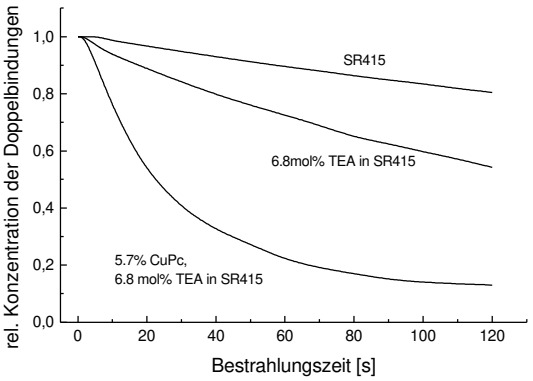


Abb. 2: Kinetik der Photopolymerisation einer mit Kupfer(II)-Phthalocyanin pigmentierten Formulierung aus ethoxyliertem TMPTA und TEA im Vergleich zum unpigmentierten System sowie zum reinen Acrylat.

Der Zusatz von 5,7 % CuPc erhöht die Polymerisationsgeschwindigkeit der Acrylat/TEA-Formulierung deutlich. Der Grenzumsatz des Monomeren ist hier noch höher als bei der P25/DCMSA-Formulierung (vgl. Abb. 1).

Organische photoaktive Pigmente können zur Initiierung der Photopolymerisation von Acrylaten eingesetzt werden. Die Initiierungseffizienz der Pigmente hängt von deren Kristallstruktur und der Natur des Cokatalysators ab. Photoangeregter Anatas kann das Acrylat oxydieren. Zur Erhaltung der Ladungsneutralität muss aber ein Elektronenakzeptor, z. B. DCMSA, zugesetzt werden. CuPc oxydiert dagegen offensichtlich den Cokatalysator TEA zu initiierenden Radikalen.

Photoinitiator-freie UV-Härtung von Acrylaten

T. Scherzer, W. Knolle, S. Naumov, R. Mehnert

Die Initiierung der radikalischen Photopolymerisation von Acrylaten erfolgt in der Regel durch den Zusatz von Photoinitiatoren zur Formulierung. Bei Bestrahlung mit UV-Licht werden die initiierenden Spezies (Radikale) durch photolytische Spaltung des Photoinitiators gebildet. Photoinitiatoren ermöglichen erst die hohe Effizienz der UV-Härtung, da eine direkte Anregung der reaktiven Gruppen im Acrylat aufgrund der geringen Photonenenergie der üblicherweise verwendeten Strahlungsquellen (Quecksilberdampflampen, XeCl*-Excimer-Strahler) nicht möglich ist. In der vernetzten Schicht wirken sich jedoch unumgesetzte Reste und Spaltprodukte des Photoinitiators negativ auf die Produkteigenschaften aus (Vergilbung, Geruch, Migration u. a.). Außerdem tragen Photoinitiatoren meist in erheblichem Umfange zu den Gesamtkosten der Beschichtung bei. Ein Verzicht auf den Photoinitiator oder zumindest eine Verringerung der notwendigen Konzentration wäre daher aus Sicht der Anwendung wünschenswert.

Im Rahmen eines Projektes wurde untersucht, ob durch Bestrahlung mit kurzwelligem UV-Licht eine direkte Anregung der Doppelbindungen im Acrylat möglich ist. Mit der Einführung des $KrCl^*$-Excimer-Strahlers steht dazu nun eine UV-Quelle mit einer intensiven kurzwelligen Emission bei 222 nm zur Verfügung. UV-Licht mit einer Wellenlänge unterhalb von ca. 240 nm wird von Acrylaten - wie von den meisten organischen Verbindungen - absorbiert. Die Extinktionskoeffizienten hängen dabei in erheblichem Umfange von der chemischen Struktur der Acrylate ab.

Durch Grundlagenuntersuchungen mittels Real-Time-FTIR-Spektroskopie konnte gezeigt werden, dass durch Bestrahlung dünner Acrylatschichten (4,5 µm) mit 222 nm ausreichend Radikale gebildet werden, um eine Photopolymerisation zu initiieren (Abb. 1). Notwendig ist dabei allerdings eine sorgfältige Inertisierung, um die Inhibierung der Reaktion durch Sauerstoff zu unterdrücken. Aromatische Acrylate vernetzen nur in sehr dünnen Schichten (unter 1 µm), da die anregende Strahlung aufgrund der hohen Extinktionskoeffizienten nahezu vollständig in einer dünnen Oberflächenschicht absorbiert wird. Dagegen können aliphatische Acrylate in Schichtdicken von einigen Mikrometern vernetzt werden /1/.

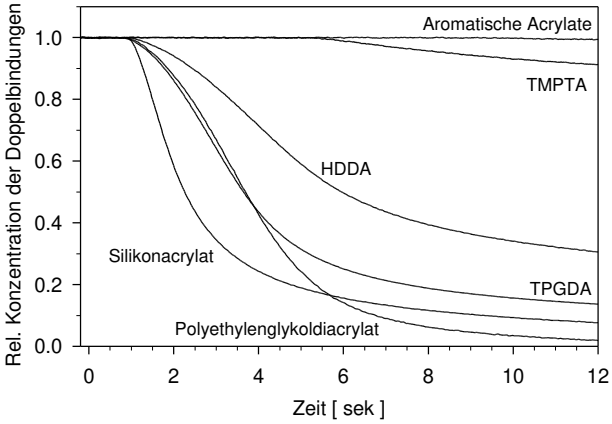


Abb. 1: Kinetik der photoinitiatorfreien UV-Härtung verschiedener Acrylate bei Bestrahlung mit 222 nm.

Um Aufschluss über einen möglichen Initiierungsmechanismus zu erhalten, wurden die bei der Bestrahlung von Acrylaten mit kurzwelligem UV-Licht erzeugten Spezies mit Hilfe der Laserphotolyse untersucht. Abb. 2 zeigt am Beispiel von TMPTA typische Absorptionsspektren von Transienten, die nach der Bestrahlung eines Acrylates mit einem Laserimpuls beobachtet werden.

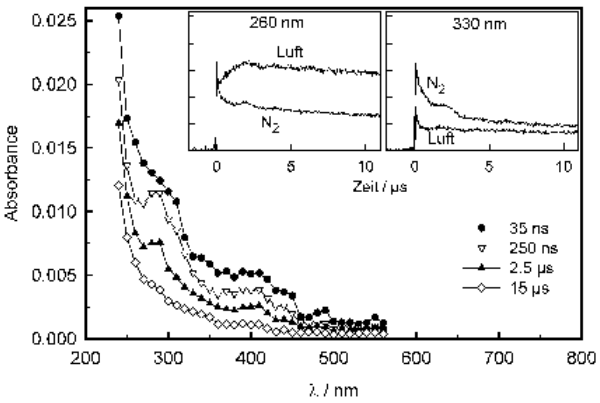


Abb. 2: Transientenspektren von TMPTA in Acetonitril (N2-gesättigte Lösung) nach Laserphotolyse mit 222 nm. Im Inset: zeitlicher Verlauf bei verschiedenen Wellenlängen in Abhängigkeit von der Begasung.

Mit Hilfe begleitender quantenchemischer Berechnungen zur Interpretation der mit Laserphotolyse erhaltenen Resultate konnte gezeigt werden /1/, dass sich innerhalb von 200 ns zunächst ein stark lokalisierter Triplett-Zustand an der C=C-Doppelbindung bildet. Durch inter- bzw. intramolekularen H-Transfer oder Addition an die Doppelbindung eines weiteren Acrylatmoleküls erfolgt daraus nach ca. 3 µs die Bildung von Radikalen bzw. Biradikalen, die im weiteren Verlauf die Polymerisationsreaktion initiieren. Aus energetischer Sicht wird dabei die Biradikalbildung begünstigt.

Durch Bestrahlung dünner Acrylatschichten (2 µm) mit einem $KrCl^*$-Excimer-Strahler an einer Technikumsanlage des IOM konnte ferner demonstriert werden /1/, dass Acrylate auch ohne zugesetzten Photoinitiator unter inerten Bedingungen bei Bahngeschwindigkeiten bis etwa 30 m/min vernetzt werden können. Es wird erwartet, dass eine noch raschere Reaktion möglich ist, sobald leistungsstärkere Excimerstrahler zur Verfügung stehen.

/1/ T. Scherzer, W. Knolle, S. Naumov, R. Mehnert, *UV curing without photoinitiators*, Proc. RadTech Europe 2001 Conference, Basel, 8.-10.10.2001, pp. 225-231.

Tieftemperatur-EPR-Untersuchungen an Acrylaten

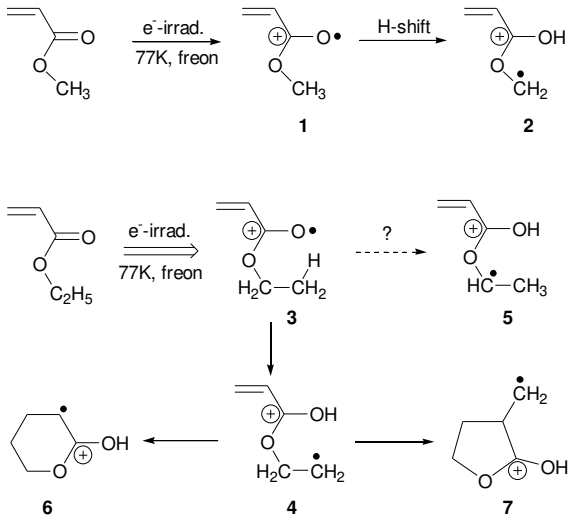
W. Knolle, I. Janovský, S. Naumov, H. Langguth, V. Feldman*

* Karpov Institute of Physical Chemistry, Moscow, Russia

Tieftemperatur-EPR-Untersuchungen zur Bildung, Struktur und Transformation der Radikalkationen von Acrylaten wurden an einer Vielzahl von unterschiedlichen Mono- und Diacrylaten durchgeführt. Die Radikalkationen wurden radiolytisch durch Elektronenbestrahlung von gefrorenen Lösungen der Acrylate in Freon- ($CFCl_2CF_2Cl$, CF_3CCl_3 und $CFCl_3$) bzw. Argon-Matrix erzeugt. Experimentelle Einzelheiten können dem IOM-Tätigkeitsbericht 1998/99 oder /1/ entnommen werden.

Als Schlüsselsubstanzen zum Verständnis der beobachteten Transformationen erwiesen sich die zwei einfachsten aliphatischen Acrylate, nämlich Methyl– und Ethylacrylat. Die Zuordnung der erhaltenen Spektren (als Beispiel siehe Abb. 1) zu bestimmten Radikalkationen gelang erst durch den Einsatz von teilweise an der Esterkette deuterierten Substanzen und unter Einbeziehung von quantenchemischen Berechnungen zur Elektronenstruktur, zur relativen Energie und zu den erwarteten Kopplungskonstanten.

Die primären Radikalkationen sind an der Carbonylgruppe lokalisiert und zeigen im EPR-Spektrum ein breites unstrukturiertes Singulet ($\Delta H_{pp} \approx 1{,}4$ mT). In CF_3CCl_3-Matrix, wo relative große Hohlräume intramolekulare Umwandlungen begünstigen, findet die Bildung von endständigen distonischen Radikalkationen durch H-Transfer von der Estergruppe statt. Im Fall von Methylacrylat kann bei 77 K diese Reaktion von dem primären Radikalkation **1** zu der distonischen Spezies **2** ($a(2H_\alpha) = 2{,}24$ mT, Reaktionskonstante ~ 1 h^{-1}) direkt beobachtet werden.



Das primäre Ethylacrylat-Radikalkation **3** konnte nur bei sehr tiefen Temperaturen unterhalb 40 K in einer $CFCl_3$-Matrix stabilisiert werden, da der im Vergleich zum Methylacrylat wesentlich günstigere 6-teilige Übergangszustand den H-Transfer und damit die Bildung des distonischen Radikalkations **4** erheblich erleichtert. Die energetisch etwas günstigere Spezies **5** wurde dagegen nicht nachgewiesen. Die geometrische Struktur von **4** in CF_3CCl_3-Matrix ist stark temperaturabhängig und führt bis zu einer Temperatur von 125 K (vgl. Abb. 1 (a) und (c)) zu einer reversiblen Linienveränderung durch Bewegungsausmittelung der H_β-Kopplungskonstanten. Weitere Erwärmung resultiert in einem komplett anderen EPR-Muster (Abb. 1 (d)), das sich aus zwei neuen Spezies **6** und **7** (Abb. 1 Strichplots) zusammensetzt. Die beiden Ringstrukturen **6** (a(H)/mT: 2,36 (H_α), 5,13 ($H_{\beta1}$), 1,9 ($H_{\beta2}$)) und **7** (2,27 ($2H_\alpha$), 2,6 (H_β)) entstehen durch Zykloaddition der endständigen Radikalstelle an die Vinyldoppelbindung. In allen Freon-Matrizen kann bei Temperaturen oberhalb ihrer Phasenübergänge das Kettenwachstumsradikal $-CH_2–CH°–R$ beobachtet werden, das in einer Ionen-Molekül-Reaktion gebildet wird.

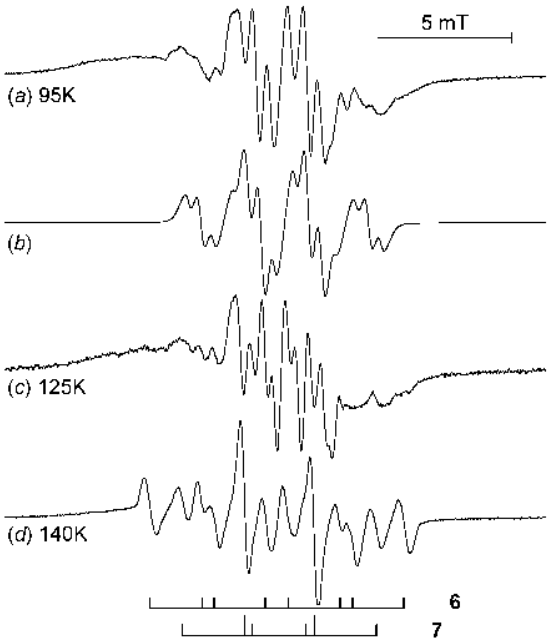


Abb. 1: EPR Spektren ((a), (c), (d)) einer gefrorenen Lösung von Ethylacrylat in CF_3CCl_3 (1:900), die bei 77 K bestrahlt und bei den angegebenen Temperaturen gemessen wurde. Die Simulation (b) wurde mit den folgenden Hfc–Parametern durchgeführt: $a_1(2H) = 2{,}25$ mT, $a_2(1H) = 1{,}7$ mT und $a_3(2H) = 0{,}45$ mT. Die Strichdiagramme verdeutlichen die Zuordnung der einzelnen Linien des Spektrums (d) zu den Strukturen **6** und **7**. Die Veränderung von (a) nach (c) ist vollständig reversibel.

/1/ W. Knolle, V. I. Feldman, I. Janovský, S. Naumov, R. Mehnert, H. Langguth, F. F. Sukhov; A. Yu. Orlov. *EPR study of methyl and ethyl acrylate radical cations and their transformations in low-temperature matrices.* J. Chem. Soc. Perkin Trans **2** (2002) 687.

Quantenchemische und EPR-Untersuchung von Lacton-Radikalkationen und ihrer Transformation

S. Naumov, I. Janovský, W. Knolle, R. Mehnert

Einleitung

Radikalkationen von unterschiedlichen Substanzklassen können durch Bestrahlung verdünnter, gefrorener Lösungen der neutralen Moleküle in Freonmatrix erzeugt und mittels EPR untersucht werden. Im Falle von Carbonylsäure- oder auch Acrylsäure-Estern bildet sich das primäre Radikalkation am Carbonylsauerstoff (EPR-Singulett). Selbst bei 77 K kann es nur in wenigen Fällen stabilisiert werden, da eine schnelle irreversible Umwandlung durch H-Verschiebung von der Alkylkette auf den Carbonylsauerstoff stattfindet. Die starre Ringstruktur der Lactone verhindert einerseits die Bildung einer günstigen Übergangsgeometrie für diesen Transfer und sollte so die Untersuchung der Primärkationenradikale ermöglichen, andererseits bietet die relativ starre Geometrie gute Voraussetzungen zur quantenchemischen Berechnung der Kopplungskonstanten und erleichtert somit die Zuordnung der EPR-Spektren.

Methode

Die quantenchemischen Berechnungen wurden mit der Dichte-Funktional-Theorie (B3LYP) mit dem 6-31G(d) Basisset (Gaussian 98) durchgeführt. Die isotropen Hyperfeinkopplungskonstanten wurden als Teil der Populationsanalyse berechnet und mit den experimentellen Werten aus der Tieftemperatur-EPR verglichen.

Ergebnisse

Wie die Berechnungen zeigen, gibt es zwei mögliche Reaktionskanäle für die primären Kationen, entweder die Bildung von distonischen Radikalkationen durch H-Transfer vom Ring zum Carbonylsauerstoff oder die Bildung neutraler Radikale durch Deprotonierung (Abb. 1). In beiden Fällen ist die bevorzugte Stelle für die Reaktion die CH_2-Gruppe am Ring in Nachbarschaft zur Carbonylgruppe. Die Stabilität der Primärspecies hängt dabei stark von der Geometrie ab. Die stabilsten Radikalkationen werden bei den 5teiligen Lactonringen beobachtet (Abb. 2, Singulett für Spektren 1 und 2), da hier der Abstand zwischen dem H-Atom am Ring und dem Carbonylsauerstoff und folglich auch die Aktivierungsenergie am größten sind (Tab. 1). Bei den 6teiligen Lactonringen ist die Aktivierungsenergie kleiner und man beobachtet bei 77 K im EPR-Spektrum neben dem Primärkation auch die distonischen Radikalkationen (Abb. 2, Spektren 3 und 4). Bei dem 7teiligen Caprolacton ist die Aktivierungsenergie so klein, dass schon kurz nach der Bestrahlung der H-Shift nahezu vollständig abgeschlossen ist und man im Wesentlichen (analog zu den längerkettigen Estern der Acrylsäure) nur das distonische Radikalkation beobachtet (Abb. 2, Spektrum 5). Die Deprotonierung wird erst bei höheren Temperaturen beobachtet, wenn durch Erweichung der Matrix die Diffusion der Radikalkationen zu einem Protonen-AkzeptorMolekül ermöglicht wird.

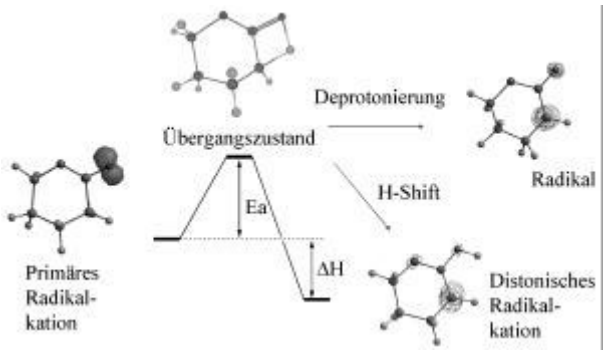


Abb. 1: Transformation der Lacton-Radikalkationen.

Tab. 1: Berechnete Reaktionsparameter für den intramolekularen H-Shift: Abstand L (O-H) (nm), Aktivierungsenergie E_a (kcal/mol) und Reaktionsenthalpie ?H (kcal/mol)

	Radikalkation	L (H-O)	E_a	?H
1	γ-Butyrolacton	0,2671	52,7	-23,5
2	γ-Valerolacton	0,2665	51,6	-21,2
3	δ-Valerolacton	0,2432	38,3	-24,0
4	δ-Hexanolacton	0,2444	38,7	-23,3
5	ε-Caprolacton	0,2332	28,3	-20,0

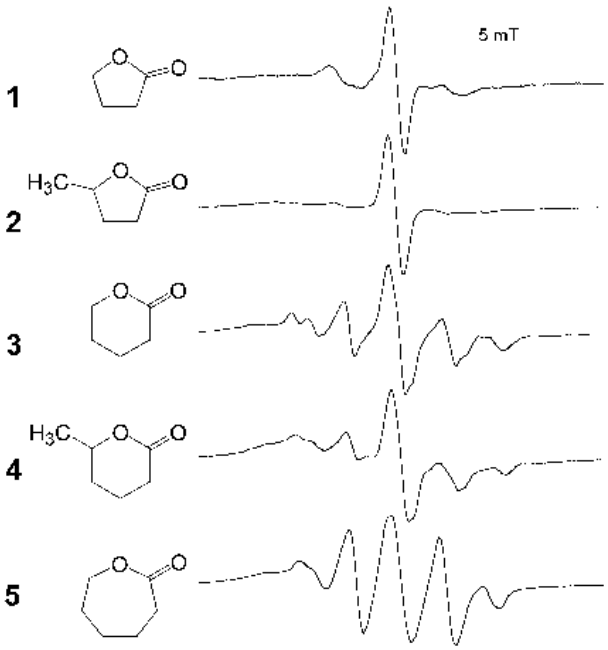


Abb. 2: Experimentelle EPR-Spektren der untersuchten Lactone bei 77 K in CF_3CCl_3, 3 min nach der Elektronenbestrahlung.

Strahlengehärtete Nanokomposit-Beschichtungen

H.-J. Gläsel, S. Rummel, F. Bauer, E. Hartmann, D. Hirsch, H. Langguth, R. Mehnert

Die mit metallorganischen Nanopartikeln erzielten Modifizierungseffekte konnten zu einem recht universellen Schema weiterentwickelt werden /1/: Bei der Präparation von Dispersionen anorganischer Nanopulver in strahlenhärtbaren Monomeren wurden durch eine heterogene hydrolytische Kondensation auf die Partikeloberflächen *in situ* organofunktionalisierte Silane kovalent angebunden. Nach der heterogenen Copolymerisation der Dispersionsfilme durch Strahlenhärtung (ESH, UV) zeigten die Ramanspektren (vgl. z. B. Abb. 1) einen weitgehenden Umsatz der C=C – Doppelbindungen infolge der Polymerisation des Acrylates (≅ 1635 cm^{-1}, Sartomer 494), aber einen deutlich geringeren infolge der heterogenen Copolymerisation (≅ 1600 cm^{-1}, Vinyltrimethoxy(VTMO)-Silan).

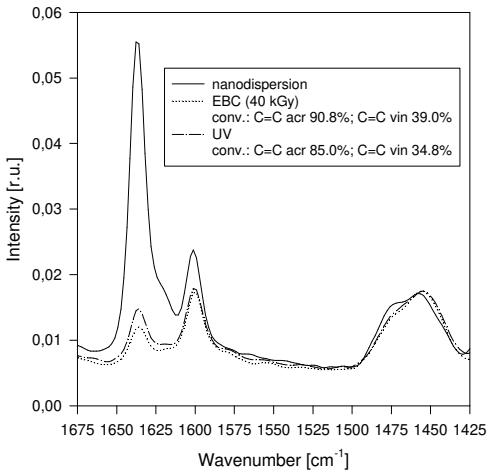


Abb. 1: Raman-Spektren für das SR494/TT600/VTMO-System

In der Systematik der oberfächenmechanischen Eigenschaften kann aber sogar auch das polymerisationsinaktive Propyltrimethoxy(PTMO)-Silan eine entsprechende Nanomodifizierung (Verringerung der Abriebwerte um typisch den Faktor 5) bewirken (Abb. 2).

Der letztgenannte Befund betont den Aspekt der bloßen Organophilierung der Nanoteilchen im Verhältnis zu deren kovalenter Einbindung. Die Umhüllung der Nanopartikel im Sinne eines Kern-Hülle-Modells wurde mit weiteren spektroskopischen Mitteln (DRIFT, ^{29}Si CP MAS NMR, MALDI-TOF) eingehend untersucht /2/.

Die kratz- und abriebfesten Nanokomposit-Beschichtungen werden im Rahmen eines BMBF-Verbundprojektes optimiert. Dabei erlangen verfahrenstechnische Gesichtspunkte wie das Auftragsverhalten stärkeres Gewicht. Insbesondere bilden die Nanopartikel und stärker noch deren Agglomerate unter Schubspannungen, wie sie beim Walzenauftrag auftreten, effektive Keime für dynamische Strukturen. Diese prägen den Nanodispersionen ein ungünstiges dilatantes Verhalten auf, wodurch einer Deglomeration große Bedeutung zukommt. Die erfolgreiche Formulierung erster Nanodispersionen eröffnet nun den Freiraum, die Wechselbeziehungen zwischen den Komponenten anorganisches Nanopulver, polymerisationsaktives/organophiles Agens und strahlenhärtbares Substrat eingehend zu untersuchen: Die kovalente Einbindung der oberflächenmodifizierten Nanopartikel konnte mit Hilfe einer Michael-Addition derart optimiert werden /3/, dass nur ein weit geringerer Anteil von (Amino)silanen eingesetzt werden muss. Weiter werden (oligomere) Substrate gesucht, die ohne vermittelnde Agentien eine organophile Partikelumhüllung bewirken können und es werden Mikropulver als zusätzliche Synergisten mit der Erwartung getestet, dass sie insbesondere die nachteiligen rheologischen Effekte der Nanokomponente aufheben können.

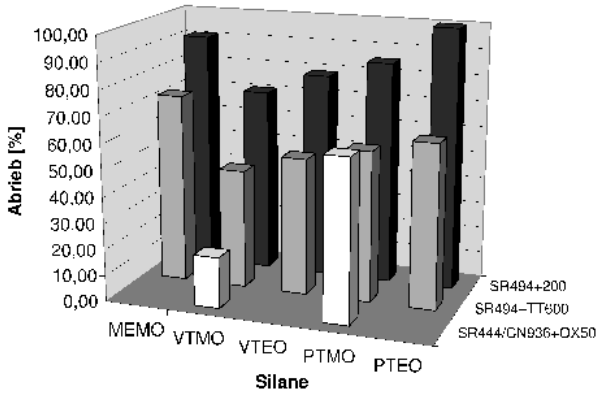


Abb. 2: Normierte Abriebwerte für Beschichtungsformulierungen aus verschiedenen Acrylatsubstraten, pyrogenen SiO_2-Nanopulvern (AEROSIL OX50, TT600, 200) und Silanen (DYNASYLAN MEMO, VTMO, VTEO, PTMO, PTEO)

Für die Präparation ferroelektrischer/ferromagnetischer Polymerschichten ist die kombinierte Polymerisation und Pyrolyse durch Hydrothermal- und Mizellenverfahren ergänzt worden. Dies erlaubte ein besseres Verständnis der Größeneffekte auf die genannten Basiseigenschaften in Perowskit- und Ferrit-Nanopulvern /4/. Diese Arbeiten liefern einerseits die Materialgrundlage für Grundlagenuntersuchungen (etwa im DFG-TP „Hochfeld-EPR-Untersuchungen an perowskitischen Nanopulvern“). Sie verfolgen aber zunehmend praktische Ziele wie die kalte Einbringung elektrisch dichter Komposite in miniaturisierte Kapazitätsdioden.

/1/ H.-J. Gläsel, E. Hartmann, R. Mehnert, D. Hirsch, R. Böttcher, Nucl. Instr. and Meth. B **151** (1999) 200.
/2/ F. Bauer, H.-J. Gläsel et al., Macromol. Chem. Phys. **201** (2000) 2654; **201** (2000) 2765; (2001) eingereicht.
/3/ *Beschichtungsmittel und Verfahren zur Erzeugung kratz- und abriebfester Beschichtungen,* Patent DE 199 61 632 A 1.
/4/ R. Böttcher, H. Rumpf, H.-J. Gläsel, E. Hartmann, E. Erdem, Phys. Rev. B **62** (2000) 2085; J. Phys. Chem. B **105** (2001) 3415.

Prototypische Entwicklung einer *in-line*-Kaschierung für strahlenhärtbare Verpackungsverbunde im Flexodruck

P. Klenert

Ziel

Ziel des BMBF-Projektes ist es, eine umweltfreundliche *in-line*-Technologie mit neuen strahlenhärtbaren Klebstoffen ohne Lösemittel und toxische Stoffe sowie die notwendige Auftragtechnologie zu entwickeln, die es gestattet, lösemittelfreie Druckfarben und Kleber in einem einzigen Arbeitsschritt auf der Flexodruckmaschine aufzutragen.
Der so produzierte Verbund soll dann innerhalb von 24 h weiter verarbeitbar sein.

Arbeitsergebnisse 2000/2001

Formulierungsentwicklung und Maschinenversuche:

Das Ziel der Untersuchungen in dieser Arbeitsetappe bestand im Auffinden eines oder mehrerer Klebstoffsysteme, die möglichst universell für Substrate und Druckfarben sowie für einen Maschinenauftrag aussichtsreich sind. Die Verbunde müssen den Anforderungen nach maximaler Verbundhaftung auf verschiedenartigen Folien und Farben, hoher Reaktivität, Sterilisierbarkeit, Kochwasserbeständigkeit, minimalem Geruch, Flexibilität und teilweiser Tiefziehbarkeit, Eignung für Lebensmittelverpackungen (Lebensmittelgesetz!), Verarbeitbarkeit in der Flexodruckmaschine gerecht werden.
Eine wesentliche Stoffgrundlage sind strahlenhärtbare Acrylate, die durch geeignete Formulierungen den Anforderungen angepasst werden müssen.
Aus der Rohstoffpalette der Klebstoffe zeigten die Acrylathybridsysteme auf Polyurethanbasis die besten Eigenschaften. Hier konnte die Laborarbeiten abgeschlossen und Pilotversuche auf der Druckmaschine durchgeführt werden.
Die erreichten Verbundfestigkeiten auf unbedruckten Folien weisen die nachfolgenden Abbildungen aus.

Arbeitsziele 2002

Im Weiteren sind die Entwicklungsarbeiten auf die bedruckten Substrate zu erweitern und die Bedingungen der Pilotmaschine an die Produktionsmaschine zu adaptieren sowie die notwendigen Zulassungen für die Gesamttechnologie zu erreichen.

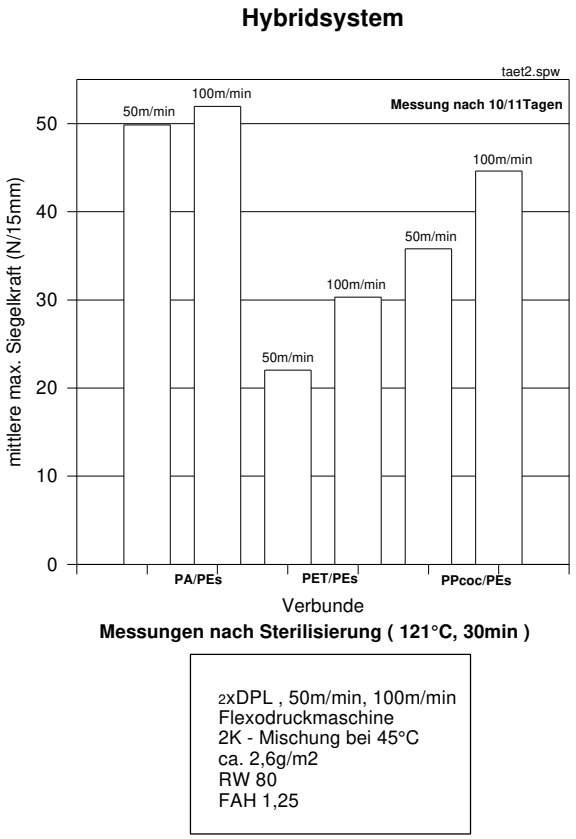


Abb. 1: Verbundhaftung

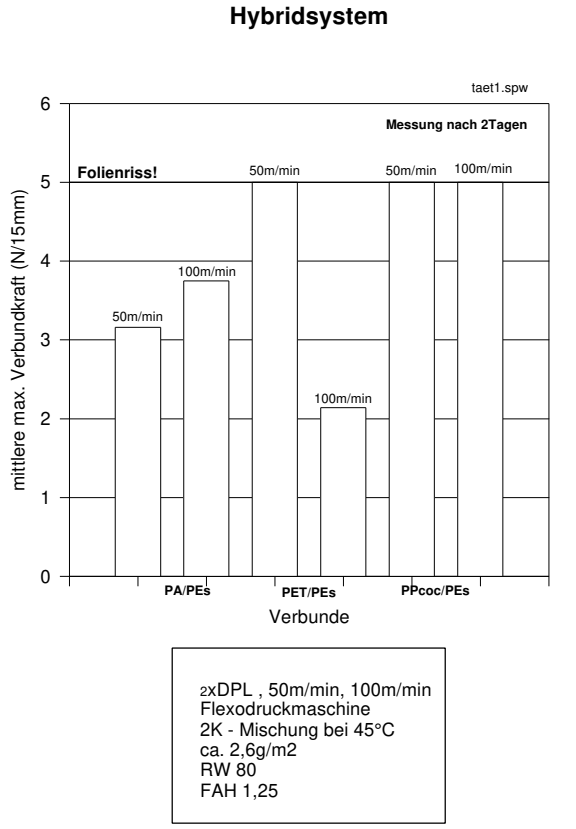


Abb. 2: Siegelnahtfestigkeit

Besonderheiten offener VUV-Excimerstrahler und deren Anwendung

M. Lenk, L. Prager

Die Entwicklung offener Ar-Excimer-Strahlersysteme im IOM hat einen Stand erreicht, der eine routinemäßige Untersuchung von Phänomenen der Oberflächenmodifizierung, Mikrofaltung, CVD-Abscheidung im VUV-Excimerplasma aus der Gasphase u. a. möglich macht. Erste anwendungsorientierte Experimente dazu wurden erfolgreich mit Partnern aus der Industrie und anderen Instituten durchgeführt.

Wesentliche Fortschritte zur Strahlertechnik konnten durch folgende Entwicklungen erreicht werden:

- Anwendung einer speziellen He-Startroutine, die ein sicheres Zünden und eine sofortige Betriebsbereitschaft ermöglicht.
- Aufbau eines modularen Strahlergehäuses und Einsatz von Flachquarz-Masseelektroden mit einer Silberbeschichtung.
- Anpassung eines geeigneten Röhrengenerators an die hier vorliegenden Lastverhältnisse (1 MHz, 2…3 KV, 2…5 KW, 100…200 pF). Röhrengeneratoren sind im Gegensatz zu Halbleitergeneratoren für die hier vorliegenden Entwicklungsarbeiten viel robuster und flexibler einsetzbar.

Für Anwendungen zur Oberflächenmodifizierung und Mikrofaltung wurde ein Aufbau nach folgendem Schema verwendet:

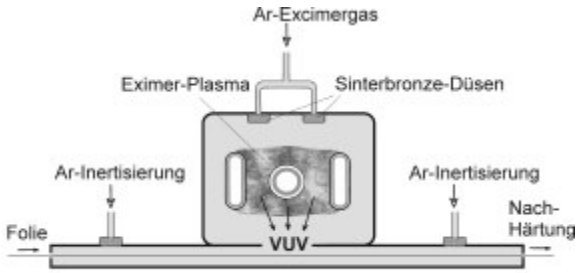


Abb. 1: Aufbau zur Oberflächenmodifizierung

Ein Anwendungsbeispiel ist die Entwicklung von „selbstreinigenden“ und „superabweisenden“ Textilien durch hydrophobe mikrostrukturierte Oberflächen.

Die folgenden Bilder zeigen typische Oberflächenstrukturen von Folien und Textilien, die mit einer speziellen Acrylatformulierung beschichtet, mit 126 nm-Photonen mikrostrukturiert und mit 308 nm-Excimerstrahlung nachgehärtet wurden.

Die 126 nm-Leistung betrug etwa 5...10 mW/cm² und die Fördergeschwindigkeit der Folie 2 m/min bei einem Ar-Verbrauch von ca. 15 l/min.

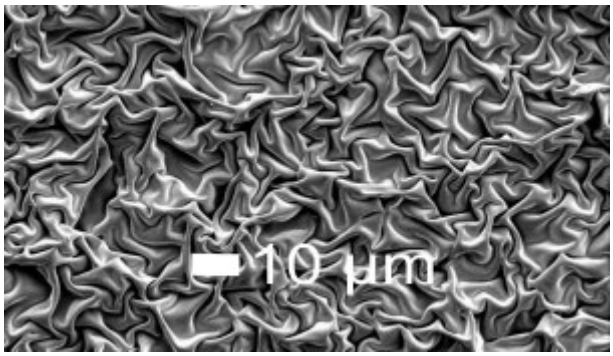


Abb. 3: Mikrostrukturierung auf einer PP-Folie

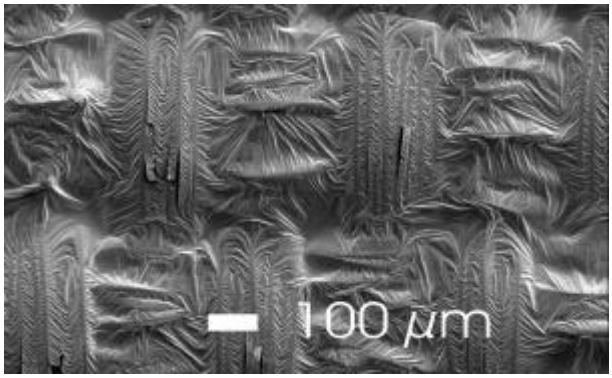


Abb. 4: Mikrostrukturierung auf Textilien

Für bestimmte Anwendungen wurde versucht, Folien direkt durch das Excimerplasma zu führen. Einen ersten erprobten Versuchsaufbau, beispielsweise zur CVD-Abscheidung, zeigt das nächste Schema:

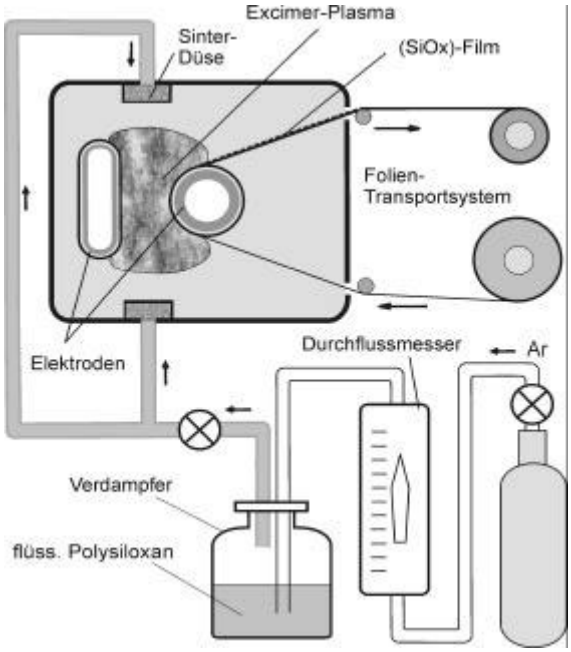


Abb. 2: CVD-Abscheidung mittels Ar-Excimerplasma

/1/ R. Mehnert UV&EB Curing Technology &Equipment (Wiley/SITA, Chichester/London, 1999).

/2/ M. Lenk, R. Mehnert, L. Prager, *Design and Performance Characteristics of a Windowless Argon Excimer Source* RadTech Europe 2001, Basel, 8.-10.10.2001.

Offener Argon-Strahler zur Modifizierung von Oberflächen

C. Elsner, M. Lenk, J. Reinhardt

Die hohe Energie von 126 nm-Photonen eines fensterlosen Argon-Excimer-Strahlers ermöglicht das Aufbrechen chemischer Bindungen bis 9,6 eV und somit eine nichtthermische Stoffwandlung der Substratoberfläche bis zu ca. 100 nm Tiefe unter Normaldruck. Im Folgenden sind verschiedene Untersuchungen zur Modifizierung von Oberflächen auf dieser Basis zusammengestellt:

Ätzen von Oberflächen

Durch IR-spektroskopische Untersuchungen sowie Schichtdickenmessung an PMMA-beschichteten Si(100)-Wafern (spin-coating-Verfahren) konnte ein Abbau von PMMA nachgewiesen werden. Abb. 1 zeigt das IR-Spektrum im Ausgangszustand sowie nach 16minütiger Photonenbestrahlung. Die Abnahme der Carbonyl-Bande bei 1729 cm^{-1} entspricht einer Reduzierung der Schichtdicke auf 37 % (Ausgangsschichtdicke: 84 nm). Schichtdickenmessungen (mit dem Gerät FTP500) erbrachten einen Wert um 50 %.

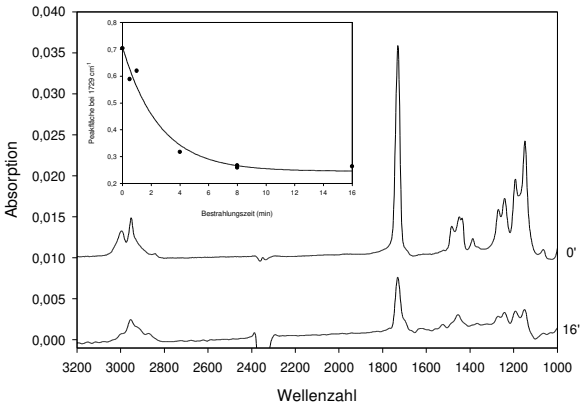


Abb. 1: IR-spektroskopischer Nachweis des Ätzens von PMMA mit 126 nm-Photonen

Degradation organischer Verbindungen

In Abhängigkeit von der Gaszusammensetzung können Organosilan-Schichten nahezu zu SiO_x- bzw. CO_x-Schichten abgebaut werden. Potenzielle Anwendungsgebiete sind beispielsweise Veränderungen der Gaspermeabilität bzw. -selektivität von Folien und Membranen und die Einstellung von Hydrophobie/Hydrophilie der Oberfläche. Am Beispiel von chemisch kondensierten Aminopropyltrimethoxysilan ist in Abb. 2a die Degradation zu SiO_xC_y unter Argon/Sauerstoff- bzw. in Abb. 2b die Degradation zu C_xO_y unter Argon-Gaszufuhr anhand von XPS-Messungen der chemischen Oberflächenzusammensetzung dargestellt.

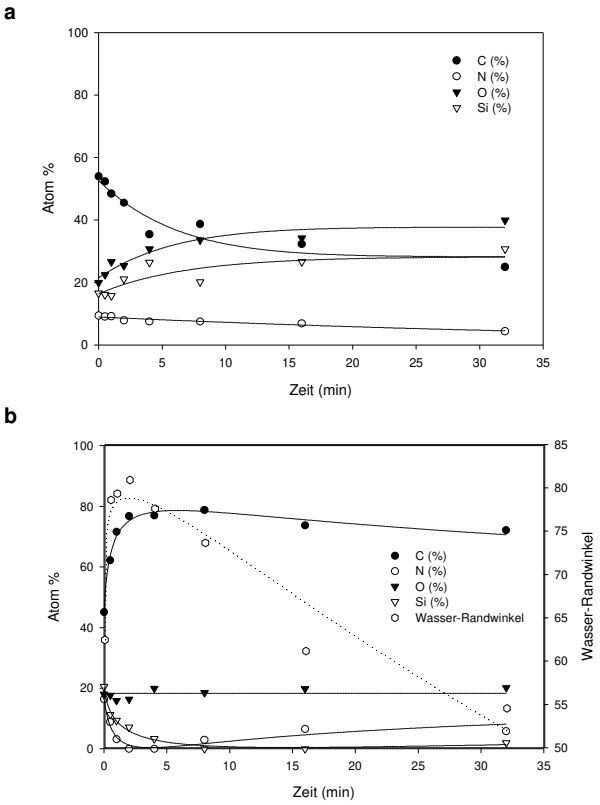


Abb. 2: Degradation von kondensierten Aminopropyltrimethoxysilan **(a)** zu SiO_xC_y unter Argon/Sauerstoff und **(b)** zu C_xO_y unter Argon-Gaszufuhr (Symbole: grau Kontaktwinkel, schwarz chemische Zusammensetzung)

Oberflächenaktivierung

Für Beschichtungs- und Druckverfahren auf inerten Substraten ist meistens eine Oberflächenaktivierung erforderlich. Die Bestrahlung von Kunststoffen wie beispielsweise Polypropylen mit 126 nm Photonen eignet sich zur Aktivierung der Oberfläche, wobei u. a. Hydroxygruppen durch die Reaktion mit Trifluoressigsäureanhydrid (Abb. 3) über XPS-Messungen nachgewiesen wurden (Tab. 1).

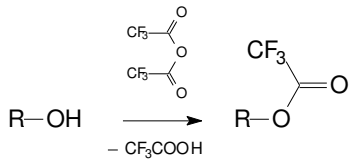


Abb. 3: Nachweis von OH-Gruppen über die Reaktion mit Trifluoressigsäureanhydrid (TFA)

Tab. 1: Untersuchungen zur chemischen Zusammensetzung von mit 126 nm-Photonen bestrahlten Polypropylen nach erfolgter Derivatisierung der OH-Gruppen mit TFA

Bestrahlungszeit (min)	C (%)	O (%)	F (%)
0	99,3	0	0,7
1	92,1	5,9	2
2	90,3	7,3	2,4
4	87,1	9,3	3,7
8	70,6	25,4	4

Untersuchungen zur Optimierung kontinuierlicher 3D-Mikroreplikationsverfahren

C. Elsner, A. Sobottka

Kostengünstige, großflächige Replikationsverfahren von 3D-Mikro- und Nanostrukturen mit einem hohen Durchsatz erlangen ein zunehmendes Interesse, beispielsweise für mikromechanische, mikrooptische und mikrofluidische Systeme, für den Bereich der Evaluierung von Oberflächentopologien als auch für die Herstellung von Oberflächen mit bestimmten rheologischen Eigenschaften /1/. Die Anwendung der Master-Replikat-Abformtechnik mittels UV-härtender Polymere ermöglicht die Herstellung von Replikaten in exzellenter Qualität /2/. Der zu Grunde liegende Prozess ist in Abb. 1a-b schematisch wiedergegeben.

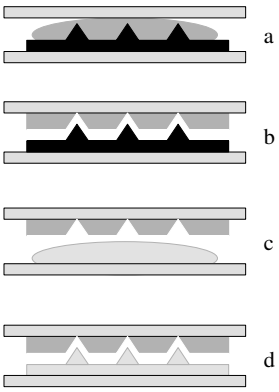


Abb. 1: Schematische Darstellung des Replikationsprozesses

a: Auftrag einer flüssigen Acrylatformulierung auf den Master

b: Trennung von Master und Zwischenmaster nach UV-Exposition

c: Auftrag einer flüssigen Acrylatformulierung auf den Zwischenmaster

d: Trennung von Zwischenmaster und Replikat nach UV-Exposition

Bei der Überführung der Replikationstechnik in einen kontinuierlichen industriellen Fertigungsprozess über eine Walzenabformung besteht oftmals die Notwendigkeit der Übertragung der Mikrostruktur eines Masters in einen flexiblen Zwischen-Master bzw. ein Klischee (Abb. 1c-d). Bei diesem Replikationsprozess treten Probleme auf, die eine Optimierung der Parameter erfordern:

- unzureichende Füllung des (Zwischen-) Masters mit flüssigem Acrylat, was zu Lufteinschlüssen am Interface (Zwischen-) Master-Replikat bei kompliziert hinterschnittenen Strukturen führt
- Abrisse während des Entformens
- Strukturänderungen durch Schrumpf
- Enthaftung von (Zwischen-) Master und Replikat

Das Ziel von Modelluntersuchungen bestand darin, die genannten Einschränkungen ganz oder teilweise zu beseitigen.
Beispielsweise ermöglicht das Aufbringen einer antiadhäsiven Schicht ein leichteres Enthaften von Master und Replikat. Zur Darstellung der Antihaftschichten wurden verschiedene Alkyltrichlorsilane eingesetzt, welche sich an der Substratoberfläche nach Hydrolyse selbst organisieren. Die dabei entstehenden Antihaftschichten können Oberflächenrauheiten aufweisen, welche die Qualität des Replikationsprozesses beeinflussen. Eine geeignete Variante zur Vermeidung von Oberflächenrauheiten besteht in der Bestrahlung des Masters mit 126 nm-Photonen vor der Behandlung mit Alkyltrichlorsilanen. Diese Photonen sind in der Lage, chemische Bindungen bis 9,6 eV zu spalten und somit anhaftendes organisches Material zu degradieren. Entsprechende RMS-Werte der Oberflächenrauheit wurden mittels AFM bestimmt und sind in Tab. 1 wiedergegeben.

Tab. 1: Oberflächenrauheit (RMS) von Silizium-Substraten nach unterschiedlichen Oberflächenbehandlungen

Silizium-Substrat	RMS (nm)
Unbehandelt	0.146
Perfluordecyltrichlorsilan-behandelt	1.202
VUV-behandelt	0.129
VUV- und Perfluordecyltrichlorsilan-behandelt	0.168

Abb. 2 zeigt die prinzipielle Möglichkeit einer Master-Zwischenmaster-Replikatabformung für Strukturen von < 2 µm.

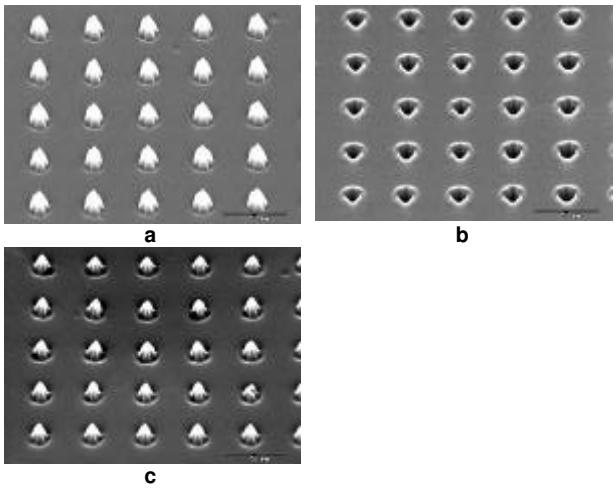


Abb. 2: Beispiel einer Master-Zwischenmaster-Replikat Abformung
a: Silizium-Master, **b:** Acrylat-Zwischenmaster,
c: Replikat

/1/ R. Mehnert, E. Hartmann, H.-J. Gläsel, S. Rummel, F. Bauer, A. Sobottka, C. Elsner, *Funktionelle Schichten durch UV- und Elektronenstrahlhärtung*, Mat.-wiss. u. Werkstofftech. **32** (2001) 774.

/2/ St. Rudschuck, D. Hirsch, K. Zimmer, K. Otte, A. Braun, R. Mehnert, F. Bigl, *Replication of 3D-micro- and nanostructures using different UV-curable polymers*, Microelectr. Eng. **53** (2000) 557.

UV-vernetzende Haftklebstoffe

A. Tauber, T. Scherzer, I. Weiß

UV-vernetzende Haftklebstoffe auf der Basis von polymeren Acrylaten besitzen im Vergleich zu konventionellen Klebstoffen eine Reihe von Vorteilen, u. a. eine gute Alterungsbeständigkeit /1/. Der Hauptvorteil ist, dass durch Vernetzung der Polymerketten Klebstoffe erhalten werden, die auch noch bei erhöhten Temperaturen gute Festigkeiten der Klebeverbindung aufweisen.

Gegenstand der Untersuchungen war ein Haftklebstoff auf Acrylatbasis, der in den Seitenketten ein copolymerisiertes Benzophenonderivat besitzt (Abb. 1). Bestrahlung mit UV-Licht führt zum Umsatz des Benzophenons und damit zu einer Vernetzung der Klebstoffpolymere.

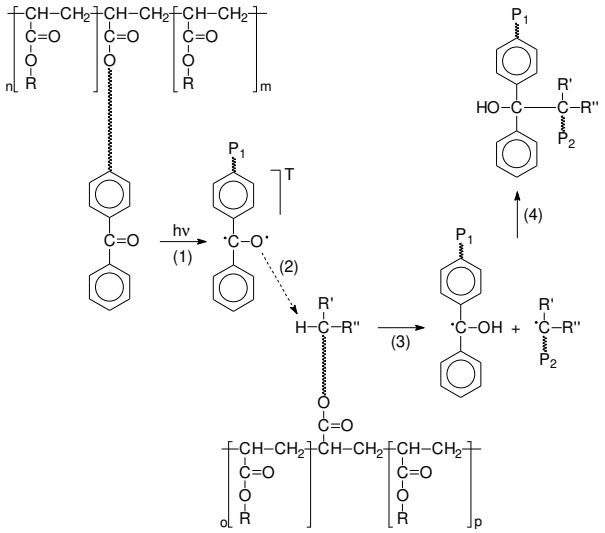


Abb. 1: UV-Vernetzung der Polymerketten eines Klebstoffes auf Acrylatbasis über den Triplett-Zustand des copolymerisierten Benzophenons.

Der Umsatz des copolymerisierten Benzophenons wurde mittels zeitaufgelöster FTIR-Spektroskopie untersucht. Praxisnahe Bedingungen lassen sich dabei unter anderem durch UV-Lichtpulse simulieren (s. a. /2/). Die Anzahl der Pulse und ihre Dauer entsprechen dabei der Zahl der verwendeten UV-Lampen und der Geschwindigkeit des Produktionsprozesses. Die Ergebnisse einer solchen Simulation sind in Abbildung 2 dargestellt. Der Benzophenonumsatz ist dabei von der Dauer der UV-Bestrahlung anhängig, aber unabhängig vom Bestrahlungsregime; ein Puls von 6 s führt zum gleichen Umsatz wie drei aufeinander folgende Pulse von 2 s Dauer. Weiterhin konnte durch Variation der Intensität des UV-Lichts gezeigt werden, dass der Umsatz des Benzophenons nur von der UV-Dosis (Intensität × Bestrahlungsdauer) abhängig ist /1/.

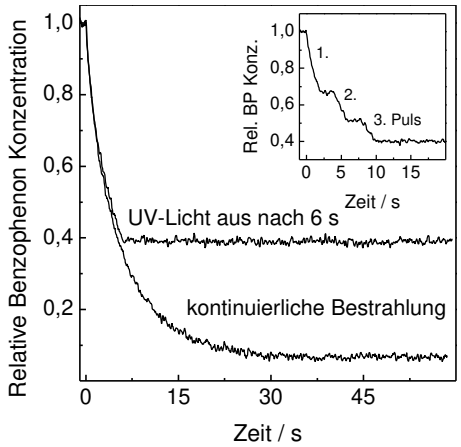


Abb. 2: Zeitaufgelöste IR-Spektroskopie: Benzophenon-Umsatz bei kontinuierlicher und gepulster Bestrahlung (Pulslänge: 6 s). Einschub: drei Pulse von je 2 s Dauer (Abstand: 2 s).

Die Klebstoffeigenschaften wie Schäl- und Wärmestandsfestigkeit wurden durch Auftrag auf ein Substrat und anschließende Bestrahlung mit einer UV-Laboranlage ermittelt. Beide sind vom Grad der Vernetzung der Polymerketten abhängig (Abb. 3). So steigt zum Beispiel die Festigkeit der Klebeverbindung in Abhängigkeit von der Temperatur durch die UV-Bestrahlung an. Bei den Experimenten im Labormaßstab konnte eine gute Übereinstimmung mit denen der zeitaufgelösten IR-Spektroskopie beobachtet werden /1/; wie z. B. die Unabhängigkeit vom Bestrahlungsregime oder der Intensität (Abb. 3), wenn die applizierte UV-Dosis konstant ist.

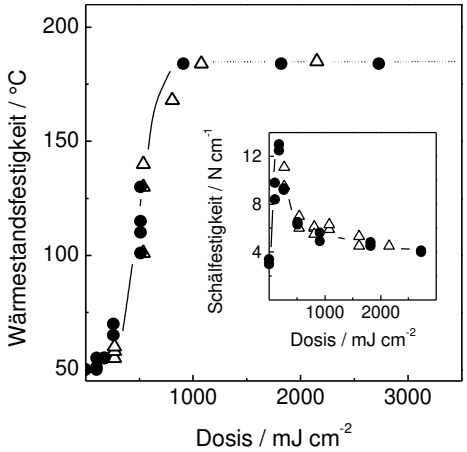


Abb. 3: Wärmestands- und Schälfestigkeit als Funktion der UV-Dosis und Intensität (●: 100 %, Δ: 50 %) bei Bestrahlung im Labormaßstab (Auftragsgewicht: 65 g m^{-2}).

/1/ A. Tauber, T. Scherzer, I. Weiß, R. Mehnert, *UV-Curing of pressure sensitive adhesives: from mechanistic aspects towards practical applications*, Proc. RadTech Aisa 2001, Kunming (China) (2001), 403.

/2/ A. Tauber, T. Scherzer, R. Mehnert, *UV curing of aqueous polyurethane acrylate dispersions. A comparative study by real-time FTIR spectroscopy and pilot scale curing*, J. Coat. Tech. **12** (2000) 51.

Optimierung strahlentechnologischer Basisprozesse

M. Tartz, E. Hartmann, M. Lenk, L. Prager, H. Neumann

Die Modellierung von Elektronenstrahlungsfeldern hat einen relativ abgeschlossenen Stand erreicht. Weitere Arbeiten richteten sich auch auf UV-technologische Probleme. So wurde beispielsweise das Intensitätsprofil einer UV-Excimer-Lampe in Abhängigkeit von den Reflexionsbedingungen simuliert (/1/ S. 64). Weiter wurde eine nach der Methode der finiten Elemente konzipierte Simulation einer UV-Strahlungsdegradation von chlorierten Schadstoffen in Abgasen abgeschlossen. Der zugrundeliegende Ansatz verdankt es effektiven Näherungen, dass er eine wirkungsvolle Assistenz in der methodischen Entwicklung eines UV-Reaktors ermöglichte. Die hohe Recheneffizienz beruht auf einer partiellen Symmetrieerhöhung (axialsymmetrischer Photoreaktor). Dazu erlaubt die Behandlung auf einer weitgehend phänomenologischen Ebene in Termen von Quantenausbeuten und Ratenkonstanten eine dichte Beschreibung, in die auch mehrere Schadstoffkomponenten einbezogen werden können. Im nachhinein wird die Stabilität des Betriebes des UV-Reaktors sehr anschaulich: Die Schadstoffe werden in schmalen Reaktionsfronten vor der UV-Lampe abgebaut, und geänderte Reaktivitäten oder UV-Leistungen bewirken nur deren axiale Verschiebung (/2/, Abb. 1).

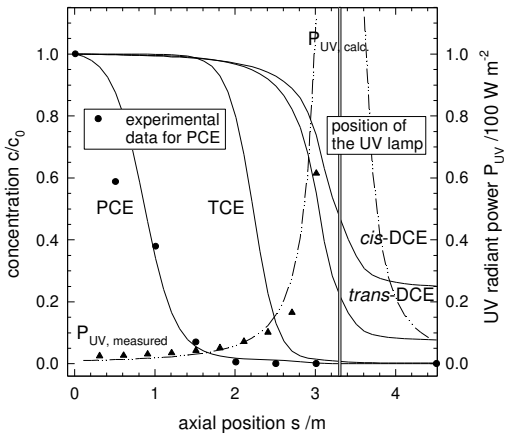
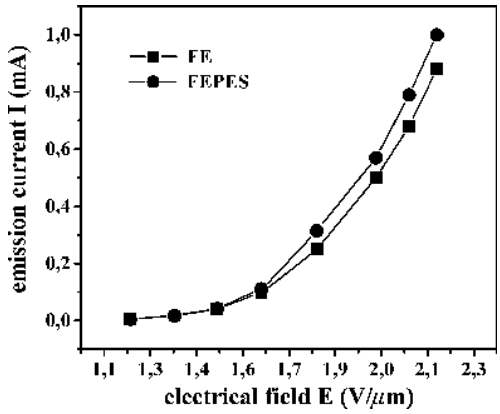


Abb. 1: Abbau chlorierter Ethylene – axiale Profile der Schadstoffkonzentrationen und der UV-Intensität c_0 = 175 ppm; V' = 135 m^3 h^{-1}; P_{UV} = 150 W.

Der größte Fortschritt wurde aber im Felde der Beschreibung von Ionenstrahlungsfeldern erzielt /3/: Die Einbeziehung sekundärer Prozesse wie Umladungsstöße, Sputtern durch Umladungsionen wurden in einem Maße verfeinert, dass die Redeposition des gesputterten Materials und die Gittererosion in ihrem zeitlichen Verlauf betrachtet werden konnte. Eine weitere methodische Erweiterung bezog sich auf das grundsätzliche Herangehen: Die bislang exerzierten Trajektorienbeschreibungen setzen eine weitgehende Kenntnis des Plasmazustandes voraus. Die Machbarkeitsuntersuchung einer neuartigen mehrstufigen Ionenquelle musste aber gerade diesen als Ergebnis der Betriebs- und Anregungsbedingungen erbringen. Die Modellierung der betreffenden ionenstrahltechnischen Vorrichtungen wird nun auch nach einem expliziten Vielteilchenschema mit einem Literaturverfahren /4/ beherrscht. Es werden in einem mehrstufigen Reaktor Plasmaverteilungen erhalten, die zunächst bei einer vernünftigen Grenzschicht einige Grundforderungen wie Quasineutralität und Feldfreiheit erfüllen, deren Stationarität aber numerisch noch nicht hinreichend gewährleistet ist.

In den letzten Jahren wurden in der Literatur gerade an diamantartigen (DLC)-Dünnfilmen interessante Modifizierungseffekte berichtet. So werden in der Literatur durch die Energiedeposition hochenergetischer Ionen zwar deren Spuren elektrisch leitend ($sp^3 \rightarrow sp^2$ /5/), aber trotz deren hohen Aspektverhältnisses konnte keine Kaltelektronenemission nachgewiesen werden. Unter Einsatz vielfältiger spektroskopischer und mikroskopischer Verfahren wurden für arc-modifizierte PLD – DLC-Dünnfilme bei äußerst geringer Schwellfeldstärke nicht nur eine intensive Kaltelektronenemission (FE), sondern eine simultane Photoemission (FEPES) gefunden /6/:



Diese Arbeiten haben in den Grundlagen einen vorläufigen Abschluss gefunden und sind in ihrer Fortsetzung an verbindliche Anwendungen (Ersatz der Glühkatode in der Elektronenstrahltechnik oder von β-radioaktiven Folien in der Gasanalytik) gebunden.

/1/ R. Mehnert, *UV & EB Curing Technology & Equipment* (Wiley/SITA, Chichester/London, 1999).
/2/ L. Prager, E. Hartmann, J. Photochem. Photobiol. A **138** (2001) 177.
/3/ M. Tartz, E. Hartmann, R. Deltschew, H. Neumann, Rev. Sci. Instrum. **71** (2000) 678; 732; Surf. & Coat. Technol. **142** (2001) 34.
/4/ J. P. Verboncoeur, A. B. Langdon, N. T. Gladd, Comput. Phys. Commun. **87** (1999) 199.
/5/ M. Waiblinger et al., Appl. Phys. A **69** (1999) 239.
/6/ T. Thärigen, E. Hartmann, M. Lenk, A. Mende, K. Otte, Appl. Surf. Sci. **182** (2001) 142.

Abluftreinigung mittels Elektronen- und UV-Bestrahlung

L. Prager

Das BMBF-Verbundprojekt "Entwicklung und Erprobung eines Verfahrens zum Abbau von aromatischen Kohlenwasserstoffen (BTEX) in der Stripperabluft von Grundwassersanierungsanlagen durch Elektronenbestrahlung" einschließlich des am IOM bearbeiteten Teilprojektes „Abbau von Einzelsubstanzen, BTEX- und BTEX-CKW-Gemischen, Pilotversuche" wurde abgeschlossen. Gemeinsam mit den Projektpartnern Forschungszentrum Karlsruhe GmbH, Stadtwerke Düsseldorf AG und Max-Planck-Institut für Strahlenchemie Mülheim/Ruhr wurde eine Technologie für den Abbau von Benzol, Toluol, Ethylbenzol und Xylolisomeren in Luft oder alternativ in Sauerstoff-Argon-Gemischen erarbeitet. Dabei galt die besondere Aufmerksamkeit der Vermeidung von problematischen Reststoffen.

Die BTEX werden in einem herkömmlichen Stripper aus dem mit einem Volumenstrom von 10-20 $m^3 h^{-1}$ geförderten Grundwassers mit einem Luftstrom von ca. 500 $m^3 h^{-1}$ ausgetrieben, der durch ein dem Stripper vorgeschaltetes Gebläse erzeugt wird.

Die durch den Strippprozess nassgesättigte Luft wird in die Bestrahlungskammer eines Elektronenbeschleunigers vom Typ LEA 3 (IOM) geführt und mit einer Dosis von maximal 20 kGy bestrahlt, was bei einem Gesamtwirkungsgrad des Elektronenstrahlers von 50 % einer elektrischen Leistung von etwa 7 kW entspricht.

Ein nachgeschalteter Gaswäscher und ein Nasselektrofilter reinigen den Gasstrom von gas- und partikelförmigen Reaktionsprodukten. Die sich in der wässrigen Phase anreichernden Stoffe und ihre Hydrolyseprodukte erzeugen ein beladenes Abwasser, das periodisch durch Frischwasser ersetzt und entsorgt werden muss. Seine zunächst erhebliche Toxizität macht eine dezentrale biologische Vorreinigung vor der Einleitung in die Kanalisation erforderlich.

Der gereinigte Gasstrom wird über ein Aktivkohlefilter zum Abbau des bei der Elektronenbestrahlung entstehenden Ozons und zur Adsorption eventuell nicht vollständig ausgewaschener Bestrahlungsprodukte geleitet. Der Hauptteil des Gasstromes wird optional über einen Luftkühler (Rückkühler an Außenluft) im Kreislauf wieder in den Stripper geführt. Um die Entstehung toxischer Nitroverbindungen bei der Bestrahlung zu minimieren, wird der Stickstoff der Stripperluft weitgehend durch Argon ersetzt, wobei gleichzeitig der Sauerstoffgehalt zu kontrollieren ist.

Die Ergebnisse wurden in einem Abschlussbericht zusammengefasst /1/, eine gemeinsame zusammenfassende Publikation in einer internationalen Fachzeitschrift wurde weitgehend erstellt /2/.

Im Auftrag der Stadtwerke Düsseldorf wurde eine Verfahrensentwicklung für den CKW-Abbau in Stripperabluft durch direkte photochemische Degradation mittels eines 222-nm-Excimerstrahlers mit nachfolgender hydrothermischer Behandlung der Wäscherlösung wissenschaftlich begründet sowie als Technikumsanlage aufgebaut, erprobt und optimiert. Die dazu durchgeführten wissenschaftlichen Arbeiten wurden in einer Dissertationsschrift zusammengefasst und an der Universität Leipzig, Fakultät Chemie und Mineralogie, verteidigt /13/ sowie in Fachzeitschriften veröffentlicht /4, 5/.

/1/ L. Prager, H.-R. Paur, R. Mehnert, C. von Sonntag, J. Schubert, *Entwicklung und Erprobung eines Verfahrens zum Abbau aromatischer Kohlenwasserstoffe (BTEX) in der Stripperabluft von Grundwasserreinigungsanlagen durch Elektronenbestrahlung*, Abschlußbericht des BMBF-Verbundvorhabens 02 WT 9655/56/57/58, (2001).

/2/ L. Prager, G. Mark, H. Mätzing, H.-R. Paur, J. Schubert, H. F. Frimmel, H.-P. Schuchmann, M. N. Schuchmann, C. von Sonntag, *Electron-beam treatment of aromatic hydrocarbons that can be air-stripped from contaminated groundwater. Free-radical chemistry of these compounds in humid air and in aqueous solution*, Environ. Sci. Technol., eingereicht 2/02.

/3/ L. Prager, *Abbau chlorierter Ethene in Abluft aus Grundwasser- und Bodensanierungsanlagen: 222-nm-Bestrahlung, alkalische Wäsche und thermische Nachbehandlung der Waschlauge*, Dissertation; Universität Leipzig, (2000).

/4/ L. Prager, E. Hartmann, *New degradation route of chlorinated ethylenes in exhaust gases from ground water remediation*, J. Photochem. Photobiol. A: Chem. **138**/2 (2001) 177.

/5/ L. Prager, P. Dowideit, H. Langguth, H.-P. Schuchmann und C. von Sonntag, *Hydrolytic removal of the chlorinated products from the oxidative free-radical-induced degradation of chloroethylenes: acid chlorides and chlorinated acetic acids*, J. Chem. Soc., Perkin Trans. **2** (2001) 1641.

FACHBERICHTE

- LADUNGSTRANSPORTPROZESSE UND IONENSTRAHLQUELLEN
- PRÄZISIONS-OBERFLÄCHENFORMGEBUNG
- µM- UND NM-STRUKTUREN
- OBERFLÄCHENMODIFIZIERUNG UND ANORGANISCHE SCHICHTEN

Optimierung des Strahlprofiles von Breitstrahl-Ionenquellen

M. Tartz, E. Hartmann, R. Deltschew, H. Neumann

Im IOM wurde in den letzten Jahren eine effektive Modellierungsstrategie entwickelt, mit der die Ionenextraktion und die Formung des Ionenstrahles in Breitstrahl-Ionenquellen umfassend beschrieben wird. In enger Wechselwirkung mit dem Experiment wird die Simulation validiert und erweist sich als ein effektives Werkzeug für die Entwicklung und Optimierung von Extraktionssystemen für die speziellen Anforderungen der Anwender bezüglich Strahlform und Strahldivergenz.
Zur gezielten Formung des Breitstrahlprofiles ist es notwendig, das Plasmaprofil an der Plasmagrenzschicht des Schirmgitters der Ionenquelle zu kennen. Das mittlerweile routinemäßige Vorgehen im IOM stützt sich dabei auf Messungen der auf die Extraktionsgitter fallenden Ströme in Abhängigkeit von der Extraktionsspannung und deren Simulation /1/. Qualifizierte Modellfunktionen der Plasmadichteverteilung erhält man aus Messungen des Strahlprofiles mittels Faraday-Sonden nahe am Extraktionssystem selbst und der ortsaufgelösten Spektroskopie des vom Plasma emittierten Lichtes /2/. Hiermit gelang es, für verschiedene Quellentypen des IOM Plasmadichteverteilungen abzuleiten, mit denen sich die Modellierung des Breitstrahlprofiles signifikant verbesserte /2/ (Abb. 1).

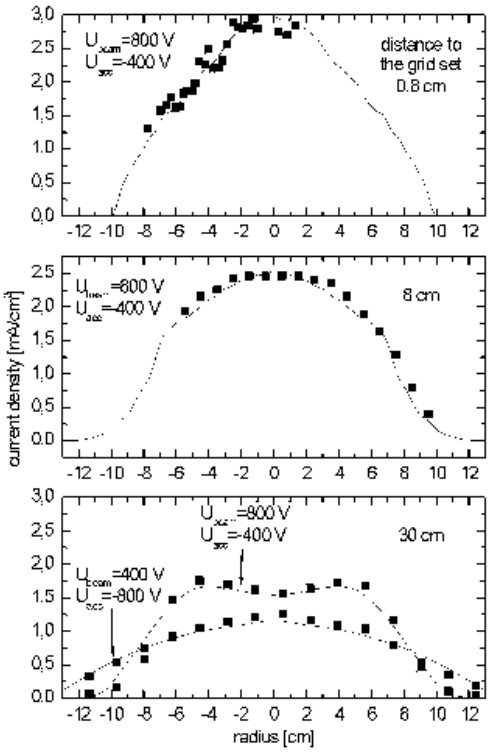


Abb. 1: Breitstrahlprofile der ISQ 150 ECR in verschiedenen Abständen im Vergleich zu simulierten Profilen unter Verwendung einer Bessel-Plasmaverteilung.

Es wurde untersucht, wie sich durch eine Modifizierung des Extraktionssystems die Homogenität des Strahlprofiles verbessern lässt. Basierend auf der Plasmaverteilung und simulierten Abhängigkeiten der Einzelstrahlparameter (extrahierter Strom, Divergenz, Gitterstrom) von den Extraktionsparametern wurden zunächst Durchmesser und Abstände der Extraktionslöcher so modifiziert, dass eine über das Gitter homogene Einzelstrahldivergenz und homogene Stromdichte erreicht wird. Jedoch führt die daraus resultierende Störung der hexagonalen Lochstruktur zu einer verringerten Gittertransparenz. Der gleiche homogenisierende Effekt kann durch eine radiale Anpassung der Schirmgitterdicke erreicht werden (Abb. 2), die sich praktisch leichter umsetzen lässt.

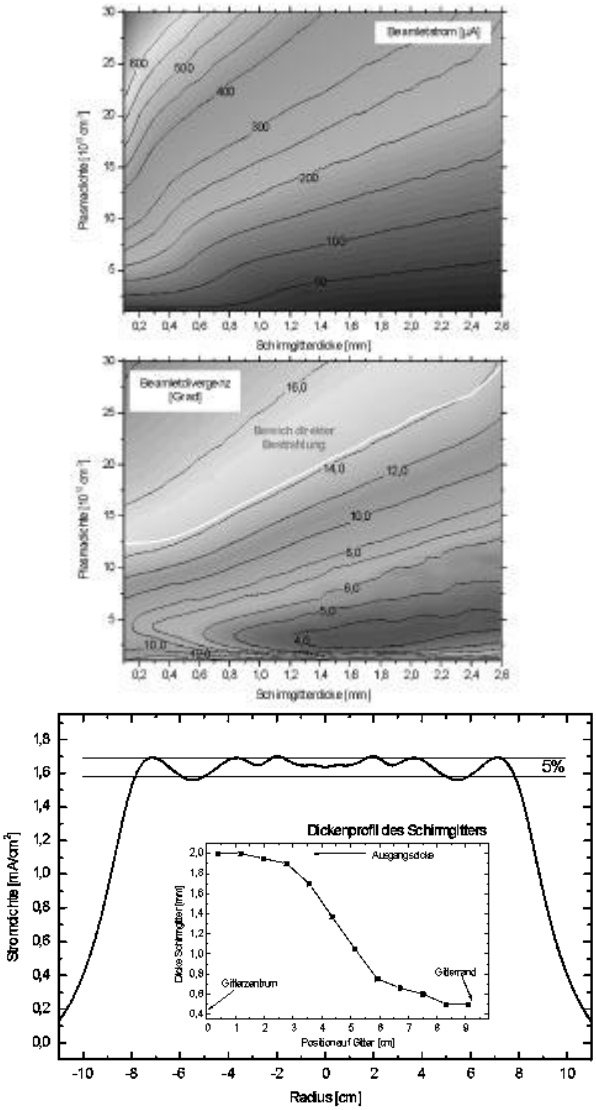


Abb. 2: Oben: Abhängigkeit von Beamletstrom und –divergenz von der Schirmgitterdicke und Plasmadichte. Unten: Homogenisiertes Breitstrahlprofil der ISQ 150 ECR.

/1/ M. Tartz, E. Hartmann, R. Deltschew, H. Neumann, Rev. Sci. Instrum. **71** (2000) 678.
/2/ M. Tartz, E. Hartmann, R. Deltschew, H. Neumann, Surf. Coatings Technol. **142-144** (2001) 34.

3D-Effekte in Ionenextraktionssystemen

M. Tartz, E. Hartmann, R. Deltschew, H. Neumann

Das Extraktionssystem einer Breitstrahl-Ionenquelle besteht aus einer Vielzahl von Extraktionskanälen auf 2 oder 3 Extraktionsgittern, die im Idealfall perfekt justiert und ausgerichtet sind. In der Simulation dieser Systeme betrachtet man ausschließlich einzelne Extraktionskanäle und nutzt mit einer zweidimensionalen Näherung die meist vorhandene Axialsymmetrie aus. Die Überlagerung der extrahierten Einzelstrahlen (*beamlets*) ergibt den Breitstrahl.

Es gibt eine Reihe von Extraktionsbedingungen, in denen die Axialsymmetrie der Konfiguration gestört ist. Dies tritt z. B. auf bei Schüsselgittern, wenn die Extraktionskanäle parallel zur Strahlachse angelegt sind oder bei senkrecht zur Strahlachse versetzten Löchern, mit denen ein fokussierendes flaches Gittersystem ermöglicht wird. Dieser Versatz kann aber auch unerwünscht vorkommen durch unzureichende Justage der Gitter oder aufgrund von Änderungen im Gittersystem während der Einlaufphase der Ionenquelle. Die Nutzung nichtaxialsymmetrischer Extraktionsgeometrien wie z. B. rechteckiger Löcher oder Schlitzgitter verspricht Vorteile in einigen Konfigurationen. Eine Betrachtung all dieser Effekte erfordert zwingend ein dreidimensionales Herangehen. Am IOM wird hierfür der kommerzielle KOBRA-Code verwendet /1/.

Bei sehr niedriger Perveanz können benachbarte Extraktionskanäle über die Plasmagrenzschicht wechselwirken, womit die 2D-Näherung nicht mehr anwendbar wäre. Die Untersuchung dieses Effektes ergab eine hexagonale Struktur des Randes des Beamletprofiles (Abb. 1), die aber bei höherer Perveanz und insbesondere unter praktisch relevanten Bedingungen nicht mehr auftritt.

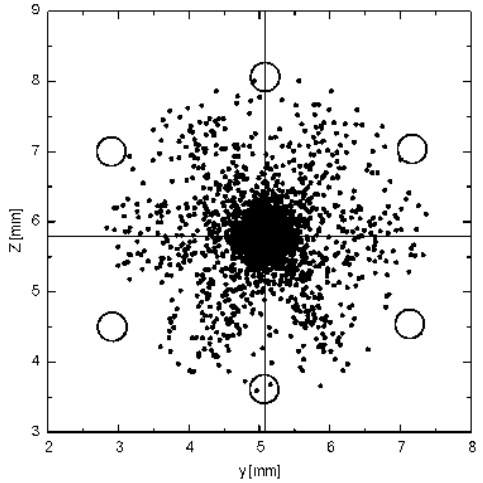


Abb. 1: Hexagonales Beamletprofil, hervorgerufen durch die Wechselwirkung benachbarter Löcher.

Es wurden die Auswirkungen einer Verschiebung der Löcher des Beschleunigungsgitter aus der Strahlachse heraus systematisch untersucht /2/. Das Trajektorienbild in Abb. 2 zeigt, dass eine Verschiebung des Beschleunigungsgitters eine Ablenkung des Einzelstrahles in der entgegengesetzten Richtung bewirkt. Der Winkel dieser Ablenkung wurde als lineare Funktion der Elektrodenverschiebung festgestellt. Es zeigte sich, dass unter bestimmten Extraktionsbedingungen der Ablenkwinkel stark vom extrahierten Ionenstrom abhängen kann.

Mit diesen Rechnungen konnte die systematische und reproduzierbare Wanderung des Ionenstrahlvektors bei Variation des Ionenstromes, wie sie beim Test des RIT10-Ionentriebwerkes (Fa. Astrium GmbH) beobachtet wurde, auf einen geringfügigen Versatz des Beschleunigungsgitters um 30 µm zurückgeführt werden /3/.

Mit Hilfe dieser Simulation sollen zukünftig flache fokussierende Extraktionssysteme sowie Systeme mit nicht-axialsymmetrischen Extraktionsöffnungen optimiert werden.

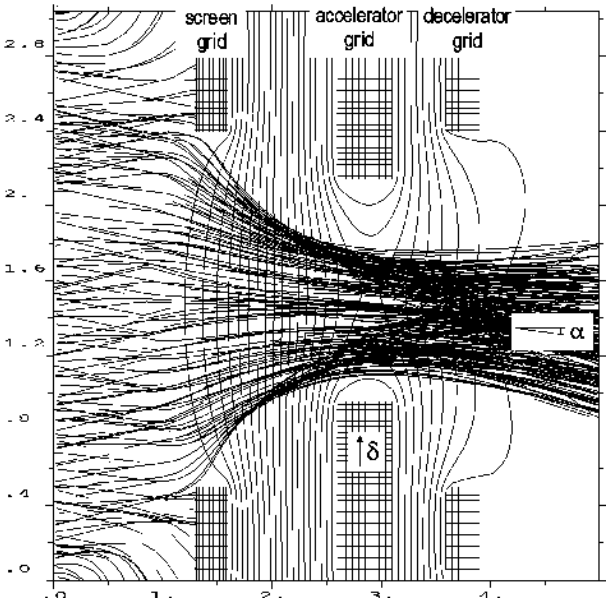


Abb. 2: Ablenkung des Beamlets durch eine Verschiebung des Beschleunigungsgitters.

/1/ INP, Junkernstr. 99, D-65205 Wiesbaden, http://www.inp-dme.com

/2/ M. Tartz, E. Hartmann, R. Deltschew, H. Neumann, *Effects of aperture displacement in broad-beam ion extraction systems*, Rev. Sci. Instrum., im Druck.

/3/ M. Tartz, E. Hartmann, R. Deltschew, H. Neumann, *Thrust-vector tilting caused by grid misalignment*, Paper IEPC-01-114, 27th Int. Electric Propulsion Conf., Pasadena, CA, 15-19 October, 2001.

Lineare Ionenstrahlquelle LISQ

F. Scholze, H. Neumann, B. Faust., B. Dathe, R. Woyciechowski

Eine lineare Ionenstrahlquelle (LISQ) (Abb. 1) wurde, basierend auf den Ergebnissen zur großflächigen Plasmaanregung, wie sie im vorherigen Tätigkeitsbericht veröffentlicht sind, konstruiert und gebaut. Dem LISQ-Prototyp liegt ein modulares Konzept zugrunde. Die LISQ 600 besteht aus drei separaten Modulen mit einer Länge von 200 mm. Die Mikrowelleneinspeisung erfolgt über je eine Antenne pro Modul und mit Hilfe der Elektronen-Zyklotron-Resonanz (electron cyclotron resonance ECR) bei der MW-Anregungsfrequenz von 2,45 GHz und einem statischen Magnetfeld von 875 G (spezielle NdFeB–Permanentmagnetanordnung) wird das Plasma im Entladungsraum generiert. Diese Art der Einkopplung der Mikrowellenleistung pro Modul ermöglicht eine Regelung der MW-Leistung und damit eine Plasmadichteanpassung in den einzelnen Modulen. Die Module sind in einem entsprechenden Gehäuse aneinander gereiht und werden durch ein Multiaperture-Gittersystem (2 oder 3 Gitteramordnung) abgeschlossen. Mit diesem Gittersystem kann durch ein entsprechendes Design ein fokussierter, divergenter oder kollimierter Ionenstrahl erzeugt werden. Als Gittermaterial wird Graphit oder Molybdän eingesetzt. Für den Prototyp wurden gewölbte Gitter aus Graphit gefertigt, die eine Gesamtgitteröffnung von 600 mm x 120 mm besitzen und den Ionenstrahl in einem Abstand von 200 mm in der Längsachse fokussieren.

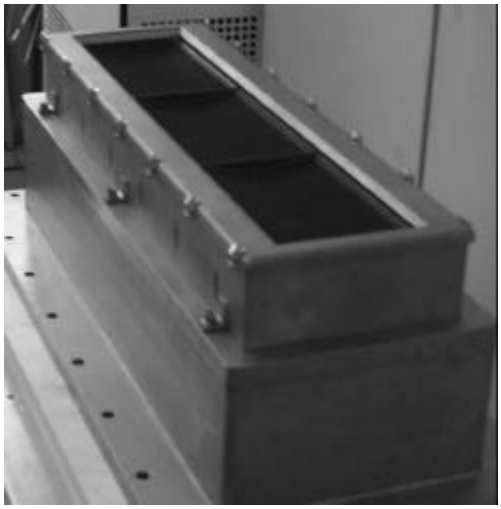


Abb. 1: Lineare Ionenstrahlquelle LISQ 600 mit fokussierendem Gitter.

Zur Charakterisierung der LISQ 600 wurde unter Variation des Gasflusses, der eingekoppelten Mikrowellenleistung und der Gitterspannungen der extrahierte Ionenstrom und dessen Dichteverteilung gemessen. Als charakteristische Kenngrößen werden der aus dem Entladungsraum extrahierte Ionenstrom (Strahlstrom) und der durch direkten Ionenbeschuss bzw. durch Umladungseffekte hervorgerufenen Strom auf das zweite Gitter (Gitter-2-Strom) bestimmt. Der Test der LISQ wurde in einem 2,3 m^3-Rezipienten mit einer nominellen Saugleistung von 4000 l/s durchgeführt.
Mit Argon als Betriebsgas war ein minimaler Gasfluss von 11 sccm für die Aufrechterhaltung der Plasmaentladung notwendig. Eine Erhöhung des Gasflusses von 11 sccm auf 15 sccm führt zu einem deutlichen Anstieg des Strahlstromes und einem Abfall des Stromes auf das Beschleunigungs-Gitter um einen Faktor zwei (Abb. 2).

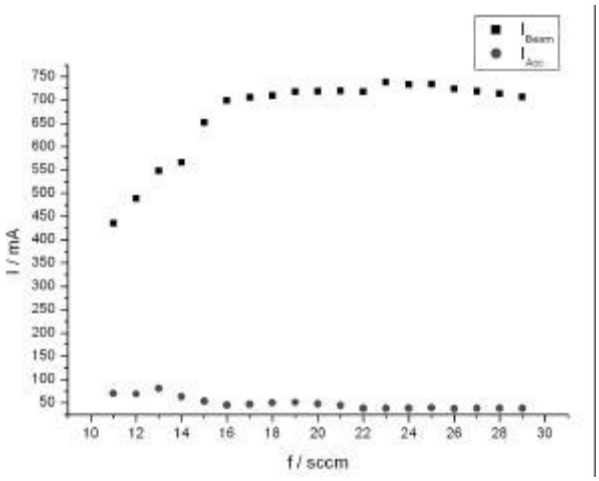


Abb. 2: Abhängigkeit der Gitterströme vom Gasfluss bei 430 V Strahl- und 300 V Beschleunigungsspannung.

Den Einfluss der Strahlspannung auf die Gitterströme bzw. Stromdichte zeigt die Abb. 3. Die Strahlspannung wurde zwischen 430 V und 1450 V variiert und führt bei einer Beschleunigungsspannung von 300 V zu keiner Änderung des Beschleunigungsstromes. Der Strahlstrom steigt auf Grund der größeren elektrischen Feldstärke von 700 mA auf 850 mA an. Die Stromdichte wurde in einem Abstand von 20 cm zwischen Gitter und Sonden gemessen. Sie nimmt bis zu einer Spannung von 1100 V zu, wobei eine maximale Stromdichte von 2,7 mA/cm^2 erreicht wird. Danach fällt die Stromdichte auf Grund der wieder zunehmenden Strahldivergenz wieder ab.

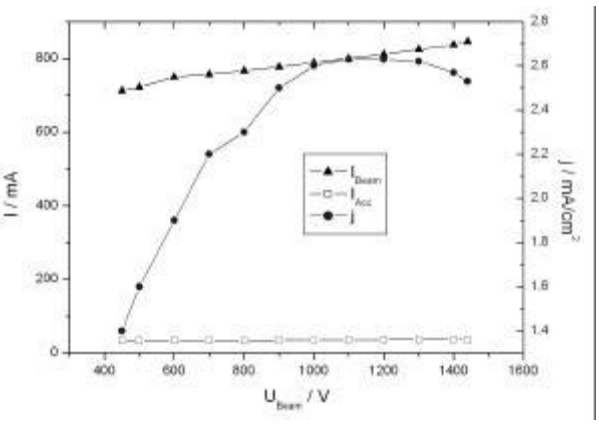


Abb. 3: Abhängigkeit der Ionenströme und Stromdichten von der Strahlspannung

Feinstrahlionenquelle

R. Deltschew, B. Faust, M. Tartz, H. Neumann

Neue Anforderungen an die Funktionalität optischer Oberflächen bedingen Ionenstrahloberflächenbearbeitungstechnologien mit feineren Werkzeugen. Dadurch motiviert erfolgte die Entwicklung einer neuen Ionenfeinstrahlquelle mit Ionenstrahldurchmessern deutlich unter 1 mm und hohen Ionenstromdichten.

Ausgehend von im Institut beherrschten Plasmaanregungsprinzipien wurde eine Ionenoptik für einen Strahldurchmesser im Bereich von 0,2 mm bei einem Fokus im Abstand von 5 bis 8 mm vom letzten Gitter mit Hilfe einer 2D-Modellierung konzipiert. Ziel war neben dem kleinen Strahldurchmesser und einem gaussförmigen Strahlprofil eine hohe Ionenstromdichte > 30 mA/cm^2. Bei der konstruktiven Ausführung wurden die Erfordernisse der Technologie berücksichtigt. Die spezielle konische Form des Gittersystems erlaubt so eine äquidistante Bearbeitung von großflächigen, gekrümmten Substratoberflächen mit einem minimalen Krümmungsradius von 150 mm. Zwei Plasmaanregungsprinzipien aufgebaut und getestet - eine DC-Niederdruckentladung mit heißer Kathode und eine induktive HF-Entladung.

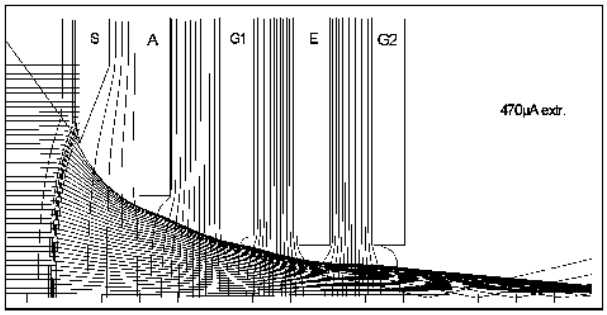


Abb. 1: Ergebnisse der Computersimulation der Ionenextraktion bei dem 5-Gitter-System.

Die Ionenoptik (Abb. 1) besteht aus 5 Elektroden (Nachschaltung einer Einzellinse zur konventionellen 2-Gitteroptik) mit verschiedenen Lochdurchmessern und lässt einen extrahierbaren Strom von 0,5 mA erwarten. Zur geforderten Fokussierung muss eine relativ hohe Spannungsdifferenz im Gesamtsystem eingesetzt werden, was eine Ionenenergie um die 3500 eV zur Folge hat. Die Möglichkeiten der Verschiebung des Fokus über Variation der Spannung an der Mittelelektrode der Einzellinse E sind Gegenstand weiterer Arbeiten unter Nutzung elektrischer Messmöglichkeiten.

Die Stromdichteprofile wurden bisher durch Auswertung der Ätzstrukturen (Footprints) in Si-Substraten nach der Strahlexposition mit Argon Ionen ermittelt. Die Strukturen wurden mit dem laseroptischem System "µscan" nach dem Autofokusprinzip im Rasterverfahren vermessen (s. Abb. 2). Bei der Quellenversion mit heißer Kathode lag das Ionenstromdichtemaximum des Profils bei 38 mA/cm^2 (Substratabstand 1 cm). Die Variation der gemessenen Ätzgrubengeometrie bei einer Abstandsvariation von 3 bis 1 cm zwischen Substrat und Gitter 5 zeigt eine sehr gute Übereinstimmung mit den modellierten Strahlprofilen (Abb. 3). Aus den Modellrechnungen ergibt sich damit bei einem Abstand von 0,5 cm, der dem Fokus bei diesen Prozessparametern entspricht, eine Ionenstromdichte von über 150 mA/cm^2 mit der DC-Plasmaanregung.

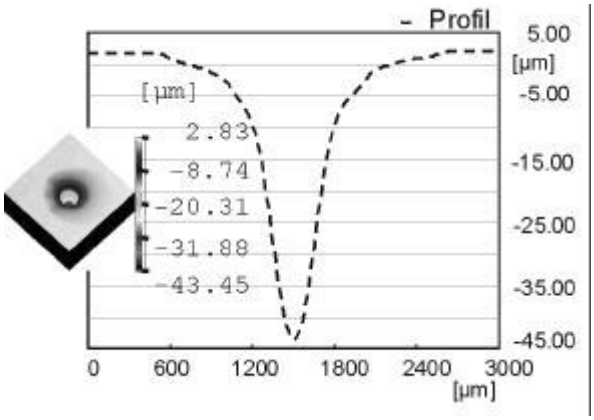


Abb. 2: Typisches Ätzprofil in einer Si-Probe nach der Behandlung mit der HF-FSIQ. Betriebsparameter der Quelle U_b = 3000 V, U_a = 2000 V, U_3 = 600 V, U_e = -2000 V, Stromdichte im Maximum 30 mA/cm^2.

Mit der HF-Plasmaanregung konnten nach dem gleichen Prinzip Ionenstromdichten von 30 mA/cm^2 im Fokus abgeschätzt werden (Abb. 2).

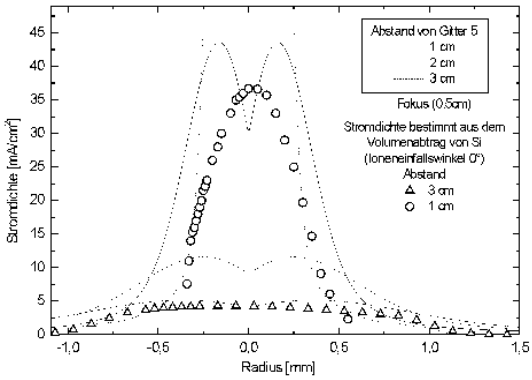


Abb. 3: Ionenstrahlprofil bei verschiedenen Abständen zwischen Substrat und Gitter 5. Mit Linien sind die simulierten Profile mit Variation des Abstandes zum Substrat dargestellt.

In Abhängigkeit von den angelegten Gitterspannungen lässt sich der Fokusabstand vom Gitter 5 des Ionenstrahles zwischen 0,5 cm und 1 cm verschieben. Dabei ändert sich die Halbwertsbreite des Strahlstromdichteprofils von 0,25 mm bis 0,6 mm.

Lokale Dickenkorrektur von Nanometer-Dünnschichten auf Si-Wafern mittels Ionenstrahlätzens

T. Hänsel, A. Nickel, H.-J. Thomas, A. Schindler

Die Ionenstrahlbearbeitung (IBF) mit neutralisierten Argonionen hat sich als leistungsfähige Technologie für eine nanometergenaue Endbearbeitung von Hochleistungsoptiken mit den Hauptanwendungen Polierfehlerkorrektur und Erzeugung von Nanometerasphären mit Bearbeitungstiefen im Sub-µm-Tiefenbereich erwiesen /1, 2/.
Im gleichen Maße lässt sich die Ionenstrahlbearbeitungstechnologie unter Verwendung einer Verweilzeitsteuerung eines Ionenstrahls mit gaussförmiger Stromdichteverteilung zur lokalen nanometergenauen Schichtdickenkorrektur dünner Schichten wie Al oder SiO_2 auf Si-Wafern im Prozess der Fertigungstechnologie aktiver und passiver mikroelektronischer Bauelemente einsetzen.
Im Gegensatz zur Polierfehlerkorrektur optischer Bauelemente erfolgt hierbei aber nicht nur eine Einebnung der Topologie, sondern zusätzlich ein vom Ort abhängiger, nm-genauer Ätzabtrag. Diese lässt sich bei Minimierung der Bearbeitungszeit nur dann erreichen, wenn ein optimiertes Verhältnis von Strahlstrom und den Parametern des Bewegungssystems wie maximale Fahrgeschwindigkeit und maximale Beschleunigung erreichbar ist. Wegen des geringen Abtrags von nur wenigen nm ergeben sich hohe Forderungen an das Bewegungssystem hinsichtlich der genannten Parameter. Rechentechnisch wird das Entfaltungsproblem zur Bestimmung der Verweilzeiten und der zu erwartenden Endtopologie durch das MATLAB-Programm V2DPILOT /3/ gelöst, wobei ein modifiziertes Iterationsverfahren nach van Cittert mit lokaler Glättung der Verweilzeiten für Gebiete mit zu hohen Beschleunigungswerten eingesetzt wird. Falls die Ausgangstopologie durch wenige Datenpunkte bestimmt ist, ermöglicht das Programm eine Topologieinterpolation bzw. –extrapolation, so dass bei mäanderförmiger Be-wegung des Ionenstrahls über die Waferoberfläche ein ausreichend kleines Rastermaß gewählt werden kann. Beispiele für Schichtdickenkorrekturen an einem SiO_2-beschichteten sowie für einen Al-beschichteten Si-Wafer zeigen die Abb. 1 und 2 .

/1/ T. Hänsel, A. Schindler, A. Nickel, H.-J. Thomas, IOM-Tätigkeitsbericht 1996/97, 37.
/2/ A. Schindler, T. Hänsel, D. Flamm, A. Nickel, H.-J. Thomas, F. Bigl, *Precision Science and Technology for Perfect Surfaces*, Y. Furukawa, Y. Mori, T. Kataoka, (Eds.), © The Japanese Society for Precision Engineering, Tokyo, 1999, 243.
/3/ A. Nickel, Programmdokumentation V2DPILOT Version 1.3

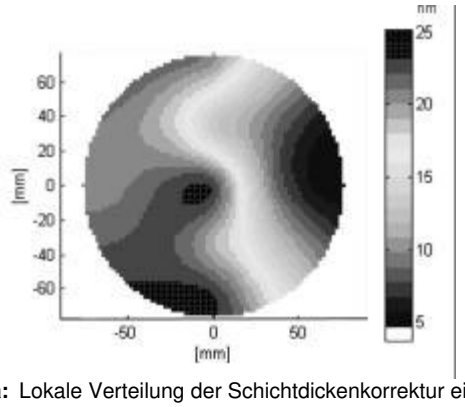


Abb. 1a: Lokale Verteilung der Schichtdickenkorrektur einer SiO_2-Schicht, interpoliert aus 9 Messpunkten

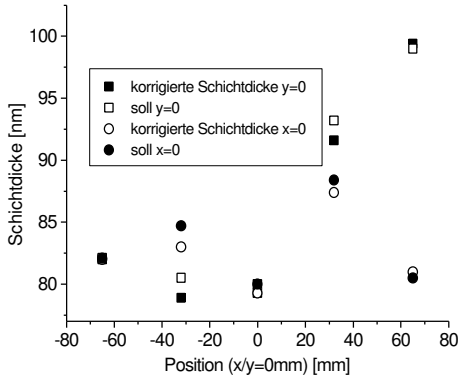


Abb. 1b: Vergleich von Sollschichtdicke und Schichtdicke einer SiO_2-Schicht nach Ionenstrahlkorrektur mit vorgegebenen Abtrag entsprechend Abb. 1a

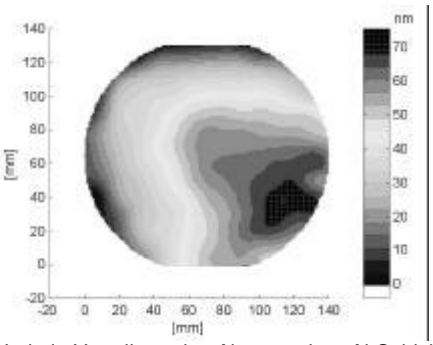


Abb. 2a: Lokale Verteilung des Abtrags einer Al-Schicht, interpoliert aus 130 Messpunkten mit Abstand 10 mm

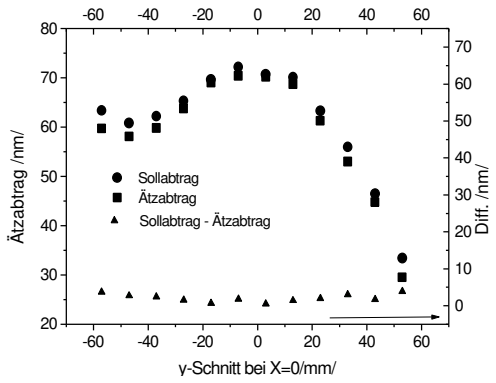


Abb. 2b: Vergleich von Sollschichtdicke und Schichtdicke einer Al-Schicht nach Ionenstrahlkorrektur mit vorgegebenen Abtrag entsprechend Abb. 2a

Plasmastrahlbearbeitung optischer Materialien

G. Böhm*, T. Arnold, W. Frank, A. Schindler

* Jenoptik Laser, Optik, Systeme GmbH, 07745 Jena, Deutschland

Ziel der Arbeiten im Berichtszeitraum war die technologische Weiterentwicklung des reaktiven Plasmastrahlätzens als Alternative zu mechanisch-abrasiven Methoden der formgebenden Bearbeitung optischer Materialien wie computerkontrolliertes Schleifen, Läppen und Polieren (CCP) oder magneto-rheologisches Polieren (MRF), die in der Regel zu einer ausgeprägten Schädigung oberflächennaher Schichten führen. Neben Quarz wurde zunehmend Silizium bearbeitet, das als Material für Grundkörper reflektierender EUV- und Röntgenoptiken wegen seiner guten Polierbarkeit und thermischen Leitfähigkeit zunehmend an Bedeutung gewinnt.
Im Gegensatz zu Quarzglas, bei dem auf Grund der schlechten thermischen Leitfähigkeit und der damit verbundenen lokalen und globalen Aufheizung der Probenoberfläche eine nichtlineare Abhängigkeit der Abtragsrate von der lokalen Verweilzeit des Plasmastrahls die erreichbare Formgenauigkeit begrenzt, konnte bei Silizium eine Formgenauigkeit < 5 % pro Bearbeitungsschritt realisiert werden.
Abbildung 1 zeigt die Topologie einer im *Zeilenverfahren* geätzten sphärischen Fläche, die eine gute Rotationssymmetrie und eine geringe sphärische Formabweichung (< 3 %) aufweist.

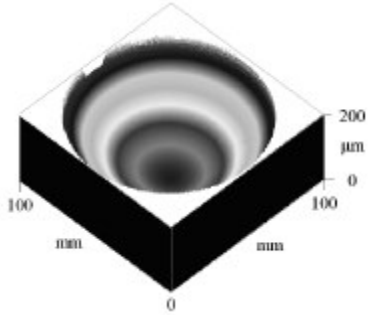


Abb. 1: Konturdarstellung einer geätzten Hohlfläche gemessen mit dem optischen Profilometer.

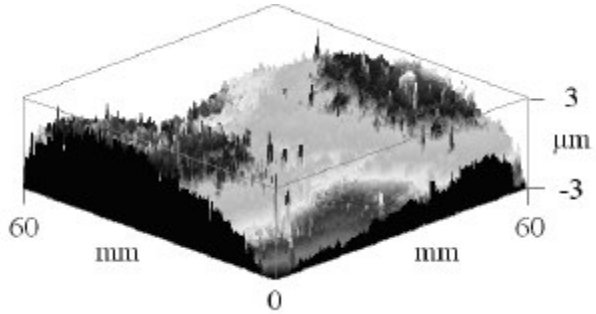


Abb. 2: 3D-Darstellung der sphärischen Abweichung.

Parameter	
Druck	30 mbar
Leistung	120 W
Gasfluss Ar	300 sccm
Gasfluss SF_6	300 sccm
Arbeitsabstand	20 mm

Tab. 1: Ätzparameter für die Siliziumbearbeitung.

Für die verweilzeitunabhängige Abtragsrate ergab sich unter den in Tabelle 1 zusammengefassten Bedingungen ein Wert von ca. 20 mm³/min. Als vorteilhaft erweist sich die Tatsache, dass auf den Einsatz von Sauerstoff verzichtet werden kann, der einerseits zur Erhöhung der Ätzrate führt /1/, andererseits jedoch eine verstärkte Aufrauhung der geätzten Flächen nach sich zieht.
Ausgehend von diesen Ergebnissen sollten sich Freiformflächen in Silizium mit einer absoluten Genauigkeit < 1 µm herstellen lassen. Die Zahl der erforderlichen Bearbeitungsschritte richtet sich dabei nach der gewünschten Abtragstiefe.
Probleme bestehen gegenwärtig noch hinsichtlich der erreichbaren Oberflächengüte. Diese wird insbesondere limitiert durch vorbehandlungsbedingte Schäden und Störungen unter der Probenoberfläche (subsurface damage), die in die Tiefe übertragen werden (Abbildung 3).

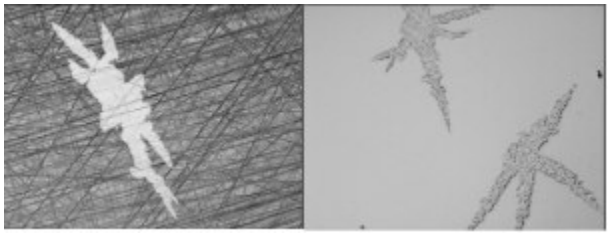


Abb. 3: Oberfläche der verwendeten Si-Substrate nach Abtrag von 1-2 µm (links) und nach Abtrag von ca. 30 µm (rechts).

In ungeschädigten Bereichen findet man dagegen eine positive Rauheitsentwicklung mit Werten < 1 nm rms für die geätzte Fläche (gemessen mit optischem Interferenzmikroskop bei 50facher Vergrößerung).

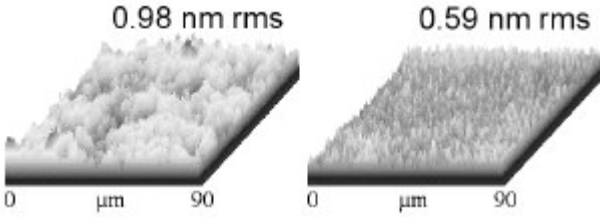


Abb. 4: Mikrorauheit der Si-Ausgangsfläche (links) und der geätzten Fläche nach Abtrag von ca. 100 µm (rechts).

/1/ Th. Arnold, G. Böhm, A. Schindler, J. Vac. Sci. Technol. A **19**(5) (2001) 2586.

Entwicklung einer miniaturisierten Ionenstrahlschrägschliffanlage

W. Frank, A. Schindler, J. Piltz*, K. Barucki**

* amtec Analysentechnik GmbH Leipzig
** IOT Innovative Oberflächentechnik GmbH Leipzig

Ziel des vom SMWA/SAB geförderten Verbundvorhabens war die Entwicklung einer Multielement-Tiefenprofil-Analyse mit Nanometer-Tiefenauflösung durch Kombination der TRFA mit der Ionenstrahlschrägschlifftechnik /1, 2/.
Nachdem ein Funktionsmuster eines miniaturisierten TRFA-Analysators realisiert wurde (s. IOM-Tätigkeitsbericht 98/99), folgten im zweiten Abschnitt des Vorhabens Arbeiten zur Konzeption, Konstruktion und Aufbau einer Ionenstrahlschägschliffanlage zur Probenpräparation.
Die Ionenstrahlschrägschliffanlage (ISSA) besteht aus den Komponenten: Ionenstrahlquelle, Vakuumkammer, Probentransportsystem, Probenschleuse (Abb. 1) sowie Vakuumsystem, Gasversorgung und Anlagensteuerung, die in einem kompakten, leicht bedienbaren und vollständig PC-gesteuerten Gerät integriert sind (Abb. 2).

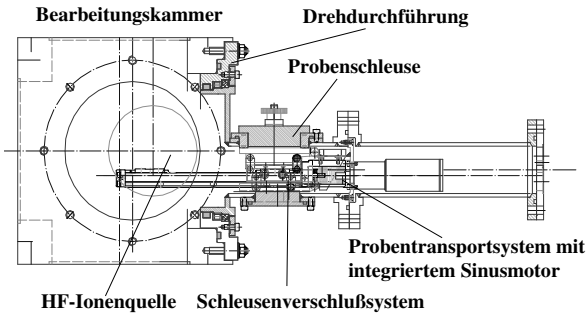


Abb. 1: Konstruktion der ISSA mit Vakuumkammer und Probenschleuse

An die Vakuumkammer, in der die Ionenstrahlbearbeitung stattfindet, werden die Ionenstrahlquelle (40 mm-HF-Quelle der IOT GmbH), der Neutralisator, das Vakuumsystem und die zur Bearbeitungsachse drehbare Probenschleuse mit Transportsystem angeflanscht. Die Drehung der Probe zur Bearbeitungsachse erlaubt die Realisierung unterschiedlicher Einfallswinkel des Ionenstrahls und damit z. B. eine Optimierung der Ätzraten und der Oberflächenmikrorauheit. Die Probe selbst wird auf einen wassergekühlten Probenträger (∅ 60 mm) aufgebracht, der sich auf einem Präzisionsbewegungssystem befindet. Mit diesem System können Schrägschliffe bis 15 mm Länge bei Geschwindigkeiten von 2 mm/s bis 0,12 µm/s erzeugt werden. Die Neigungswinkel der Schrägschliffe sind damit in einem weiten Bereich variierbar.

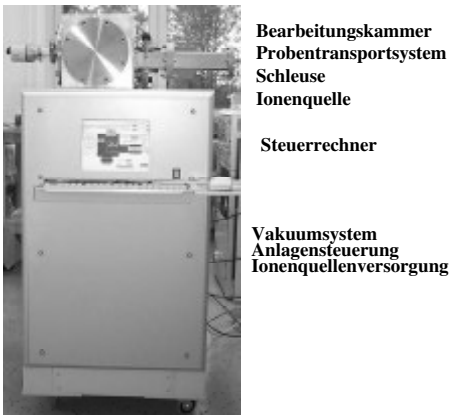


Abb. 2: Das Funktionsmuster der Schrägschliffanlage

Zum Nachweis der Funktionsfähigkeit des ISS-Demonstrators wurden Schrägschliffe angefertigt und deren Profil vermessen (Abb. 3 und 4).

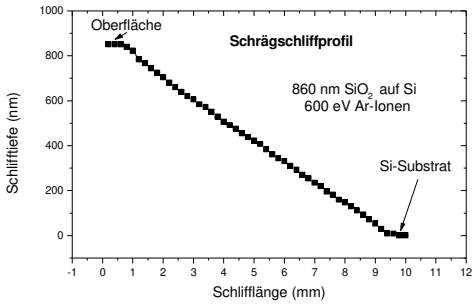


Abb. 3: Das Tiefenprofil eines Ionenstrahlschrägschliffes einer SiO_2-Schicht auf einem Si-Substrat, Stromdichte ca. 1 $mAcm^{-2}$

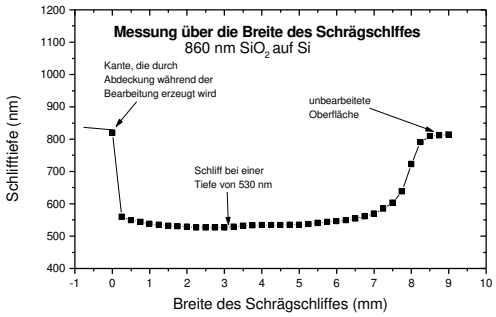


Abb. 4: Querschittprofil des in Abb. 3 gezeigten Ionenstrahlschrägschliffes

In Abb. 3 ist als Beispiel das gemessene Profil eines Ionenstrahlschrägschliffes einer SiO_2-Schicht (860 nm) auf einem Si-Wafer dargestellt, wobei deutlich der lineare Verlauf des Abtrages mit der Tiefe gezeigt ist. In Abb. 4 schließlich ist das Profil des gleichen Schrägschliffes quer zu dem in Abb. 3 gezeigten Profil dargestellt. Die Abweichungen vom theoretischen Kastenprofil werden im wesentlichen durch einen noch nicht optimalen Homogenitätsbereich des Ionenstrahls verursacht (Gegenstand weiterer Arbeiten).

/1/ W. Frank, A. Schindler, H.-J. Thomas, Fresenius J. Anal. Chem. **316** (1998) 62.
/2/ K. Otte, G. Lippold, W. Frank, J. Krauser, A. Weidinger, A. Schindler, MRS-Spring Meeting, San Francisco, USA, 16.-20. April 2001.

Diffraktive optische Elemente für DUV-Hybrid-Optiken

A. Schindler, R. Steiner*, R. Fechner, B. Dobschal*, K. Rudolf*, M. Burkhardt*, R. Brunner*

* Carl Zeiss Jena GmbH, FJ-FIM, D-07745 Jena

Die Kombination refraktiver Komponenten mit diffraktiven optischen Elementen erschließt neue Designmöglichkeiten, wie kleinere Bauformen, die Einsparung teurer Materialien (UV-, IR-Optik), Toleranzentschärfungen für die Fertigung und Montage und bessere Abbildungsleistungen möglich machen.
Der Fortschritt in den modernen Strukturierungsverfahren der Lithografie (Holografische -, Laser-, e-beam-Lithografie) als auch der Ionenstrahlbearbeitung verschiedener Materialien gestatten anspruchsvolle Lösungen mittels hybrider Optiken.

Ziel dieser Arbeiten war es, eine Technologie zur Herstellung von Quarzzonenlinsen für ein hybrides optisches System für eine UV-Anwendung zu entwickeln. Dabei wurden neben dem Design bei Carl Zeiss Jena die holografische Lithografie sowie die optischen Messungen zur Qualitätsbewertung am fertigen Bauelement durchgeführt. Im IOM wurde, basierend auf Entwicklungen zum proportionalen Transfer von 3D-Mikrostrukturen mittels reaktiven Ionenstrahlätzens /1/, die Parametrierung und die technologische Anpassung des Ätzprozesses an die Anforderungen des diffraktiv-optischen Bauelementes unter besonderer Beachtung der Reproduzierbarkeit des Ätzprozesses bei Berücksichtigung der Fehlerbudgets der Einzelprozessschritte (Resistmaskentoleranzen und Toleranzen im Ätzprozess) vorgenommen.
Zunächst wurde mittels holografischer Belichtungstechnik eine sägezahnförmige Zonenlinsenstruktur in Fotoresist auf Quarzsubstrat hergestellt. Dabei kommen zwei hochgeöffnete Wellen entsprechend dem Design zur Interferenz und realisieren nach der Entwicklung des Fotoresists ein sägezahnförmiges Furchenprofil. Die große Breite des Ortsfrequenzspektrums vom Zentrum zum Rand des diffraktiven Bauelements kombiniert mit der Forderung eines sägezahnförmigen Furchenprofils lässt sich mit einem wirtschaftlich vertretbaren Aufwand nur mit der holografischen Belichtungstechnik realisieren. Die maximal erreichbaren Profiltiefen im Resist betragen ca. 110 nm.
Um aber einen hohen Beugungswirkungsgrad im Quarz-Element und damit eine hohe Lichttransmission im Optiksystem zu realisieren, ist es notwendig, das Resistprofil beim Übertragungsprozess in das Substratmaterial zu vertiefen. Aus den Berechnungen ergibt sich eine Profilstreckung um das Dreifache. Dabei liegt die Schwierigkeit darin, eine konstante Ätztiefe bei großen Ortswellenlängenbereichen von 570 nm bis 25 µm zu erzielen, was bedeutet, die Abhängigkeit der Abtragsrate vom lokalen Ioneneinfallswinkel zu minimieren. Abb. 1 und 2 zeigen das Ergebnis des technologischen Herstellungsprozesses.

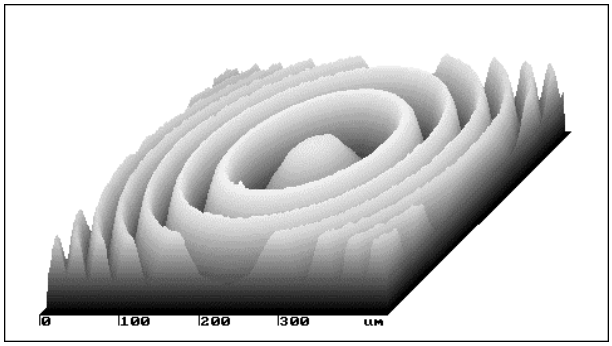


Abb. 1: Micromap-Weißlichtinterferometer-Aufnahme der ionenstrahlgeätzten Quarzzonenlinse

Profil der Resistmaske Profil im Quarz

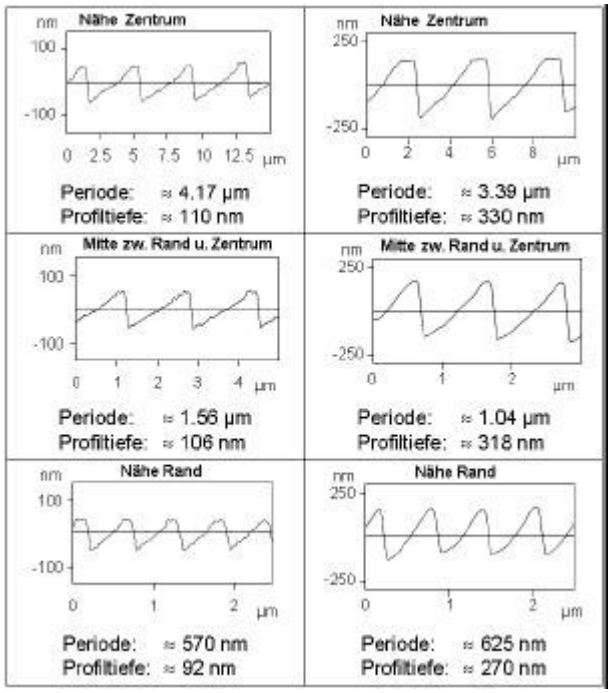


Abb. 2: AFM-Scans an verschiedenen Stellen a) des Resistprofiles und b) des ionenstrahlgeätzen Profiles der Zonenlinse

Die Werte der Beugungseffizienz liegen in Abhängigkeit von der Strichzahl zwischen 60 und 70 % bei einer Messwellenlänge von 193 nm. Im optischen System integriert bestätigten die Auflösungstests mit diesem Objektiv die Designlösung und die eingesetzte Technologiekette vollständig.

/1/ D. Flamm, A. Schindler, *Proportionaltransfer diffraktiv-optischer Bauelemente mit reaktivem Ionenstrahlätzen*, IOM-Tätigkeitsbericht 1996/97.

Nanospitzen aus Silizium für die Feldemission

J. Dienelt, K. Zimmer

Nanospitzen besitzen ein sehr breites Anwendungsspektrum. Im Bereich der Mikroelektronik werden sie z. B. als Elektronenkanonen, in Feldemissionsdisplays /1/ oder in Rastertunnelmikroskopen eingesetzt. In diesen Anwendungen wird der Effekt der Feldemission ausgenutzt, der dabei den Austritt von Elektronen aus einem Festkörper ins Vakuum unter der Wirkung eines elektrischen Feldes bezeichnet. Dafür sind jedoch extrem hohe Feldstärken von > 10^9 V/m an der Oberfläche des Festkörpers notwendig. Diese Werte sind nur in inhomogenen elektrischen Feldern an sehr feinen Spitzen bzw. scharfen Kanten oder in homogenen elektrischen Feldern nur durch sehr große Spannungen zu erreichen.

Klassische Feldemissionsspitzen sind typischerweise Metallkegel vom Spindt-Typ /2/, die infolge hoher Elektronenkonzentration und hoher Schmelztemperaturen eine hohe Emissionsstromdichte und eine hohe Widerstandsfähigkeit gegenüber Restgasmolekülen besitzen. Jedoch gewinnt Silizium aufgrund des breiten Einsatzes in der Mikroelektronik und der sehr gut beherrschbaren Strukturierungsmethoden zunehmend an Bedeutung. Zusätzlich ist in den meisten Fällen der Einsatz einer Gegenelektrode (Gate) unerlässlich, um die notwendigen Spannungen weiter zu senken und die Feldemission gezielt zu steuern.

Die Emissionsstromdichte eines Feldemitters wird mit Hilfe der Fowler-Nordheim-Feldemissionstheorie ausgedrückt /3/. Die Emission von Elektronen hängt dabei stark von dem Spitzenradius und dem Durchmesser der Gateöffnung ab. Der Prozessablauf muss deshalb so angepasst werden, dass sehr scharfe Spitzen mit einer sehr guten Gleichmäßigkeit der Strukturgeometrie erreicht werden.

Für die Erzeugung von Emissionsspitzen aus Silizium mit einem Spitzenradius im Nanometerbereich werden im Institut verschiedene Trockenätztechnologien eingesetzt, z. B. das reaktive Ionenstrahlätzen mit CHF_3, das chemisch unterstützte Ionenstrahlätzen mit Cl_2 (CAIBE) oder das reaktive Ionenätzen (RIE) mit SF_6. Die so erzeugten Kegel werden durch thermische Oxidation, einen gerichteten Ionenstrahlbeschuss oder einen isotropen RIE-Prozess zusätzlich geschärft. Die so entstandenen Nanospitzen haben einen Radius von wenigen 10 nm bei einer Spitzenhöhe von 1200 nm und einer Sockelbreite von 600 nm. Mit dem RIE-Prozess werden die höchsten Abtragsgeschwindigkeiten bei einer breiten Variation der Isotropie erreicht, jedoch ist die Oberfläche nach einem CAIBE-Prozess mit anschließender thermischer Oxidation glatter. In der Abb. 1 ist ein mit dem RIE-Prozess geschärftes Array von Si-Nanospitzen dargestellt.

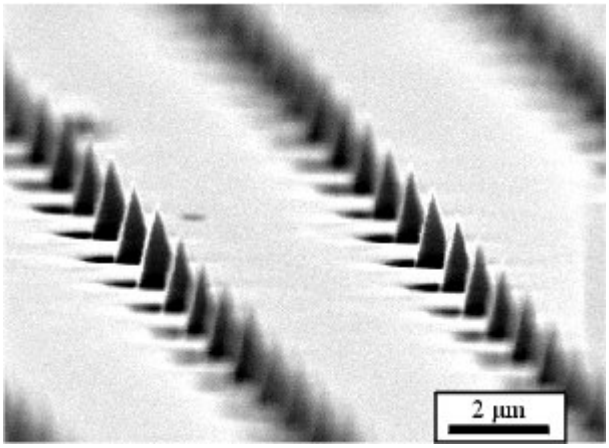


Abb. 1: REM-Aufnahme eines Si-Spitzenarrays nach dem Anspitzen in einem RIE-Prozess mit SF_6. Der Abstand zwischen den einzelnen Spitzen beträgt 5 µm.

Um die Emissionseigenschaften der Halbleiter-Nanospitzen weiter zu verbessern wird eine zusätzliche Deckschicht aus einem Material mit einem breiten Bandabstand und negativer Elektronenaffinität, wie z. B. diamantartiger Kohlenstoff (DLC), kubisches BN, LiF, CaF_2 oder AlN, auf die Spitzen aufgetragen. Weiterhin erhöht sich dadurch die mechanische und chemische Stabilität sowie die thermische Leitfähigkeit /4/. Ein Beispiel für eine Beschichtung von Si-Spitzen ist in der Abb. 2 zu sehen. Die transmissionselektronenmikroskopische Aufnahme zeigt die vollständige Bedeckung der Spitzen mit einer gleichmäßigen 60 nm dicken DLC-Schicht.

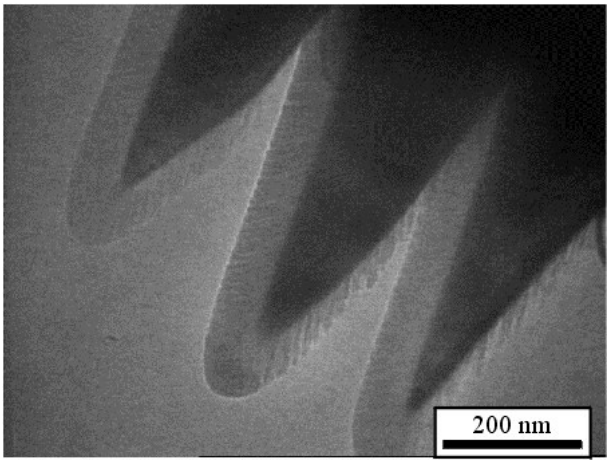


Abb. 2: TEM-Aufnahme von Si-Spitzen, die mit einer 60 nm dicken DLC-Schicht bedeckt wurden. Die Beschichtung erfolgte durch eine laserunterstützte Plasmaabscheidung (PLD) in der Universität Leipzig.

/1/ D. Temple, W. D. Palmer, L. N. Yadon, J. E. Mancusi, D. Vellenga and G. E. McGuire, *Silicon Field Emitter Cathodes: Fabrication, Performance, and Applications*, J. Vac. Sci. Technol. A **16**(3) (1998) 1980.
/2/ C. A. Spindt, J. Appl. Phys. **39** (1968) 3504.
/3/ R. H. Fowler, L. Nordheim, *Electron emission in intense electric fields*, Proc. R. Soc. London A **119** (1928) 173.
/4/ V. V. Zhirnov, G. J. Wojak, W. B. Choi, J. J. Cuomo, J. J. Hren, *Wide band gap materials for field emission devices*, J. Vac. Sci. Technol. A **15**(3) (1998) 1733.

Diffraktive Grautonmasken

A. Braun, K. Zimmer

Für die ablative Lasermikrostrukturierung mit einem Excimer-Laser werden abzubildende Masken benötigt. Neben der klassischen Konturmaske erringen zunehmend Grautonmasken an Bedeutung. Sie gestatten als einzige Maskenklasse die funktionale Gestaltung einer kontinuierlich verlaufenden dreidimensionalen Oberflächentopologie in nur einem Laserpuls. Bekannte Grautonmasken verfügen jedoch über eine nur geringe Laserfestigkeit, gestatten nur eine gestufte transmittierte Intensitätsmodulation oder sind gänzlich für Excimerlaser-Wellenlängen ungeeignet.
Um diese Nachteile zu überwinden, wurde eine neuartige, gänzlich aus Quarz bestehende, diffraktive Grautonmaske entwickelt. Ihre Funktionsweise beruht auf einem Phasentransmissionsgitter mit variabel angepasster Gittertiefe. Bei Transmission wird ein Teil des einfallenden Laserpulses in höhere Beugungsordnungen gestreut, wobei deren Intensität durch die lokale Gittertiefe bestimmt wird. Wird nur die nullte Beugungsordnung zur Materialbearbeitung zugelassen, definiert die lokale Gittertiefe den lokalen Materialabtrag /1/.

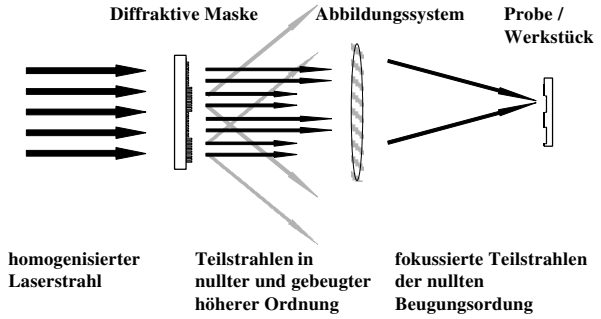


Abb. 1: Schematische Darstellung der Wirkungsweise einer diffraktiven Grautonmaske.

Die Fertigung der beschriebenen Masken erfolgte am Institut für Oberflächenmodifizierung unter Zuhilfenahme verschiedener Beschichtungs- und Maskierungstechniken. Wichtigster Prozessschritt dabei bildet der Ionenstrahlätzübertrag einer polymeren Hilfsschicht, welche in die lokale Gittertiefe im Quarz umgesetzt wird.
Bei Anwendung der Maske erstreckt sich der steuerbare Intensitätsbereich vollständig zwischen der Intensität der ungestörten Laserpulsenergiedichte und Energiedichten unterhalb polymertypischer Ablationsschwellen /2/.
Die Masken zeigen für 248 nm-Excimerlaserpulse Zerstörschwellen von 20 J/cm² für kristallines Quarz und 14 J/cm² für amorphes Quarz. Dies bedeutet eine deutliche Anhebung der Zerstörschwelle für Grautonmasken, wodurch diese eine Standzeit erreichen, die mit der anderer UV-Optik-Komponenten vergleichbar ist. Zukünftige Anwendungen könnten somit folgende Punkte gestatten:

- herabgesetzte Projektionsmaßstäbe bei vergleichbaren (oder höheren) Intensitäten in der Bearbeitungsebene, wodurch Linsenfehler bei der Maskenabbildung minimiert werden,
- größere Bearbeitungstiefen bei vergleichbarer Anzahl von Laserpulsen,
- vollständige Ablation einer Mikrostruktur in nur einem Laserpuls, wodurch kontinuierlich betriebenen Rolle-zu-Rolle-Prozesse zugänglich werden.

Die beschriebene Phasengitter-Grautonmaske kann existierende Kontur- und Grautonmasken unter Beibehaltung der verwendeten Anlagentechnik direkt ersetzen. Ihre Funktionsweise lässt sich auf andere UV-transparente Materialien wie MgF_2, Saphir und Diamant übertragen. Für die in der Lasermaterialbearbeitung zukünftig zu erwartende weitere Verschiebung zu kürzeren Wellenlängen stehen damit geeignete Grautonmasken zur Verfügung.

/1/ K. Zimmer, A. Braun, F. Bigl, Patentanmeldung *„Verfahren und Vorrichtung zur Schwächung eines in einem optischen Strahlengang geführten Lichtstroms“*.

/2/ A. Braun, K. Zimmer, *Fabrication of MEMS-Structures by Laser Machining*, SPIE **4236** (2001) 213.

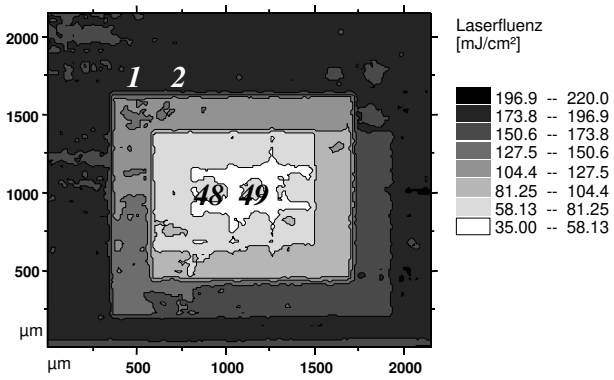


Abb. 2: Grautonmaske realisiert transmittierte Laserfluenz in 49 Intensitätsstufen.

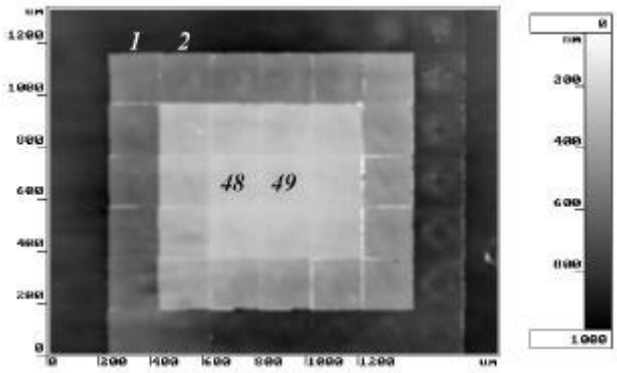


Abb. 3: Oberflächentopologie nach Ablation in Polykarbonat.

Ionenstrahlvergütete Laserdioden

H. Herrnberger, K. Otte, J. Dienelt, F. Pietag,
R. Schwabe, A. Schindler, V. Gottschalch*,
G. Benndorf**

* Universität Leipzig, Fakultät für Chemie und Mineralogie
** Universität Leipzig, Fakultät für Physik und Geowissenschaften

Miniaturisierte und damit mobile Fouriertransformations-Infrarot(FTIR)-Spektrometer sind heute als effiziente Geräte in der Schadstoffanalytik.
Ziel der Forschungs- und Entwicklungsarbeiten war es, ein solches Schadstoffspektrometer durch die Entwicklung halbleiterbasierender optoelektronischer Bauelemente dadurch zu miniaturisieren, dass ein He-Ne-Gaslaser durch einen modenstabilen monomodigen Halbleiterlaser als Referenzlichtquelle für das Spektrometer ersetzt wird.

Ein FTIR-Spektrometer arbeit ähnlich einem Michelson-Interferometer. Wirkprinzip und Spezifik des Strahlenganges des Schadstoffspektrometers erfordern eine frequenzstabile Referenzlichtquelle mit Lichtleistungen von einigen mW, die bei einer Wellenlänge $\lambda \leq 800$ nm monomodig emittiert. Oberflächenemittierende Halbleiterlaser mit hoher Nebenmodenunterdrückung sind wegen ihrer heute noch geringen Lichtleistung (einige Zehntel mW) ungeeignet, so dass wir einen auf (Al,Ga)As-basierenden Kantenstrahler entwickelt haben (quantengrabenvergüteter ridge waveguide laser), der in ein ebenfalls hier entwickeltes Modul mit Peltierkühlung und Temperaturregelung integriert ist. Die Leistungsparameter des Lasers sind in Abb. 1 veranschaulicht.

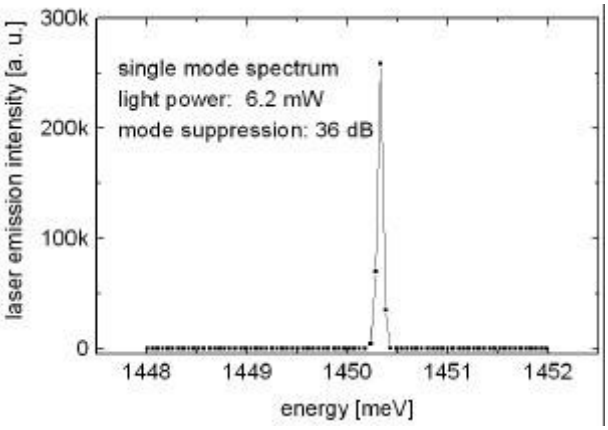


Abb. 1: Modenspektrum des Ridge Waveguide Lasers bei 18 °C Modultemperatur

Eine noch höhere Nebenmodenunterdrückung und Lichtleistung sowie eine zusätzliche elektrische Abstimmbarkeit der Emissionswellenlänge ist durch einen sogenannten Luftspaltlaser (die "Reihenschaltung" zweier "Kantenstrahler") möglich (vgl. /1/). Das Schema einer solchen Laserstruktur ist in Abb. 2 gezeigt.

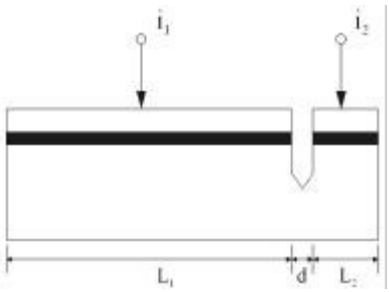


Abb. 2: Schema eines Luftspaltlasers nach /1/. Das stromdurchflossene Gebiet L_2 wirkt als aktives Etalon, mit dem durch die Variation des Stromes i_2 eine Wellenlängenabstimmbarkeit ermöglicht wird.

Der Luftspalt, der das schwarz markierte aktive Gebiet des Lasers (Abb. 2) durchtrennt, wirkt wegen der Brechungsindexunterschiede wie eine Doppelfacette und führt zu erhöhter Reflektivität und damit zu erhöhter Lichtausbeute. Abb. 3 zeigt das berechnete Reflexionsverhalten für einen Luftspalt (1 µm Breite) im GaAs.

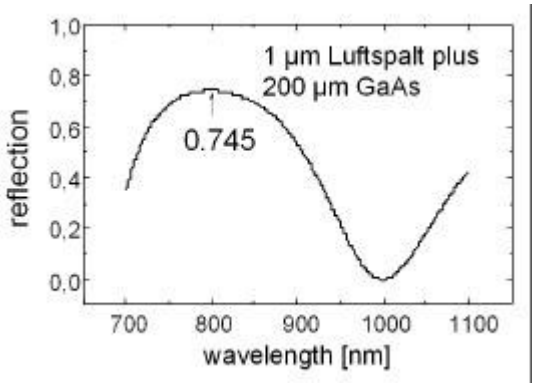


Abb. 3: Reflexion für einen 1 µm breiten Luftspalt im GaAs; das GaAs-Etalon ist mit 200 µm Länge angenommen.

Der Luftspalt wurde durch Elektronenstrahllithografie und chemisch assistiertes Ionenstrahlätzen (CAIBE) hergestellt. Abb. 4 zeigt erste Ergebnisse für den Cl-assistierten Ar^+-Ionenstrahlätzprozess.

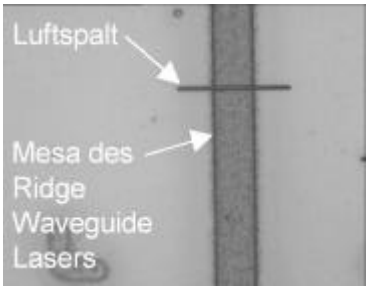


Abb. 4: Elektronenmikroskopisches Bild einer mit Luftspalt versehenen Laserstruktur - Draufsicht. Der Mesastreifen ist etwa 10 µm breit und der Luftspalt hat eine Breite von 1 µm

/1/ K. J. Ebeling et al., Appl. Phys. Lett. **42** (1983) 6.

Laserätzen von transparenten Materialien in Flüssigkeiten

R. Böhme, A. Braun, K. Zimmer

Die direkte Mikrostrukturierung von Polymeren (PMMA, Polyimide usw.) durch Laserablation hat sich als flexible Methode zur Herstellung mikromechanischer, mikrofluidischer oder mikrooptischer Komponenten für die Mikrosystemtechnik erwiesen /1/. Die präzise Materialbearbeitung von anorganischen Dielektrika und Gläsern, die ebenfalls ein hohes Anwendungspotential in der Mikrotechnik besitzen, ist gegenwärtig mit Excimerlasern relativ schwierig.

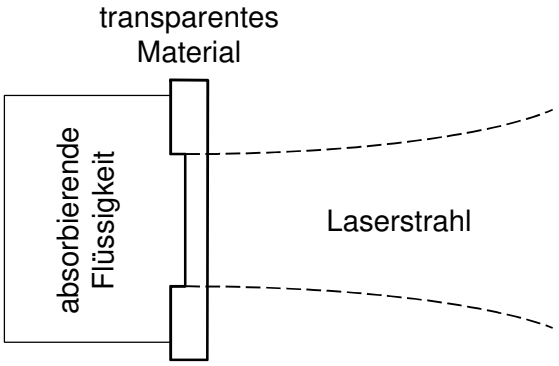


Abb. 1: Schema des lasergestützten Rückseitenätzens.

Am Institut für Oberflächenmodifizierung e. V. Leipzig wurden durch die Anwendung einer neuen Laser-Materialbearbeitungsmethode erfolgreich dielektrische Materialien hochgenau geätzt, die bisher mit industriell eingesetzten Excimerlasen infolge ihrer hohen Transparenz nur mit geringer Qualität bearbeitet werden konnten. Bei diesem Verfahren steht das Werkstück mit einer absorbierenden Flüssigkeit in Kontakt, wie das Schema in Abb. 1 zeigt. Der Materialabtrag ist das Resultat des dabei stattfindenden Energietransfers der absorbierten Laserstrahlung zum Festkörper. Typische Abtragsschwellenergiefluenzen liegen mindestens eine Größenordnung unter den für die Bearbeitung an Luft bekannten Werten. Die Ätzprodukte werden durch die Flüssigkeit aufgenommen und können bei Durchströmung der Kammer mittels der Flüssigkeit abtransportiert werden.

Die Oberflächenstrukturierung unterschiedlicher Materialien (Quarz, MgF_2, CaF_2, Saphir, Glas, Pyrex®) erfolgte mit einem Excimerlaser ($\lambda = 248$ und 351 nm, $t_p = 25$ ns, $f = 10$ bis 100 Hz) durch Anwendung üblicher Maskenprojektions- und Scanning-Techniken. Die für Quarzglas bestimmte Schwellenfluenz von etwa 300 mJ/cm² liegt im Bereich der für Polymere typischen Werte. Abtragsraten von einigen nm/Puls bis zu 0,2 µm/Puls sind für die untersuchten Materialien charakteristisch. Wie die REM-Aufnahmen in Abb. 2 zeigen, zeichneten sich die geätzten Mikrostrukturen vor allem bei Quarzglas durch eine sehr hohe Bearbeitungsqualität aus. Hervorzuheben sind dabei besonders die geringe Rauhigkeit der abgetragenen Oberfläche, die große Kantensteilheit sowie die hohe Auflösung der Strukturen. Die Mikrostrukturierung wird durch keine Ablagerungen von Debrispartikeln beeinträchtigt, wodurch aufwendige Reinigungsprozeduren nach dem Laserätzprozess entfallen können /2/.

Dieses Verfahren eröffnet somit neue Möglichkeiten der Mikrostrukturierung transparenter Materialien mit gebräuchlichen Excimerlasern ohne nachfolgende Reinigungs- oder Nachbearbeitungsschritte. Die Bearbeitungsmethode kann insbesondere zur Einzelfertigung und zum Rapid Prototyping, beispielsweise mit schreibendem Strahl, zur lokalen Strukturierung oder Reparatur, aber auch für die industrielle Serienfertigung nach entsprechender Prozessoptimierung eingesetzt werden.

/1/ K. Zimmer, A. Braun, F. Bigl, *Mikrobearbeitung mit Excimer Lasern zur Herstellung von 3D-Strukturen*, LaserOpto, **31**(5) (1999) 51.

/2/ R. Böhme, A. Braun, K. Zimmer, *Backside etching of UV-transparent materials at the interface to liquids*, Appl. Surf. Sci. (2001), im Druck.

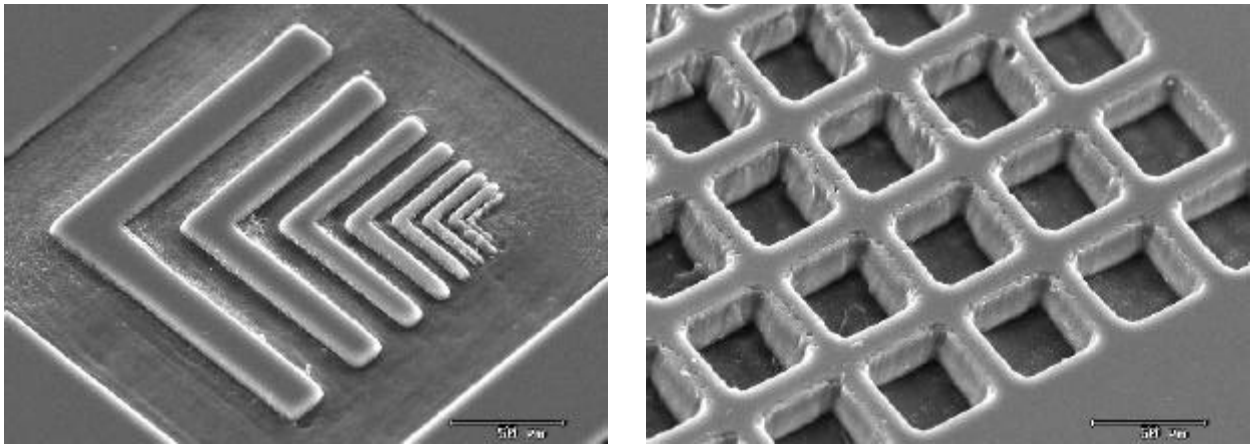


Abb. 2: Beispiele geätzter Mikrostrukturen in Quarzglas: a) die Teststruktur demonstriert die gute Strukturauflösung bei geringer Bodenrauhigkeit b) Array von Mikrokavitäten mit Anwendungsmöglichkeiten als Mikrotiter-Platte

Selektives Entfernen von Klebemitteln mit dem Excimerlaser

K. Zimmer, E. Salamatin

Excimerlaser erfahren zunehmende Bedeutung im Bereich der Mikrotechnik zur Direktstrukturierung von Polymeren. Neben traditionellen Verfahren wie dem Bohren, dem Schneiden und dem Ausheilen von Schichten werden verstärkt auch Verfahren zur Oberflächenstrukturierung für Anwendungen in der Mikrosystemtechnik untersucht /1/. Darüber hinaus wird Laserstrahlung auch zur selektiven und schonenden Entfernung von Beschichtungen und Oberflächenkontaminationen eingesetzt /2/.

Im Rahmen einer Auftragsforschung wurden Untersuchungen zur Entfernung von Klebemitteln von optischen Bauteilen durchgeführt. Insbesondere stand dabei die Aufgabe, dass die Eigenschaften der Optik, hauptsächlich die Oberflächenpolitur, durch den Ätzprozess nicht verändert werden durften. Da das Klebemittel bis zu einer Tiefe von 100 µm zu entfernen war, war mit der Bildung großer Mengen von Ablationsprodukten zu rechnen. Derartige Debris-Ablagerungen auf der Oberfläche sind aufgrund der optischen Anwendung nicht zu tolerieren.

In die Untersuchungen zum Abtrag des Klebemittels wurden die Variation der Laserbestrahlungsparameter, die Bestrahlungsmethodik sowie die Umgebungsbedingungen aufgenommen. Zur Eingrenzung der Laserparameter wurde die Abtragsrate an Luft in Abhängigkeit von der Laserfluenz und der Pulsanzahl ermittelt. Das Epoxidharzbasierende Klebemittel weist den für hochabsorbierende Polymere typischen logarithmischen Anstieg der Ablationsrate mit steigender Laserfluenz bei einem Schwellwert von ca. 100 mJ/cm² auf und zeigt kein ausgeprägtes Inkubationsverhalten. Bei einer Laserfluenz von 500 mJ/cm² wird eine Abtragsrate von 300 nm/Puls erreicht. Die in diesen Untersuchungen beobachtete starke Debris-Ablagerung war auch auf den optischen Flächen zu beobachten. Diese Ablagerungen konnten nachfolgend nicht vollständig entfernt werden und führten zu extrem erhöhten Rauheitswerten, die nicht tolerierbare Absorptions- und Streulichtverlusten bei der Anwendung zur Folge hätten.

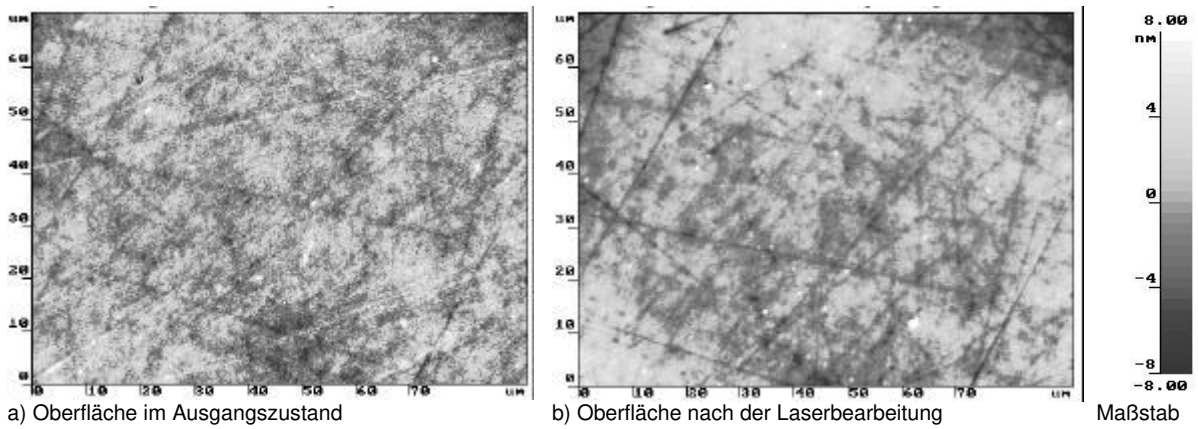
Um die Ausbildung dieser Rauhigkeiten zu verringern, wurden unterschiedliche Bearbeitungsmethoden untersucht, darunter die Verwendung leichter Gase bzw. von Flüssigkeiten, die den Abtransport der Ablationsprodukte wesentlich verbessern, die Abdeckung der optischen Flächen mittels einer hochreflektierenden Metallschicht und die Abbildung von Masken zur selektiven Laserbestrahlung der Klebestellen.

Im Ergebnis der Optimierung steht ein Verfahren zur Verfügung, dass den selektiven Abtrag von polymeren Klebemitteln von optischen Bauelementen ohne Zerstörung der Oberfläche oder Erhöhung der Rauhigkeit erlaubt. In Abb. 1 sind vergleichend interferenzmikroskopische Abbildungen der Endfläche einer polierten Quarzfaser vor und nach der lasergestützten Klebemittelentfernung dargestellt. Dabei wurde bewusst nahezu die gleiche Position auf der Faser bei gleichem Höhenmaßstab vermessen, so dass die aus dem Politurprozess herrührenden Oberflächendefekte bezüglich Verlauf und Tiefe direkt verglichen werden können. Auch die über die gesamte Fläche ermittelten rms-Rauhigkeitwerte, die vor und nach der Bearbeitung zu 2,24 nm und 2,07 nm bestimmt wurden, erfahren durch die Laserbearbeitung keine signifikante Veränderung.

/1/ K. Zimmer, A. Braun, M. Kostrezewa, *Shrinking the apparatus size for DNA-analysis*, Proc. of SPIE **4236**, 58.

/2/ A. Braun, K. Zimmer, *Fabrication of MEMS-structures by laser machining*, Proc. of SPIE **4236**, 213.

/3/ A. Braun, K. Otte, K. Zimmer, St. Rudschuck, D. Hirsch, F. Bigl, *Cleaning of submicron structures on Si-master with pulsed excimer laser and reactive ion etching*, Appl. Phys. A **69**(1999), 339.



a) Oberfläche im Ausgangszustand b) Oberfläche nach der Laserbearbeitung Maßstab

Abb. 1: Vergleich der Rauhigkeit der polierten Quarzfaserenden vor der Bearbeitung und nach Entfernung von 100 µm Klebemittel; Laserfluenz 280 mJ/cm², Geschwindigkeit 10 mm/s, Pulswiederholfrequenz 30 Hz

Ionenstrahlerosion von Quarz-Glasoberflächen

F. Frost, D. Flamm, D. Hirsch

Die Rauhigkeit einer Festkörperoberfläche beeinflusst insbesondere deren mechanische, optische und elektronische Eigenschaften. Speziell für Komponenten der UV- und Röntgenoptik (Lithographieoptiken, Astrooptiken, Röntgenspiegel u. a.), der Datentechnik (Speichermedien, Kontaktflächen von Schreib-/Leseköpfen u. a.), der Halbleiterbauelementetechnik (Waferflächen, dielektrische Dünnschichten, Metallisierungsschichten) und der Verbindungstechnik (Bonden) sind Mikrorauhigkeiten im Subnanometerbereich (meist unter 0,3 nm) erforderlich. Im Rahmen des Teilprojektes 1 der DFG-Forschergruppe „TSUPOB“ werden deshalb speziell Untersuchungen zur gezielten Glättung von Festkörperoberflächen unter Verwendung von niederenergetischen Ionenstrahlen durchgeführt. Nachdem zu Beginn dieses Projekts vorrangig Probleme im Zusammenhang mit der Ionenstrahlglättung von verschiedenen AIII/BV-Halbleiteroberflächen erfolgreich bearbeitet wurden (siehe auch IOM-Tätigkeitsbericht 1998/1999) stehen gegenwärtig Fragen zur ionenstrahlgestützten Glättung von Quarzglas, Silizium und LTEM (Low Thermal Expansion Material) im Mittelpunkt des Interesses. Beispielhaft sollen an dieser Stelle Untersuchungen zur Entwicklung der Topographie von Quarzglasoberflächen bei Beschuß mit niederenergetischen Ar^+-Ionen (Ionenenergie < 2 keV) zusammengefasst vorgestellt werden /1, 2/.

Im Detail wurde der Einfluss des Ioneneinfallswinkels, der Ionenenergie, der Sputterzeit sowie der Probentemperatur untersucht. In Abhängigkeit vom Einfallswinkel α_{ion} kann man verschiedenste sich entwickelnde Oberflächentopograpien beobachten (Abb. 1). Für $50° \leq \alpha_{ion} \leq 70°$ wird die Oberfläche dominiert von “Ripple”-Strukturen mit einer Orientierung senkrecht zum einfallenden Ionenstrahl. Im Gegensatz zum Fall $\alpha_{ion} = 50°$, wo eine stetige Zunahme der „Ripple“-Wellenlänge und -amplitude mit der Sputterzeit gefunden wird, beobachtet man eine Stabilisierung der Wellenlänge bei $\alpha_{ion} = 60°$ und 70°und eine Zerstörung der Strukturen bei sehr langen Erosionszeiten.

Die Wellenlänge der „Ripple“-Strukturen wächst mit zunehmender Ionenenergie, ist aber unabhängig von der Ionenstromdichte und der Probentemperatur (untersucht bis zu einer maximalen Temperatur von 100 °C). Die zeitliche Entwicklung der Oberflächentopographie läßt sich durch Potenzgesetze für die rms-Rauhigkeit $w \sim t^{\beta}$ und die „Ripple“-Wellenlänge $\lambda = t^{\gamma}$ charakterisieren. Die sogenannten Skalenexponeten β und γ sind ein Maß dafür, wie schnell sich diese Rauhigkeitskenngrößen mit der Zeit ändern und sind wiederum abhängig von den Ionenstrahlparametern.

Im Gegensatz dazu beobachtet man bei Einfallswinkeln < 50° extrem glatte Oberflächen. Bei geeigneter Wahl der Prozessparameter lassen sich Oberflächen mit rms-Rauhigkeiten im Sub-Ångstrom-Bereich /2, 3/, d. h. deutlich weniger als die Ausgangsoberflächen, präparieren.

Zusätzlich wurden die Untersuchungen auf den Fall der simultanen Probenrotation ausgedehnt. Wie erwartet treten dann keine Ripple-Strukturen mehr auf und der Winkelbereich, für den eine Ionenstrahlglättung erfolgt, wird größer. In der Abb. 2 ist diese unterschiedliche Entwicklung der Oberflächenrauhigkeit bei der Zerstäubung mit und ohne Rotation für $\alpha_{ion} = 50°$ dargestellt. Als für diesen Glättungsprozess verantwortlicher Mechanismus wurde die sogenannte „ionenstrahl-induzierte effektive Oberflächendiffusion“ gefunden /2/.

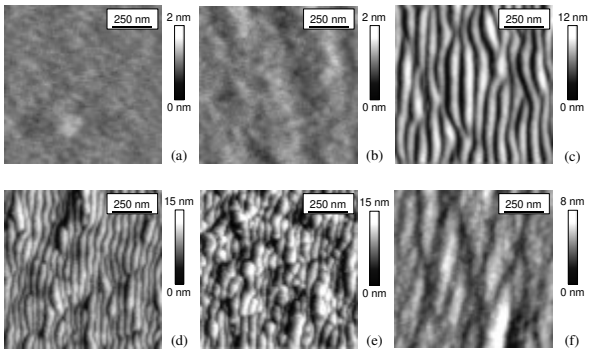


Abb. 1: Oberflächentopographie des Quarzglases nach der Erosion mit 800 eV Ar^+-Ionen. Der Einfallswinkel variiert von 20° (a) bis 80° (f), bezogen auf die Oberflächennormale.

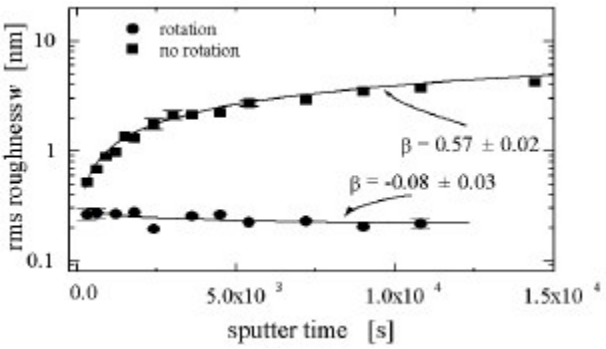


Abb. 2: Darstellung der unterschiedlichen Entwicklung der Rauhigkeit beim Sputtern mit und ohne Rotation. Für den Fall $\alpha_{ion} = 50°$ (800 eV Ar+).

/1/ D. Flamm, F. Frost, D. Hirsch, Evolution of surface topography of fused silica by ion beam sputtering, Appl. Surf. Sci. **179** (2001) 96.

/2/ F. Frost, D. Flamm, Ion beam erosion of quartz glass, eingereicht.

/3/ A. Schindler, T. Hänsel, D. Flamm, W. Frank, G. Böhm, F. Frost, R. Fechner, F. Bigl, B. Rauschenbach, Ion beam and plasma jet etching for optical component fabrication, Proc. of SPIE **4440** (2001) 217.

Selbstorganisierende Nanometerstrukturen durch Ionenstrahlerosion

F. Frost

Die Ionenstrahlerosion von Festkörperoberflächen führt oft zur Zunahme der Rauhigkeit infolge eines komplexen Wechselspieles statistischer Prozesse in Verbindung mit Prozessen wie z. B. der Oberflächendiffusion und der Abhängigkeit der lokalen Abtragsrate von der jeweiligen Oberflächentopographie. Die entstehenden Oberflächentopographien sind durch ihren selbst-affinen Charakter gekennzeichnet. Unter bestimmten Bedingungen (schräger Ioneneinfall) ist es möglich, dass auf den Oberflächen infolge des Erosionsprozesses periodische „Ripple"-Strukturen mit Wellenlängen z. T. deutlich kleiner als 1 µm und einer definierten Orientierung zum einfallenden Ionenstrahl entstehen (siehe auch IOM-Tätigkeitsbericht 2000/2001, Seite 38). Dieses Phänomen ist seit langem für eine Vielzahl von Materialien bekannt (wenn auch noch nicht vollständig verstanden) und kann durch eine sogenannte Oberflächen-Instabilität, hervorgerufen durch den Erosionsprozess, erklärt werden.

Eine neue und faszinierende Entdeckung, insbesondere auch mit Blick auf die möglichen technologischen Anwendungen, wurde kürzlich für verschiedene AIII/BV-Halbleiter gemacht. Dort kann man bei Aufhebung der durch die Ioneneinfallsrichtung vorgegebenen Anisotropie bei der Entwicklung der Oberflächentopographie („Ripple"-Bildung) durch entweder senkrechten Ioneneinfall oder allgemeiner bei schrägem Einfall und simultaner Probenrotation die Ausbildung regelmäßiger Hügel- oder „Dot"-Strukturen mit Abmessungen z. T. deutlich kleiner als 100 nm beobachten. Die entstandenen „Dot"-Strukturen zeichnen sich zum einen dadurch aus, dass sie über große Bereiche völlig regelmäßig angeordnet sind (mit hexagonaler Symmetrie) und zum anderen annähernd gleich groß sind (Abb. 1).

In einem DFG-Projekt wird dieser selbstorganisierende Strukturbildungsprozess umfassend untersucht. Dazu wird die Ionenstrahlerosion verschiedener Halbleiteroberflächen in Abhängigkeit von den relevanten Ionenstrahl- bzw. Prozessparametern (Ionenenergie, Ioneneinfallswinkel, Ionenspezies, Ionenstromdichte und -dosis, Probentemperatur, Rotationsgeschwindigkeit) mittels Rasterkraftmikroskopie (AFM) untersucht. Durch die quantitative Auswertung der so gewonnenen Informationen (Kinetik des Prozesses, Skaleneigenschaften, ...) sowie den Vergleich mit entsprechenden Simulationsrechnungen soll ein wesentlich verbessertes Verständnis dieses Musterbildungsprozesses erreicht werden. Aufgrund der Komplexität der zur Strukturbildung beitragenden Mechanismen auf atomarer Skala erscheint die Modellierung unter Verwendung von stochastischen partiellen Differentialgleichungen sinnvoll. Erste theoretische Überlegungen zur Verwendung dieser Ansätze für den Fall der Ionenerosion bei schrägem Ioneneinfall mit simultaner Probenrotation sind erfolgversprechend /3/. Entsprechende Simulationsrechnungen sollen in Zukunft mit Kooperationspartnern fortgeführt werden.

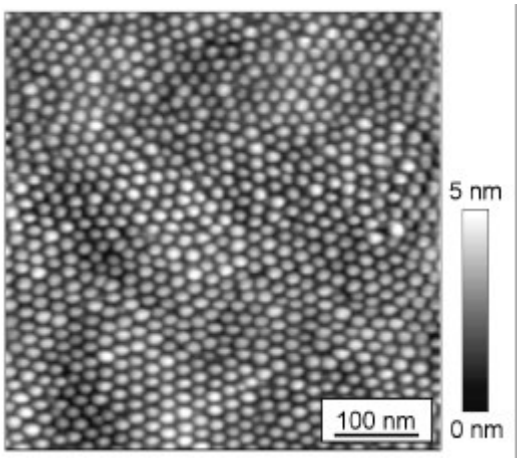


Abb. 1a: AFM-Aufnahme von Dots auf GaSb hergestellt durch Ar^+-Ionenbombardement bei fast streifende Einfall und simultaner Probenrotation. Die Größe der Dots beträgt 12...13 nm.

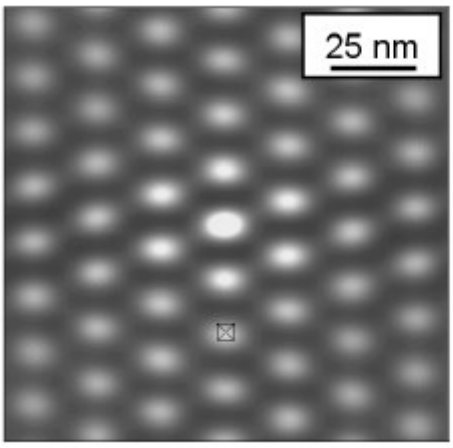


Abb. 1b: Zweidimensionale Autokorrelationsfunktion berechnet für einen Bildausschnitt aus Abb. 1a. Sehr deutlich ist die regelmäßige hexagonale Anordnung der Dots zu erkennen.

/1/ F. Frost, A. Schindler, F. Bigl, *Roughness Evolution of Ion Sputtered Rotating InP Surfaces: Pattern Formation and Scaling Laws*, Phys. Rev. Lett. **85** (2000) 4116.

/2/ F. Frost, D. Hirsch, A. Schindler, B. Rauschenbach, *AFM tip calibration using nanometer-sized structures induced by ion beam sputtering*, Proc. of SPIE **4449** (2001) 225.

/3/ F. Frost, *The role of sample rotation and oblique ion incidence on quantum dot formation by ion sputtering*, Appl. Phys. A **74**: Mater. Sci. Process. (2002) 131.

Sputtercharakteristik von Kohlenstoff-Kohlenstofffaser-Verbundwerkstoff

R. Deltschew, M. Tartz, E. Hartmann,
H. Neumann, H. J. Leiter*

* Astrium GmbH, Space Infrastructure, D-81663 München

Die physikalisch-chemischen Eigenschaften von Kohlenstoff-Verbundwerkstoffen (CFC) sind auch von großem Interesse für Raumfahrtanwendungen z. B. als Wärmeschutzschild und als Material für Extraktionsgitter bei den elektrostatischen Ionentriebwerken. Da die Zerstäubungsausbeute des Gittermaterials dessen Lebensdauer direkt beeinflusst, ist ihre Kenntnis in Abhängigkeit von der Energie und vom Winkel der einfallenden Ionen für Lebensdauerkalkulationen und Materialauswahl von großer Bedeutung. Deshalb wurden Experimente zu ihrer Bestimmung mit Xenon-Ionen unter UHV-Bedingungen (1.10^{-8} mbar) durchgeführt. Die Proben (Graphit PT2120, CFC unterschiedlicher Herstellungsbedingungen) wurden in einer Entfernung von 10 cm vom Extraktionssystem positioniert und solange gesputtert, bis ein Gewichtsverlust mit kleinem Fehler bestimmt werden konnte (1 Std. bis 7 Std). Neben der Zerstäubungsausbeute konnte die Evolution der Oberflächentopografie mittels REM untersucht werden.

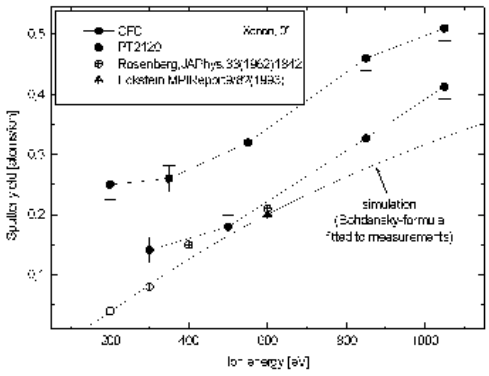


Abb. 1: Sputterrate von Graphit und CFC in Abhängigkeit von der Energie der einfallenden Xenonionen.

Die energieabhängige Zerstäubungsausbeute vom CFC ist um einen Faktor 2 bis 3 höher als die Zerstäubungsausbeute vom Graphit (Abb. 1). Die Oberflächentopographie beeinflusst wesentlich die Sputterausbeute. In dem Falle einer definierten Oberflächenstruktur (hier: geordnete Zylinder, die in der Kohlenstoffmatrix eingebettet sind) sind drei Effekte während des Sputterprozesses von Bedeutung: - nur eine Winkelverteilung ist definierbar, - Abschattung bei schrägem Ioneneinfall, - Redeposition vom gesputterten Material. Abb. 2 (oben) zeigt die tatsächliche Winkelverteilung bei senkrechtem Ioneneinfall, wobei sich ein mittlerer Oberflächenwinkel von 47° bestimmen lässt. Bei diesem mittleren Winkel ergibt sich die Sputterrate der zylinderdominierten Oberfläche bei senkrechtem Ioneneinfall um einen Faktor 3,1 bei 500 eV und 2,3 bei 1000 eV größer als die von Graphit, was gut mit den experimentell ermittelten Ergebnissen übereinstimmt. Infolge der unterschiedlichen Auswirkungen der obengenannten Effekte bei den verschiedenen Ioneneinfallswinkeln ist die gemessene Zerstäubungsausbeute bei kleineren Winkeln höher und bei sehr schrägem Ioneneinfall niedriger als bei einer glatten Oberfläche (Abb. 3). Beim Sputtern der Strukturen an der Oberfläche konnte eine Evolution der Oberflächentopograpfie nachgewiesen werden (Abb. 2).

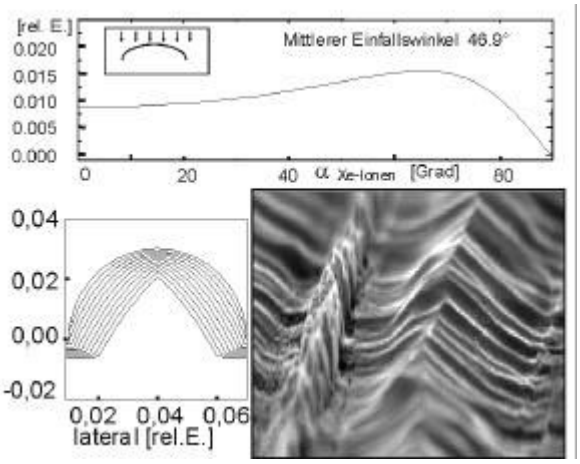


Abb. 2: Wiinkelverteilung der Ionen bei 0°. Simulation der Evolution der Oberflächentopografie einer Faser beim normalen Ioneneinfall verglichen mit einer typischen Oberflächenstruktur nach 4 h Sputtern mit 500 eV Xe-Ionen (REM).

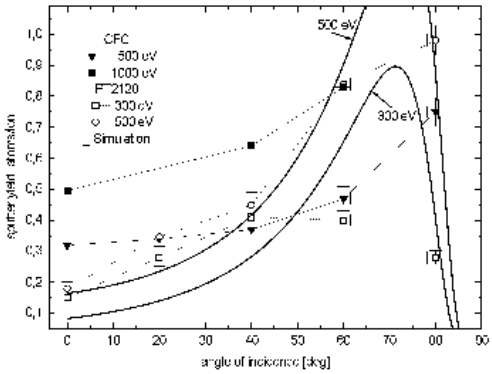


Abb. 3: Sputterrate von Graphit und CFC in Abhängigkeit von dem Winkel der einfallenden Xenonionen.

Diese Evolution der Zylinder bis zur Ausbildung einer stabilen Struktur führt zu einer Zeitabhängigkeit der Zerstäubungsrate. Es bleibt zu untersuchen, ob dieser Effekt durch Variation der Herstellungstechnologie bzw. Oberflächenpräparation beeinflusst werden kann.

Chemische und elektronische Eigenschaften modifizierter InP-Grenzflächen

R. K. Gebhardt*, A. B. Preobrajenski*, T. Chassé

* Universität Leipzig, Wilhelm-Ostwald-Institut für Physikalische und Theoretische Chemie, D-04103 Leipzig

Die strukturell-chemischen und elektronischen Eigenschaften von Halbleitergrenzflächen können bereits durch Interfaceschichten auf der Skale von Monolagen (ML) oder Submonolagen signifikant beeinflusst werden. Dies ist besonders wichtig für die chemische und elektronische Passivierung sowie elektronische Parameter der Halbleitergrenzflächen wie Schottky-Barriere oder Valenzbandoffset. Im Rahmen eines gemeinsam mit der Universität Leipzig durchgeführten Projektes wurden InP(110) und InP(001)-(2 x 4) Oberflächen ex situ und in situ durch Schwefel- oder Arsen-Monoschichten modifiziert, um deren Einfluss auf Grenzflächenreaktionen, Schichtwachstum und elektronische Eigenschaften zu erfassen. Für die Untersuchungen wurden Photoelektronenspektroskopie (XPS, UPS) und Elektronenbeugung (XPD, LEED) herangezogen. Exemplarisch wurden Grenzflächen mit den Metallen Sn und Ag sowie mit Ge untersucht. Die Abscheidung erfolgte bei Raumtemperatur aus wassergekühlten Knudsenzellen /1, 3/.

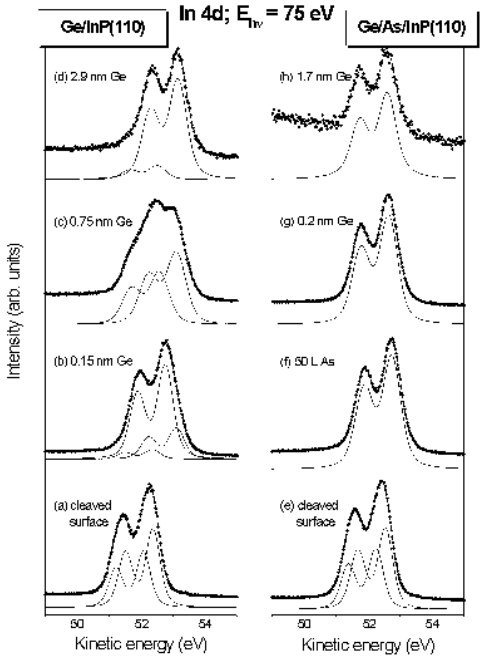


Abb. 1: Links: In 4d-Rumpfniveauspektren von Ge/InP(110) Interfaces bei unterschiedlichen Ge-Bedeckungen. Rechts: In 4d von der As-modifizierten Grenzfläche.

Die chemische Passivierung der Ge/InP(110)-Grenzfläche durch Voradsorption einer As-ML wird in Abb. 1 an Substrat-Rumpfniveaus gezeigt. Während in den In 4d-Spektren der reinen Interface infolge einer Ge-InP-Reaktion neue Komponenten entstehen, sind die Spektren nach As-Modifizierung einkomponentig. Die Grenzflächenreaktion wird durch das As unterdrückt /1/.

In Abb. 2 wird die elektronische Wirkung der Grenzflächenmodifizierung demonstriert. Sie zeigt die Veränderungen des Oberflächenferminiveaus (SFL) durch die Abscheidung von Ge auf einer Spaltfläche von n-InP sowie nach Voradsorption einer ML As. Die Verlagerung des SFL vom Flachbandfall zur Gapmitte korrespondiert mit der beobachteten Ge-InP-Reaktion, deren elektronische Auswirkungen erst durch nachfolgende Ge-Depositionen allmählich kompensiert werden. An der As-modifizierten Grenzfläche nähert sich das SFL ausgehend von einer As-bedingten Pinning-Position sehr schnell einem Sättigungswert. Darüberhinaus bewirkt die Grenzflächenmodifizierung mit As eine signifikante Absenkung des Valenzbandoffsets um 0,23 eV. Dieser Effekt kann unter der Annahme von reaktionsinduzierten Donatoren an der reinen Grenzfläche im Rahmen eines Defektmodells (VIGS) befriedigend erklärt werden /1/.

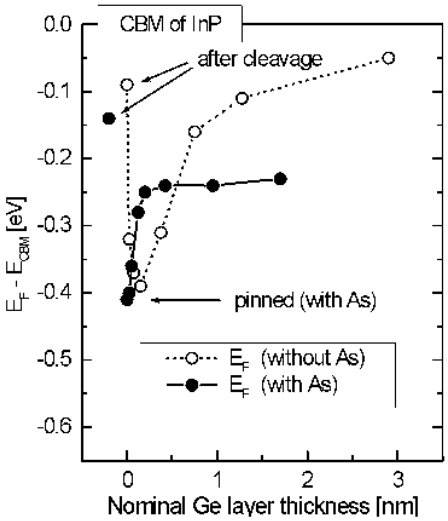


Abb. 2: Entwicklung des Oberflächen-Ferminiveaus im Gap von InP bei Deposition von Ge auf InP(110), (aus bandverbiegungsinduzierten In 4d-Verschiebungen).

Ausgehend von adsorbatinduziert rekonstruierten InP(001)-Oberflächen wurden S- und As-modifizierte Metall-Halbleitergrenzflächen untersucht /2, 3/. Die S-modifizierten Grenzflächen erweisen sich dabei als schlechter passiviert. Eine signifikante Absenkung der Schottky-Barrieren auf n-InP um 0,2-0,3 eV kann auf S-induzierte Interface-Donatoren zurückgeführt werden /3/.

/1/ A. B. Preobrajenski, S. Schömann, R. K. Gebhardt, T. Chassé, *Passivation of the Ge/InP(110) interface by As interlayers - Interface reaction and band offsets*, J. Vacuum Sci. Technol. B, **18** (2000) 1973.

/2/ R. K. Gebhardt, A. B. Preobrajenski, T. Chassé, *Core and valence level photoemission study of the InP(001)-(2x1)S surface: Surface structure and electronic states*, Phys. Rev. B, **61** (2000) 15, 9997.

/3/ R. K. Gebhardt, Dissertationsschrift, Universität Leipzig, 2001.

Charakterisierung der niederenergetischen Ionenstrahlnitridierung von III-V-Halbleitern mittels XPS und NEXAFS

J.-D. Hecht, F. Frost, A. B. Preobrajenski*, S. Krasnikow*, L. Zhang*, D. Hirsch, T. Chassé

* Universität Leipzig, Wilhelm-Ostwald-Institut für Physikalische und Theoretische Chemie, 04103 Leipzig

Die Nitridierung von III-V-Halbleiteroberflächen gewinnt zunehmend an Bedeutung. Mit ihrer Hilfe können z. B. Nitride epitaktisch auf klassischen Substraten gewachsen und Halbleiteroberflächen passiviert werden. Im Gegensatz zur thermischen, plasma- oder ionenstrahlgestützten Nitridierung von GaAs liegen für die In-haltigen III-V-Halbleiter nur sehr wenige Untersuchungen vor.

Für die hier dargestellten Untersuchungen wurde das Augenmerk speziell auf die Nitridierung durch Beschuss mit niederenergetischen N_2^+-Ionen gelegt, da hierfür schon der Nachweis einer Präparation extrem glatter Substratoberflächen erbracht werden konnte (siehe IOM-Tätigkeitsbericht 1998/99). Die hier vorgestellten Arbeiten werden im Rahmen des Teilprojektes 1 der DFG-Forschergruppe „TSUPOB“ sowie eines BMBF-Projekts durchgeführt.

Als *in-situ*-Untersuchungsmethoden standen u. a. Photoelektronenspektroskopie (XPS) im IOM sowie XPS und Röntgenabsorptionsspektroskopie (NEXAFS) an der Synchrotronstrahlquelle des BESSY II in Berlin zur Verfügung. Beide Methoden erlauben Aussagen zu den chemischen und strukturellen Eigenschaften der Oberflächen.

Als Proben wurden nominell undotierte (100) GaAs-, InAs-, InP- und InSb-Substrate ohne jegliche Vorbehandlung verwendet. Der Beschuss mit N_2^+-Ionen erfolgte unter Variation von Ionenstrahlenergie, -auftreffwinkel und Substrattemperatur. Teilweise erfolgte anschließend ein Tempern der Proben. Durch Analyse der Rumpfniveau-Spektren N 1s, In 3d, Ga 3d, As 3d, P 2p, Sb 3d, C 1s und O 1s konnte für alle Proben ein (fast) vollständiger Abtrag der natürlichen Oxidschicht sowie die Bildung einer Nitridschicht festgestellt werden. Hierbei traten sowohl Bindungen des Stickstoffs an In, Ga als auch an P und As auf, während keine Sb-N-Bindungszustände nachgewiesen werden konnten /1/. Zusätzlich wurde immer eine bisher unbekannte Stickstoffkomponente gefunden, welche anhand des Vergleiches der XPS- und NEXAFS-Spektren als molekularer Stickstoff auf Zwischengitterplatz identifiziert wurde (siehe Abb. 1) /2, 3/. Die NEXAFS-Spektren konnten anhand Mehrfachstreuberechnungen sehr gut angepasst werden /4/. Durch Tempern der Substrate oberhalb 200 °C wurde der Abbau dieses molekularen Stickstoffs und somit ein Ausheilen der Nitridschichten erreicht.

Zusätzlich zu den bei RT-Stickstoffbeschuss erhaltenen sehr glatten Oberflächen konnten im Gegensatz zum Beschuss mit Ar^+-Ionen bezüglich des III-V-Verhältnisses (einschließlich N) nahezu stöchiometrische Substratoberflächen erzielt werden.

Es zeigte sich jedoch, dass die Zusammensetzung der Oberflächen stark von den Präparationsparametern abhängt. So wird z. B. für einen streifenderen Einfall des Ionenstrahls zwar weniger molekularer Stickstoff eingebaut, aber auch weniger Stickstoff gebunden, wobei dieser dann teilweise als Oxinitrid vorliegt.

Anhand dosisabhängiger Untersuchungen sowie mittels Ar^+-Sputterns gewonnener Tiefenprofile konnten Aussagen über die Kinetik des Nitridierungsprozesses gemacht, ein Gleichgewichtsmodell der nitridierten Oberfläche erstellt und ein Erklärungsmodell für die Implantation molekularen Stickstoffs gegeben werden.

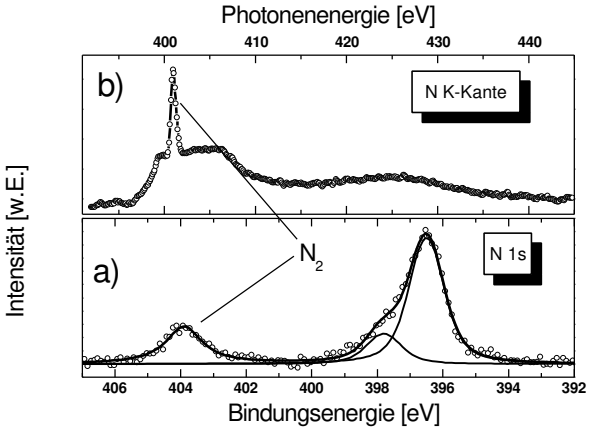


Abb. 1a,b: XPS- und NEXAFS-Spektrum des N 1s-Bindungszustandes bzw. der N K-Kante. Markiert wurden die dem implantierten N_2 zugeordneten Anteile (XPS: 403,8 eV und NEXAFS: 401,0 eV).

/1/ J.-D. Hecht, F. Frost, T. Chassé, A. B. Preobrajenski, D. Hirsch, H. Neumann, A. Schindler, B. Rauschenbach, *In situ characterisation of the nitridation of AIII-BV semiconductor surfaces by means of X-ray photoelectron spectroscopy*, Appl. Sur. Sci. **179** (2001) 196.

/2/ J.-D. Hecht, F. Frost, T. Chassé, A. B. Preobrajenski, D. Hirsch, H. Neumann, A. Schindler, F. Bigl , *Observation of interstitial nitrogen for the low-energy ion beam nitridation of AIII-BV semiconductor surfaces by means of X-ray absorption spectroscopy and X-ray photoelectron spectroscopy*, J. Appl. Phys. **90** (2001) 6066.

/3/ J.-D. Hecht, F. Frost, A. B. Preobrajenski, T. Chassé, *XANES study on the low-energy ion beam nitridation of AIII-BV semiconductor surfaces*, BESSY Annual report (2000) 163.

/4/ T. Chassé, K. H. Hallmeier, J.-D. Hecht, F. Frost, *X-ray absorption near edge structure investigations of group III nitrides and and nitrided AIII-BV semiconductor surfaces - FEFF calculations and electron yield measurements*, Surf. Rev. Lett., im Druck.

Charakterisierung von Mo/Si-Multilayerbeschichtungen für EUV-Lithographiemasken

T. Chassé, H. Neumann, G. Otto, W. Frank, F. Frost, A. Schindler, G. Wagner, D. Hirsch, B. Rauschenbach, B. Ocker*, M. Scherer*, M. Haidl**, S. Müllender**, M. Lorenz***, M. Zeuner****

* Unaxis Deutschland GmbH, D-63755 Alzenau, Germany
** Carl Zeiss, D-73446 Oberkochen, Germany
*** Universität Leipzig, Fakultät für Physik und Geowissenschaften, D-04103 Leipzig, Germany
**** IOT GmbH, D-04318 Leipzig

In einem gemeinsamen Projekt mit der Unaxis Deutschland GmbH Alzenau wurden Mo/Si-Multilayerbeschichtungen, die in ihren Parametern für eine Anwendung als EUV-Lithographie-Maskblanks ausgelegt waren, hergestellt und nachfolgend umfassend charakterisiert. Ziel des Vorhabens war die Vorbereitung eines BMBF-Projektantrages im Rahmen des Gesamtkonzeptes „Grundlagen der EUV Lithographie-Phase 1“.

Für die Abscheidung der Mo/Si-Multilayer wurde ein CYBERITE IBD System benutzt. Das Schichtsystem bestand aus einer 4 nm-Si-Unterlage auf 4“ Si-Wafern und 50 Doppelschichten aus 2,7 nm Mo/4 nm Si. Diese Dickenparameter sind optimal für einen Einsatz als reflektierende Schicht bei einer Wellenlänge von 13,4 nm, wie sie für EUVL favorisiert wird. Die Schichtdicken wurden über die Abscheidungszeiten eingestellt. Es wurden mehrere hundert Substrate beschichtet. Die Charakterisierung der Mo/Si–Schichtstapel wurde am IOM Leipzig durchgeführt bzw. koordiniert. Abb. 1 zeigt eine TEM-Hellfeldaufnahme eines solchen Schichtpaketes. Die deutlich aufgelöste Struktur des Stapels belegt die exzellente Kontrolle der einzelnen Schichten mit glatten Interfaces sowie die Stabilität der Abscheidungsraten.

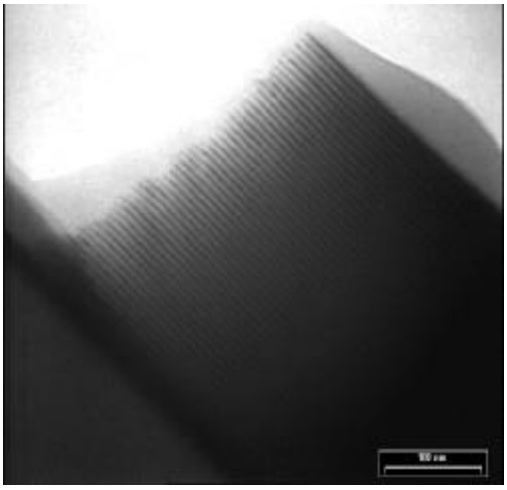


Abb. 1: TEM-Hellfeldaufnahme eines Mo/Si-Schichtstapels aus 50 Doppelschschichten auf Si(100).

Aus den TEM-Aufnahmen sowie zusätzlichen TEM-Beugungsbildern wurde die Schichtperiode zu 6,7 nm bestimmt. Bereits die TEM-Bilder weisen auf die Ausbildung partiell polykristalliner Mo-Schichten und eine begrenzte Durchmischung von Mo und Si an den Grenzflächen hin.

Diese Resultate korrelieren sehr gut mit den Aussagen von Röntgen-Reflektivitätsmessungen (Cu Kα) bei streifendem Einfall. Die Reflektivität des ersten Bragg-Peaks betrug 96 %, was erneut die geringe Interfacerauheit belegt. Die hohe Auflösung in Verbindung mit einer kompletten Simulation dieser Reflektivitätskurven bei 0,154 nm Wellenlänge bestätigen die Schichtperiode von 6,7 nm, deuten auf Grenzflächen-Silizidschichten von ca. 0,5 nm Dicke hin und demonstrieren durch das detaillierte Nachzeichnen der Feinstrukturen die exzellente Perodizität des Schichtsystems.

AFM-Messungen an Substraten und Schichtsystemen lieferten in beiden Fällen Rauigkeitswerte von ca. 0,17 nm. SNMS und SIMS wurden eingesetzt, um die Elementverteilungen im Detail zu verfolgen. Auch hier lieferten die Tiefenprofile Belege für ein Intermixing an den Mo/Si-Interfaces.

Ein zentraler Parameter für die Einsetzbarkeit von Multischichtsystemen für EUVL ist die Reflektivität im Bereich der Einsatzwellenlänge von 13,4 nm. Entsprechende Reflektivitätskurven wurden in Zusammenarbeit mit Carl Zeiss und der PTB bei BESSY II in Berlin aufgenommen. Abb. 2 zeigt eine repräsentative Messkurve einer Mo/Si-Schicht.

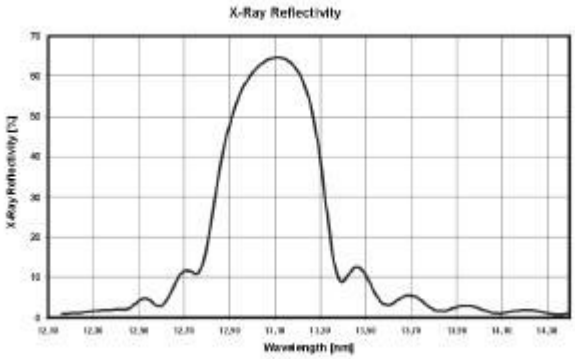


Abb. 2: Reflektivitätskurve eines Mo/Si-Schichtstapels im Wellenlängenbereich 12 bis 14 nm.

Es wurden durchgängig sehr gute Reflektivitäten zwischen 64 und 65 % gemessen. Damit konnte gezeigt werden, dass die Ionenstrahlabscheidung von Mo/Si-Schichten auf der Basis der CYBERITE eine konkurrenzfähige Technologie darstellt.

/1/ B. Ocker, M. Scherer, T. Chassé, B. Rauschenbach, W. Frank, F. Frost, A. Schindler, D. Hirsch, G. Otto, H. Neumann, M. Haidl, S. Müllender, G. Wagner, M. Lorenz, M. Zeuner, *A Candidate for Next Generation Lithography: EUV*, Proximity (2000) 32.

/2/ B. Ocker, M. Scherer, T. Chassé, B. Rauschenbach, W. Frank, F. Frost, A. Schindler, D. Hirsch, G. Otto, H. Neumann, M. Haidl, S. Müllender, G. Wagner, M. Lorenz, M. Zeuner, *A Candidate for Next Generation Lithography: EUV*, Chip (2000) 30.

Modellvorstellung zur Ionenstrahlgestützten Abscheidung epitaktischer GaN-Schichten

J. W. Gerlach, S. Sienz, H. Neumann, B. Rauschenbach, A. Anders*, J. Keckes**

* Lawrence Berkeley Laboratory, Plasma Applications Group, 1 Cyclotron Road, MS 53-004 Berkeley, CA 4720, USA
** Erich Schmid-Institut für Materialwissenschaften, Österreichische Akademie der Wissenschaften, A-8700 Leoben, Österreich

Der III-V-Halbleiter Galliumnitrid (GaN) zeichnet sich durch eine direkte Bandlücke mit einer Breite von 3,4 eV, einer Wellenlänge von 365 nm entsprechend, aus. Hexagonales GaN wird deshalb vorwiegend als Basismaterial für die Herstellung von Leucht-, und Laserdioden, die im ultravioletten und blauen Spektralbereich emittieren, aber auch als UV-Lichtsensor oder Hochleistungsverstärker verwendet. Voraussetzung für eine hohe Leistungsfähigkeit und lange Lebensdauer dieser Bauteile ist eine hohe kristalline Qualität des Materials.
Da sich ein hyperthermischer Energieeintrag in die Oberfläche einer wachsenden Schicht vorteilig auf das Schichtwachstum auswirken kann, wurden Untersuchungen zum ionenstrahlgestützten epitaktischen Wachstum dünner hexagonaler GaN-Schichten auf c-Ebenen-Saphir angestellt (Zusammenfassung siehe /1/).

Experiment

Die Ergebnisse zur Abhängigkeit der kristallinen GaN-Schichtqualität von der Energie E der verwendeten Stickstoffionen zeigen, dass bei etwa 50 eV eine Schwelle existiert, ab der mit steigender Ionenenergie die kristalline Qualität der Schichten drastisch abnimmt. Zwar werden selbst bei E = 150 eV epitaktische Schichten erhalten, doch Morphologie und Mosaizität der Schichten verschlechtern sich. Zunehmend werden Anteile des kubischen GaN-Polytyps gefunden /2/. Bei E maximal 25 eV gelingen phasenreine hexagonale GaN-Schichten hoher kristalliner Qualität (siehe Abb. 1). Diese lässt sich weiter erhöhen, indem die Zahl der pro Galliumatom einfallenden Ionen größer Eins gewählt wird. Die mittels ionenstrahlgestützter Abscheidung abgeschiedenen Schichten sind mechanisch verspannt /3/. Die Verspannung der 25 eV-GaN-Schichten setzt sich dabei aus einem intrinsischen Zug- und einem diesen überkompensierenden thermischen Druckspannungsanteil zusammen.

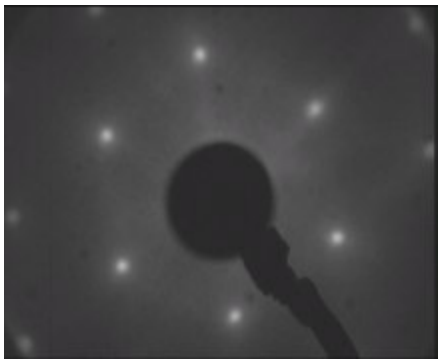


Abb. 1: LEED-Aufnahme einer GaN-Schicht auf c-Saphir.

Theorie

Ein Schlüsselparameter bei der Ionenstrahlgestützten Abscheidung ist die Energie der Ionen, mit denen die Schicht bestrahlt wird. Um das epitaktische Wachstum durch den Ionenstrahl zu unterstützen, sollte einerseits die Ionenenergie nicht zu hoch sein, da sonst unterhalb der Oberfläche Defekte erzeugt werden. Andererseits sollte die Energie der eingeschossenen Ionen nicht so gering sein, dass keine Atome verlagert werden. Das denkbar günstigste Szenario ist, wenn durch die Ionenbestrahlung nur Atome an der Schichtoberfläche verlagert werden; dies entspricht einer Stimulierung der Adatommobilität.

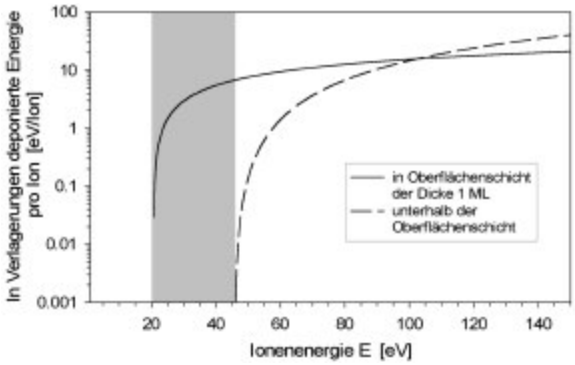


Abb. 2: Berechnete Energieabhängigkeit der Defekterzeugung in GaN durch Bestrahlung mit Stickstoffionen.

Das Ergebnis von Berechnungen zu dem für die ionenstrahlgestützte Epitaxie von GaN geeigneten Ionenenergiebereich ist in Abb. 2 dargestellt. Aufgetragen ist die pro Ion in Verlagerungsstöße deponierte Energie, zum einen in einem Oberflächenbereich der Dicke einer Monolage (ML) und zum anderen im Bereich darunter. Der geeignete Energiebereich, in dem lediglich Oberflächenatome verlagert werden (grau hervorgehoben), stimmt mit den experimentellen Ergebnissen gut überein.

/1/ J. W. Gerlach, *Ionenstrahlgestütztes epitaktisches Wachstum hexagonaler GaN-Schichten*, Dissertation, Universität Augsburg (2000), Mensch & Buch Verlag, Berlin (2001).

/2/ J. Keckes, J. W. Gerlach, R. Averbeck, H. Riechert, S. Bader, B. Hahn, H.-J. Lugauer, A. Lell, V. Härle, A. Wenzel, B. Rauschenbach, *Temperature dependence of stresses in GaN thin films grown on (0001) sapphire: modelling of thermal stress*, Appl. Phys. Lett., **79** (2001) 4307.

/3/ J. W. Gerlach, S. Sienz, W. Attenberger, B. Rauschenbach, *Influence of defects in low-energy nitrogen ion beam assisted gallium nitride thin film deposition*, Physica **B 308-310** (2002) 81.

Epitaktisches Wachstum und Selbstorganisation bei der Abscheidung von Sulfidschichten auf III-V-Halbleiteroberflächen

A. B. Preobrajenski*, K. Barucki**, T. Chassé

* Universität Leipzig, Wilhelm-Ostwald-Institut für Physikalische und Theoretische Chemie, D-04103 Leipzig
** IOT GmbH, D-04318 Leipzig

In einem gemeinsamen BMBF-Projekt mit der Universität Leipzig wurde das Wachstum und die elektronische Struktur von sulfidischen Schichten auf III-V-Halbleitern untersucht. Im Vordergrund standen die Grenzflächen der schmal- bzw. breitlückigen Halbleiter PbS (NaCl-Struktur) und CdS (Wurzit) auf InP (Zinkblende). Diese Halbleiter haben Gitterkonstanten, die sich nur um etwa 1 % voneinander unterscheiden. Von Interesse war neben den Grenzflächenreaktionen insbesondere der Einfluss der unterschiedlichen Struktur von Schicht- und Substratmaterial auf das Wachstum in Abhängigkeit von der Substratorientierung und der Temperatur. Dafür wurden PbS und CdS bei unterschiedlichen Temperaturen als Verbindungen aus Knudsenzellen auf relaxierte InP(110) und rekonstruierte InP(001)-(2x4) Oberflächen aufgedampft. Mit XPS wurde die Grenzflächenreaktion kontrolliert. Für beide sulfidische Materialien wurden jeweils auf der (001)-Oberfläche deutlich intensivere Interfacereaktionen beobachtet. Dagegen war die PbS/InP(110) Grenzfläche nach den XPS-Ergebnissen bei Raumtemperaturabscheidung atomar abrupt /1/.
Mit LEED wurde die Struktur der Schichten überprüft. Für PbS konnte bereits bei RT epitaktisches Wachstum konstatiert werden. Eine Erhöhung der Substrattemperatur auf 100-200 °C verbesserte die Qualität der erhaltenen LEED-Bilder und damit die Kristallstruktur der Schicht merklich.

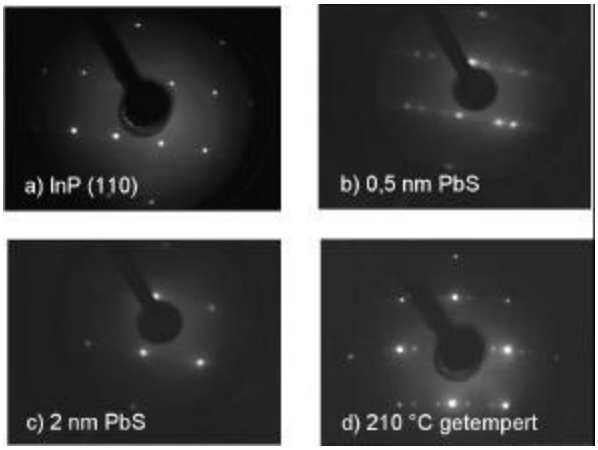


Abb. 1: LEED-Bilder von der InP(110)-Spaltfläche und PbS-Schichten unterschiedlicher Dicke, abgeschieden bei Raumtemperatur (a-c) bzw. (d) nach Tempern bei 210 °C.

Für CdS waren dafür etwas höhere Temperaturen erforderlich. Bemerkenswert war das Auftreten einer (2x1)-Rekonstruktion nach Submonolagenabscheidung bei erhöhten Wachstumstemperaturen oberhalb 180 °C, die auf eine geordnete In-S-Interfacephase hinweisen. Diese wurde bei niedrigen Temperaturen nicht beobachtet. Auf allen untersuchten Kombinationen von Schicht und Substratorientierung wurde epitaktisches Schichtwachstum festgestellt, und die epitaktischen Relationen wurden mittels LEED und Photoelektronenbeugung (XPD) bestimmt.
Beim Wachstum von PbS auf InP(110) wurde oberhalb 200 °C ein Übergang vom Schicht- zum Inselwachstum beobachtet, der im engen Temperaturbereich 270 °C-300 °C zur Ausbildung von Inselverteilungen mit charakteristischen Eigenschaften führt. Diese wurden mit XPS/XPD, LEED und AFM untersucht /2/:

- sehr schmale Größenverteilung der Inseln,
- weitgehend einheitliche Inselabstände,
- PbS-Inseln mit einheitlich pyramidaler Form,
- einheitliche Ausrichtung der PbS-Inseln,
- eindeutige Epitaxierelationen zum Substrat.

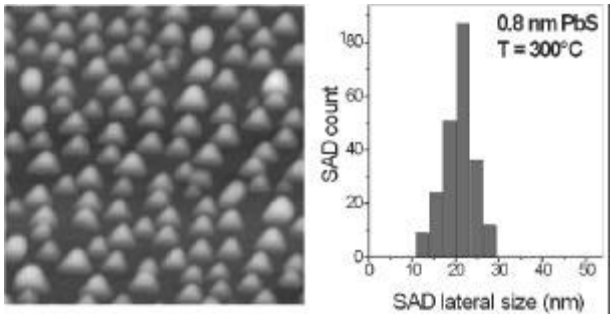


Abb. 2: AFM-Bild (500 nm) einer PbS-Inselverteilung, die nach Deposition von nominell 1,5 nm PbS bei 280 °C erhalten wurde. Daneben eine Grössenverteilung von PbS-Inseln nach Deposition von 0,8 nm bei 300 °C.

Form und Orientierung der PbS-Inseln ergeben sich aus einer vollständig kommensurablen Anpassung von Insel- und Substratgitter, die zu einer Neigung der PbS (001)-Ebene der Inseln von 20° zur (110)-Oberfläche des Substrates führen. Die Einheitlichkeit der Eigenschaften der Inselverteilungen weist auf das Wirken von Selbstorganisationsprozessen hin. Die PbS-Verteilungen lassen sich auch als Self-Assembled Dots (SAD) charakterisieren. Der hier gefundene Inselwachstumsmechanismus unterscheidet sich signifikant vom Stranski-Krastanov-Mechanismus bei Halbleitern mit grösserem Misfit. Er bietet neue Möglichkeiten zur Strukturbildung an Grenzflächen von Materialien unterschiedlicher Kristallstruktur.

/1/ A. B. Preobrajenski, T. Chassé, *Atomic and electronic structure of epitaxial PbS on InP(110) and InP(001)*, Appl. Surface Science, **166** (2000) 201.
/2/ A. B. Preobrajenski, K. Barucki, T. Chassé, *Exploiting the difference in lattice structures for formation of self-assembled PbS dots on InP(110)*, Phys. Rev. Lett., **85** (2000) 20, 4337.

Leitungstypkonvertierung von p-Typ $CuInSe_2$

K. Otte, G. Lippold, T. Chassé, A. Schindler

Dünnschichtsolarzellen mit $Cu(In,Ga)Se_2$ als Absorberschicht besitzen mit 18,8 % einen sehr hohen Wirkungsgrad für Dünnschichtsolarzellen. Trotz der bereits intensiv erforschten chemischen und physikalischen Eigenschaften existieren noch viele offene Fragen bei den Materialeigenschaften, insbesondere der komplexen Defektchemie. Experimente zum besseren Verständnis des Defekthaushaltes sowie Möglichkeiten, diesen während und nach dem Herstellungsprozess gezielt zu modifizieren, können zu einer weiteren Verbesserung der elektrischen Eigenschaften und eventuell des Wirkungsgrades beitragen.

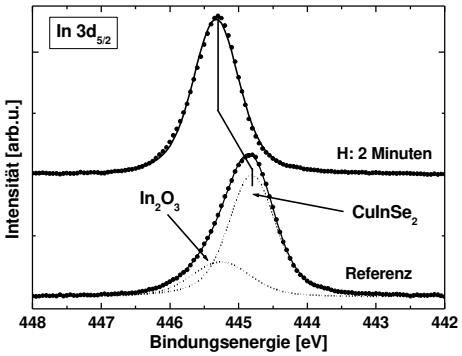


Abb. 1: In $3d_{5/2}$-Spektrum einer $CuInSe_2$-Probe vor und nach Wasserstoffbestrahlung.

Nachbehandlungen (Oxidierung oder Hydrogenisierung) der CIS-Absorberschicht ermöglichen u. a. die Beeinflussung des Defekthaushaltes. So führt z. B. eine nachträgliche Oxidierung zu einer Passivierung von V_{Se} (Selen-Fehlstellen), welche als Donator aktiv sind. In-situ-XPS- (X-ray photoelectron spectroscopy) Untersuchungen zeigen nach der Bestrahlung der CIS-Oberfläche mit Wasserstoff (300 eV, 25 µA/cm^2, 300 °C Probentemperatur) eine komplette Entfernung aller Oberflächenoxide sowie Verunreinigungen /1, 2/. Dies ist am Beispiel des In_2O_3 durch die XPS-Messung der In 3d-Rumpfniveaulinie in Abbildung 1 dargestellt. Bereits nach 2 Minuten H-Bestrahlung beobachtet man die komplette Entfernung des Oxidpeaks. Die zusätzliche Verschiebung des Hauptpeaks korrespondiert mit der induzierten Bandverbiegung, auch ersichtlich an der Verschiebung des Valenzbandmaximums (VBM) um 500 MeV in Abbildung 2. Dies entspricht einer Leitungstypkonvertierung (LTK) vom p-Typ der CIS-Referenzoberfläche (Bandabstand = 1,04 eV) zum n-Typ. Die einzige zusätzliche Veränderung der Oberfläche ist eine leichte Abnahme der Cu-Konzentration durch die H-Bestrahlung.

Es stellt sich die Frage nach dem Grund für die Wasserstoff-induzierte LTK und der Korrelation mit der Cu-Verarmung. Die Oxidentfernung durch den Wasserstoff führt zu einer Re-Aktivierung der Sauerstoff-passivierten V_{Se} und damit zu einer Vergrößerung der Donatorkonzentration. Dies kann jedoch nicht der Grund für die beobachtete LTK durch den Wasserstoff bei Oxid-freien Proben (Spaltflächen) sein /1/. Des Weiteren führt die beobachtete Cu-Verarmung zu einer Vergrößerung der Konzentration von V_{Cu}, die als elektrisch aktive Akzeptoren die p-Leitfähigkeit stabilisieren. Auch dies kann nicht die beobachtete LTK erklären. Aus diesem Grund müssen weitere Einflüsse auf den elektrischen Defekthaushalt durch den Wasserstoff betrachtet werden. Folgendes Modell ergibt sich unter Berücksichtigung der aktuellen Ergebnisse zur Defektchemie in $CuInSe_2$ (Abbildung 3) /2/:

Der eingebaute Wasserstoff auf einer Zwischengitterposition (H_i) wirkt als Donator und veranlasst damit die beobachtete LTK. Die resultierende Bandverbiegung führt zur Cu-Freisetzung von seinem Gitterplatz und damit zur Erzeugung von V_{Cu} (geringere Defektbildungsenergie). Diese zusätzlichen V_{Cu} werden jedoch durch den Wasserstoff passiviert, da ansonsten die Akzeptorkonzentration ansteigt. Das elektrische Feld der induzierten Oberflächen-Bandverbiegung führt zu einer Elektromigration von Cu^+ in das Volumen und damit zu einer Cu-Verarmung der Oberfläche, was durch die XPS-Messungen bestätigt wird. Dies wird nicht nur an der Oberfläche, sondern auch innerhalb der H-Diffusionstiefe (etwa 200 nm) beobachtet.

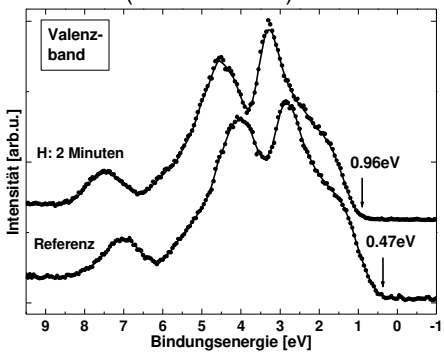


Abb. 2: VB-Spektrum einer $CuInSe_2$-Probe vor und nach Wasserstoffbestrahlung.

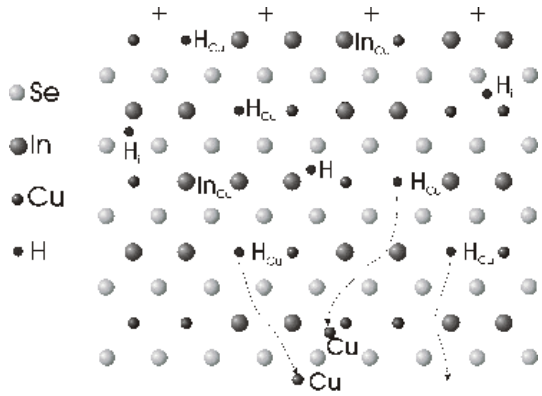


Abb. 3: Schematische Darstellung einer (112) CIS-Oberflächenregion nach Wasserstoffbestrahlung.

/1/ K. Otte, G. Lippold, D. Hirsch, R. K. Gebhardt, T. Chassé, Appl. Surf. Sci. **179** (2001) 203.
/2/ K. Otte, T. Chassé, G. Lippold, B. Rauschenbach, R. Szargan, J. Appl. Phys. **91** (2002), im Druck.

In-situ-Charakterisierung bei der Synthese von vergrabenen Übergangsmetalloxid-Schichten durch Hochenergie-Ionenbestrahlung

Y. Bohne, B. Rauschenbach

Das Ziel dieses Forschungsvorhabens war es, eine Experimentiereinrichtung zur in-situ-Phasen- und Defektcharakterisierung während der Materialmodifizierung mittels hochenergetischer Ionenbestrahlung aufzubauen, um Informationen über die Phasen- und Defektbildung weitab vom thermodynamischen Gleichgewicht gewinnen zu können. Dabei soll im Einzelnen eine Kombination zwischen Hochdosis- und Hochenergie-Ionenbestrahlung und in-situ-Röntgendiffraktometrie und Vierpunkt-Widerstandsmessung in einem weiten Temperaturbereich realisiert werden.
Diese Experimentiereinrichtung wird vorrangig für die Untersuchung der Synthese von Übergangsmetalloxiden genutzt, wobei die Herstellung von vergrabenen, optisch transparenten Oxidschichten ausgeführt werden soll.
Solche Übergangsmetalloxid-Schichten zeichnen sich durch elektrische, magnetische, thermische, optische und mechanische Eigenschaften aus, die beispielsweise für spezifische Anwendungen in der Elektronik bzw. Optoelektronik von Interesse sind.
Im Rahmen des Forschungsvorhabens steht die Herstellung von Titan- und Molybdänoxiden mittels Hochdosis-Ionenimplantation im Vordergrund. Dazu wird die Experimentiereinrichtung am Ionenbeschleuniger des Ionenstrahlzentrums (AIM) des FZ Rossendorf adaptiert.
Für die Bestrahlungsexperimente werden die Übergangsmetalle Titan und Molybdän (99,9 % rein, Probengröße: 10 x 10 mm^2) als Targetmaterial verwendet. Zusätzlich erfolgt eine optische Politur der Probenoberfläche. In Tabelle 1 sind die Versuchsbedingungen hinsichtlich Sauerstoffionenimplantation und thermischer Nachbehandlung aufgeführt.

Parameter		
Ionenenergie:	0,5 ... 1,5	MeV
Ionenstromdichte:	> 20	$\mu A/cm^2$
Ionenfluenzen:	10^{16} ... $2{,}5 \times 10^{18}$	O^+/cm^2
Implantations-temperatur:	-150 ... +1000	°C
Thermische Nachbehandlung:	300 ... 1000	°C
Dauer thermische Nachbehandlung:	0,5 ... 4	h

Tab. 1: Versuchsbedingungen während und nach der Sauerstoffionenimplantation

Eine ex-situ-Charakterisierung der implantierten Targets erfolgt u. a. mittels RBS, XRD, TEM und Ellipsometrie.

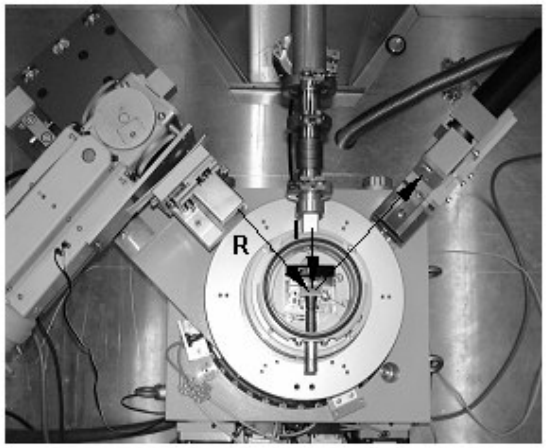


Abb. 1: Aufsicht auf den experimentellen Aufbau der Hochtemperatur-Implantationskammer mit Röntgenröhre (links), Detektor (rechts) und Probe (Mitte), Röntgenstrahl- (R) und Ionenstrahlrichtung (I).

Im Rahmen von Vorarbeiten wurde bereits die Bildung von Oxiden in Titan und Molybdän untersucht /1, 2, 3/. Im Ergebnis dieser Untersuchungen konnte festgestellt werden, dass es grundsätzlich möglich ist, vergrabene, transparente Oxidschichten in Übergangsmetallen zu synthetisieren. Allerdings konnten bei den Ionenimplantationsexperimenten, mit Ionenenergien bis 180 keV, die vergrabenen Schichten nur unmittelbar unter der Oberfläche deponiert werden (ca. 100 nm). Die vergrabene Schicht selbst kann nur mit Schichtdicken bis 100 nm hergestellt werden und die Rekristallisation der defektreichen Deckschicht ist nur unvollständig. Zudem wurden bisher ausschließlich ex-situ-Experimente durchgeführt.
Eine in-situ-Charakterisierung der Phasenbildung und Transformation mittels Röntgendiffraktometrie und Vierpunkt-Widerstandsmessung während der Implantation ist vorteilhaft, da beispielsweise dynamische Prozesse während der Implantation in einem weiten Parameterbereich erfasst werden können und die Phasenbildung ohne Unterbrechung untersucht werden kann.

/1/ C. Hammerl, B. Renner, B. Rauschenbach, W. Assmann, Nucl. Intr. Meth. B **148** (1999) 851.

/2/ B. Renner, C. Hammerl, B. Rauschenbach, Nucl. Intr. Meth. B **160** (2000) 363.

/3/ C. Hammerl, B. Rauschenbach, Nucl. Intr. Meth. B **178** (2001) 220.

Oberflächenbehandlung von Titanwerkstoffen für biomedizinische Implantate

S. Mändl, W. Assmann*, R. Sader**, J. K. Gregory***, B. Rauschenbach

* Sektion Physik, Beschleunigerlabor, Ludwig-Maximilliams-Universität München, 85748 Garching
** Klinik und Poliklinik für Mund-Kiefer-Gesichtschirurgie, Klinikum rechts der Isar, Technische Universität München, 81644 München
*** Lehrstuhl für Werkstoffe im Maschinenbau, Technische Universität München, 85747 Garching

Medizinische Implantate zur Frakturversorgung bestehen zur Zeit vorwiegend aus Titan, das sich neben der geringen Dichte durch eine gute Biokompatibilität auszeichnet. Dies beruht auf einer dünnen Oberflächenoxidschicht, die jedoch bei Relativbewegungen zwischen Implantat und Gewebe sehr schnell zerstört wird. Durch Plasma-Immersions-Ionenimplantation (PIII) kann eine dickere Oxidschicht erzeugt werden, deren Eigenschaften und Eignung für biomedizinische Implantate charakterisiert wurde.

Polierte Flachproben aus Reintitan (Grade 2) wurden mit verschiedenen Parametern behandelt, um eine umfassende Probencharakterisierung durchzuführen. Anschließend wurden kurze Stäbe für Untersuchungen zur Biokompatibilität sowie Flachzugproben zur Bestimmung der mechanischen Eigenschaften bei drei Temperaturen – 200, 400 und 550 °C – mit Sauerstoff-PIII behandelt.

Die Untersuchung der Tiefenprofile mit elastischer Rückstoßanalyse (ERDA) ergab zwei konkurrierende Diffusionsprozesse. Bei tieferen Temperaturen dominiert das Wachstum einer geschlossenen TiO_2-Schicht (Aktivierungsenerge $E_{a1} = 0{,}5$ eV), während bei höheren Temperaturen sehr breite Übergangszonen zwischen Titan und dem Oberflächenoxid aufgrund von Sauerstoffdiffusion in Titan beobachtet werden ($E_{a2} = 0{,}85$ eV).

Die Phasenanalyse mit Ramanspektroskopie zeigt, dass nur Moden der Hochtemperaturphase Rutil in allen Proben bis hinab zu 200 °C vorhanden sind, während andere Phasen wie Anatas oder Brookit nicht nachzuweisen waren. Außer den Raman-Linien erster Ordnung sind weitere Strukturen beobachtbar, die mit Prozessen zweiter Ordnung oder einer endlichen Kristallitgröße verbunden sind. Bei diesen Moden ist ein enger Zusammenhang mit den Prozessparametern vorhanden /1/.

Abb. 1: Schematische Darstellung der Positionen der zu behandelnden Osteosyntheseplatten am menschlichen Schädel.

Die PIII-Behandlung hat kaum einen Einfluss auf die mechanischen Kennwerte. Unabhängig von der Behandlungstemperatur wurden im Rahmen der Fehlergrenzen die gleichen Dehngrenzen und Zugfestigkeiten wie für die unbehandelten Proben gefunden. Bei den verwendeten Temperaturen findet weder Kornwachstum noch Rekristallisation statt. Außerdem sind die Einwirktiefen auf einige Mikrometer beschränkt.

Bei der mechanischen Überprüfung der Osseointegration über einen Pull-out-Test im Tierversuch konnte eine deutliche Verbesserung der biomechanischen Eigenschaften nach der PIII festgestellt werden. Es ist zwar kein ganz einheitliches Verhalten der Scherspannung zu erkennen, jedoch überzeugen die konstant guten Schertrennfestigkeiten bei den behandelten Proben.

Neben den biomechanischen Tests wurden zur Biokompatibilitätsbewertung histologisch und fluoreszensmikroskopisch das Ausmass der Knochenneubildung und -anlagerung nach 3 Monaten bewertet /2/. Nach PIII-Behandlung von Reintitan kommt es zu einer geringen Erhöhung der Osseointegration, während bei voranodisiertem Titan eine deutliche Erhöhung beobachtet wurde.

Insgesamt konnte eine Verbesserung der Biokompatibilität unter Beibehaltung der mechanischen Volumeneigenschaften nach Sauerstoff-PIII festgestellt werden. Die Proben überzeugen durch eine ausgezeichnete Adhäsion.

/1/ S. Mändl, G. Thorwarth, M. Schreck, B. Stritzker, B. Rauschenbach, *Raman study of titanium oxide layers produced with plasma immersion ion implantation*, Surf. Coat. Technol. **125** (2000) 84.

/2/ S. Mändl, D. Krause, G. Thorwarth, R. Sader, F. Zeilhofer, H. H. Horch, B. Rauschenbach, *PIII Treatment of Medical Implants*, Surf. Coat. Technol. **142/144** (2001) 1046.

Elektrochrome Schichtsysteme für die Modulation der Wärmestrahlung metallischer Ober flächen

E. Schubert, H. Neumann, C. L. Trimble*, M. Schubert*, J. A. Woollam*

* University of Nebraska-Lincoln, Center for Microelectronic and Optical Materials Research, and Department of Electrical Engineering, NE 68588-0511 Lincoln, U.S.A.

Elektrochromismus ist die reversible Änderung der optischen Eigenschaften (Brechungsindex, Absorptionskoeffizient) eines Materials durch den elektrisch getriebenen Ein- bzw. Ausbau kleiner Ionen (H^+, Alkaliionen) nach Anlegen bzw. Umpolung einer Spannung (ca. ± 2 V).

Elektrochrome Schichtsysteme können zur Emissionsmodulation von Metalloberflächen benutzt werden, wobei zwischen einem Zustand hoher und niedriger Wärmeabstrahlung geschaltet wird. Solche Systeme können zum Beispiel für die Regulierung der internen Wärmebilanzen von Satelliten eingesetzt werden. Die Arbeitstemperatur von Satelliten soll auf ca. 300 K eingestellt werden. Die spektrale Emissionverteilung für diese Temperatur liegt bei Wellenlängen zwischen 2 µm und 40 µm mit dem Strahlungsmaximum bei 10 µm. In diesem Spektralbereich muß ein elektrochromes Schichtsystem für die 300 K-Emissionsmodulation schaltbar sein.

Der schematische Aufbau eines elektrochromen Schichtsystems für die Emissionsmodulation ist in Abb. 1 dargestellt. Zwischen zwei Elektroden (Metallgitter) befinden sich in Reihenfolge ein elektrochromes Material (polykristallines WO_3), ein Ionenleiter (Ta_2O_5) und eine Ionenlagerschicht (amorphes WO_3). Beim Anlegen bzw. Umpolen einer Spannung werden die vorher elekrochemisch in den Schichtstapel eingebauten Li^+-Ionen zwischen der Ionenlagerschicht und der elektrochromen Schicht hin und her bewegt. Befinden sich die Li^+ in der elektrochromen Schicht, ist das System im Zustand niedriger Oberflächenemission. Beim Einbau der Li^+ in die Ionenlagerschicht besitzt das System eine hohe Oberflächenemission /1/.

Abb. 2 zeigt ein Beispiel für die spektrale Emissionsmodulation eines elektrochromen Schichtsystems. Die scharfe Resonanz bei ca. 10 µm entsteht durch die Überlagerung der Gitterabsorptionen der einzelnen Oxidschichten. Die anderen Strukturen sind Schichtdickeninterferenzen zuzuordnen. Das Schaltverhalten des elektrochromen Schichtsystems wird durch die Änderung der Oberflächenemissivität $\Delta\varepsilon$ beschrieben. Die Emissivität ergibt sich dabei aus der Integration über das gemessene spektrale Emissionsspektrum normiert auf das integrierte Emissionsspektrum des 300 K-Schwarzkörperstrahlers. Für das Beispiel in Abb. 2 beträgt die prozentuale Änderung der Oberflächenemissivität $\Delta\varepsilon$ = 18 % /2/.

Eine Erhöhung der Emissionsmodulation kann durch das Aufbringen von Deckschichten z. B. ZnSe oder MgF_2 erreicht werden /3/. Neben der Verbesserung der optischen Eigenschaften des elektrochromen Schichtsystems dienen die Deckschichten auch zum Schutz vor Materialzerstörung und verhindern Ausdiffusion und chemische Reaktion der Li^+-Ionen.

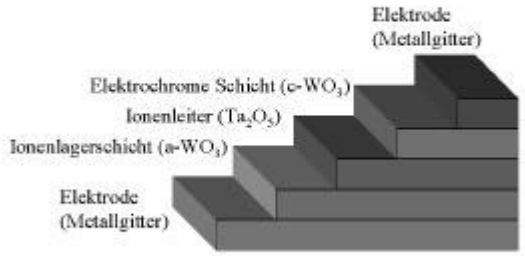


Abb. 1: Schematische Darstellung (Schnitt) der Lagenstruktur eines elektrochromen Schichtsystems für die Emissionssmodulation metallischer Oberflächen.

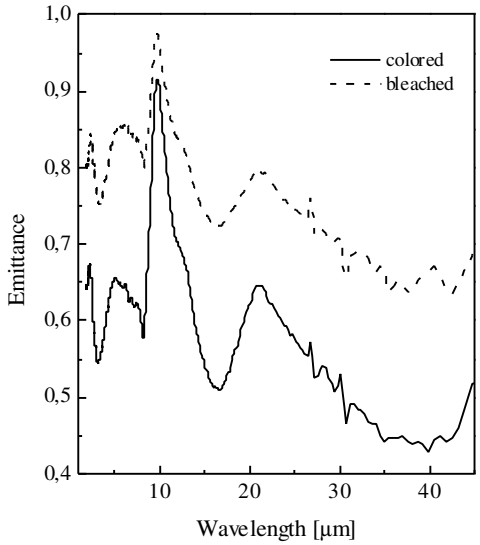


Abb. 2: Emissionsmodulation eines elektrochromen Schichtsystems. Die Emissivitätsmodulation beträgt 18 %

/1/ E. Franke, C. L. Trimble, M. Schubert, J. A. Woollam, J. S. Hale, *All-solid-state electrochromic reflectance device for emittance modulation in the far-infrared spectral region*, Appl. Phys. Lett. **77** (2000) 930.

/2/ E. Franke, C. L. Trimble, J. S. Hale, M. Schubert, J. A. Woollam, *Infrared switching electrochromic devices based on tungsten oxide*, J. Appl. Phys. **88** (2000) 5777.

/3/ E. Franke, H. Neumann, M. Schubert, C. L. Trimble, L. Yan, J. A. Woollam, *Low-orbit-environment protective coatings for all-solid-state electrochromic surface heat radiation control devices*, Surf. Coat. Techn. 2001, im Druck.

VERÖFFENTLICHUNGEN UND WISSENSCHAFTSBEZIEHUNGEN

- VERÖFFENTLICHUNGEN
- KOLLOQUIEN AM IOM
- VORTRÄGE/POSTER
- BEARBEITETE PROJEKTE
- PATENTE
- FÖRDERUNG/QUALIFIZIERUNG
- SONSTIGES

Veröffentlichungen

S. Albrecht, K.-H. Hallmeier, G. Lippold, G. Wendt, *V_2O_5-ZrO_2 Catalysts for the Oxidative Dehydrogenation of Propane - Influence of Niobium Doping*, Erdöl, Erdgas, Kohle **116** (2000) 31.

F. Bauer, H. Ernst, U. Decker, M. Findeisen, H.-J. Gläsel, H. Langguth, E. Hartmann, R. Mehnert, *Preparation of scratch and abrasion resistant polymeric nanocomposites by monomer grafting onto nanoparticles Part I. FTIR and multi-nuclear NMR spectroscopy to the characterization of methacryl grafting*, Macromol. Chem. Phys. **201** (2000) 2654.

H. Biederman, V. Stuncia, D. Slavinska, M. Zeuner, J. Glosik, *Characterisation of an unbalanced magnetron for composite film (metal / C:H) deposition*, Vacuum **51** (2000) 417.

G. Böhm, W. Frank, A. Schindler, *Radical Jet Etching (RJE) – a New Tool for High Rate Figuring of Optical Surfaces*, OSA Technical Digest (Optical Society of America, Washington DC, 2000) 23.

W. Bondzio, J. Meinhardt, J. Kickelhain, R. Mehnert, *Einfluss von Oberflächenmodifizierungen auf den Haftmechanismus flexibler Schaltungsträger*, Abstracts of the lecture group "Materials Technology and Testing", ACHEMA 2000 48 (2000)

W. Bondzio, J. Meinhardt, J. Kickelhain, R. Mehnert, *Probleme bei der Auswahl von Polyimidfolien für die Metallisierung*, 8. Neues Dresdner Vakuumtechnisches Kolloquium, Institut für Polymerforschung Dresden e. V., Tagungsband (2000) 13.

R. Böttcher, C. Klimm, D. Michel, H.-C. Semmelhack, G. Völkel, H.-J. Gläsel, E. Hartmann, *Size effect in Mn^{2+}-doped $BaTiO_3$ nanopowders observed by electron paramagnetic resonance*, Phys. Rev. B **62** (2000) 2085.

A. Braun, K. Zimmer, F. Bigl, *Combination of contour and half-tone masks used in laser ablation*, Applied Surface Science **168** (2000) 178.

E. Dayss, G. Leps, J. Meinhardt, *Oberflächenmodifizierung von Polypropylen zur Metallisierung*, Journal für Oberflächentechnik, JOT 11 II-V (2000).

E. Dayss, J. Meinhardt, G. Leps, H.-G. Struck, *Plasmamodifizierung von Silikonimplantaten*, 8. Neues Dresdner Vakuumtechnisches Kolloquium, Institut für Polymerforschung Dresden e. V., Tagungsband (2000) 153.

R. Deltschew, *Oberflächencharakterisierung plasmabehandelter Sn-Pb-Legierung*, Reflowlöten elektronischer Baugruppen **3** (2000) 85.

R. Deltschew, M. Tartz, S. Jankuhn, E. Hartmann, H. Neumann, *Redeposition of sputtered material on ion thruster grids*, Proc. 36th Joint Propuls. Conf., AIAA-Paper, Huntsville, 17.-19.07. 2000-3666 (2000).

Y. Dietzel, W. Przyborowski, G. Nocke, P. Offermann, F. Hollstein, J. Meinhardt, *Investigation of PVD arc coatings on polyamide fabrics*, Surface and Coatings Technology **135** (2000) 75.

Y. Dietzel, W. Przyborobski, G. Nocke, P. Offermann, J. Meinhardt, F. Hollstein, *Verfahrenseinflüsse auf die chemische Zusammensetzung PVD-metallisierter Oberflächen textiler Flächengebilde*, 8. Neues Dresdner Vakuumtechnisches Kolloquium, Institut für Polymerforschung Dresden e. V., Tagungsband (2000) 37.

D. Flamm, A. Schindler, T. Harzendorf, E.-B. Kley, *Fabrication of microlens arrays in CaF_2 by ion milling*, Proc. SPIE **4179** (2000) 108.

E. Franke, C. L. Trimble, J. S. Halle, M. Schubert, J. A. Wollam, *Solid state electrochromic reflectance device for emittance modulation in the infrared spectral region*, Appl. Phys. Lett. **77** (2000) 930.

E. Franke, M. Schubert, C. L. Trimble, M. J. DeVries, J. A. Woollam, F. Frost, *Dielectric function of amorphous tantalum oxide from the far infrared to the deep ultraviolet spectral region measured by spectroscopic ellipsometry*, J. Appl. Phys. **88** (2000) 5166.

E. Franke, M. Schubert, C. L. Trimble, J. S. Hale, J. A. Woollam, *Electrochromic Devices for thermal emittance modulation*, J. Appl. Phys. **88** (2000).

E. Franke, M. Schubert, J. A. Woollam, J.-D. Hecht, G. Wagner, H. Neumann, F. Bigl, *In situ ellipsometry growth characterization of dual ion beam deposited boron nitride thin films*, J. Appl. Phys. **87** (2000) 2593.

F. Frost, G. Lippold, A. Schindler, F. Bigl, *Morphological, structural and electronic damage on InAs and InSb surfaces induced by (reactive) ion beam etching*, Defect and Diffusion Forum **183-185** (2000) 127.

F. Frost, A. Schindler, F. Bigl, *Roughness Evolution of Ion Sputtered Rotating InP Surfaces: Pattern Formation and Scaling Laws*, Phys. Rev. Lett. **85** (2000) 4116.

R. K. Gebhardt, A. B. Preobrajenski, T. Chassé, *Core and valence-level photoemission study of the InP(001)-(2X1)S surface: Surface structure and electronic states*, Physical Review B **61** (2000) 9997.

J. Geimer, K. Hildenbrand, S. Naumov, D. Beckert, *Radicals formed by electron transfer from cytosine and 1-methylcytosine to the triplet state of anthraquinone-2,6-disulfonic acid. A Fourier-transform EPR study*, Phys. Chem. Chem. Phys. **2** (2000) 4199.

J. W. Gerlach, R. Schwertberger, D. Schrupp, B. Rauschenbach, H. Neumann, M. Zeuner, *Texture and epitaxy by ion beam assisted deposition*

of gallium nitride, Surface and Coatings Technology **128-129** (2000) 286.

H.-J. Gläsel, F. Bauer, H. Ernst, M. Findeisen, E. Hartmann, H. Langguth, R. Mehnert, R. Schubert, *Preparation of scratch and abrasion resistant polymeric nanocomposites by monomer grafting onto nanoparticles. Part II. Characterization of radiation-cured polymeric nanocomposites*, Macromol. Chem. Phys. **201** (2000) 2765.

H.-J. Gläsel, E. Hartmann, H. Langguth, R. Mehnert, *Kratz- und abriebfeste polymere Nanokomposit-Beschichtungen*, Reihe: Moderne Beschichtungstechnologie – Nanoschichten, Coating **2** (2000) 42.

H.-J. Gläsel, E. Hartmann, R. Mehnert, B. Schwarz, H. Haller, *Untersuchungen der Kratz- u. Abriebfestigkeit von polymeren Nanokomposit-Beschichtungen auf Möbeldekorpapieren*, Holz- und Kunststoffverarbeitung (2000) 112.

C. Hammerl, C. Kaupp, B. Rauschenbach, *Study of phase formation of high fluence oxygen ion-implanted titanium and molybdenum by means of in situ electrical resistance measurements*, Surface and Coatings Technology **128-129** (2000) 370.

R. Hermann, G. R. Dey, S. Naumov, O. Brede, *Thiol radical cations and thiyl radicals as direct products of the free electron transfer from aromatic thiols to n-butyl chloride radical cations*, Phys. Chem. Chem. Phys. **2** (2000) 1213.

R. Hermann, S. Naumov, O. Brede, *Electron transfer from phenolic compounds to parent n-butyl chloride radical cation - a quantum chemical study of product transient formation and stability*, J. Molec. Structure (Teochem) **532** (2000) 69.

R. Hermann, S. Naumov, G. R. Mahalaxmi, O. Brede, *Stability of phenol and thiophenol radical cations-interpretation by comparative quantum chemical approaches*, Chem. Phys. Lett. **324** (2000) 265.

J. Keckes, J. W. Gerlach, B. Rauschenbach, *Residual stresses in cubic and hexagonal GaN grown on sapphire using ion beam-assisted deposition*, Journal of Crystal Growth **219** (2000) 1-9.

G. Keller, U. Rüde, L. Stals, S. Mändl, B. Rauschenbach, *Simulation of trench homogeneity in plasma immersion ion implantation*, J. Appl. Phys. **88** (2000) 1111.

W. Knolle, U. Müller, R. Mehnert, *Radiation-induced reactions of benzoyl chloride and acrylates in solution. A pulse radiolysis study*, Phys. Chem. Chem. Phys. **2** (2000) 1425.

G. Köller, M. Möder, K. Czihal, *Peroxidative degradation of selected PCB: a mechanistic study*, Pergamon, Chemosphere **41** (2000) 1827.

I. Konovalov, O. Tober, M. Winkler, K. Otte, *Electrical properties of Cu-In-S absorber prepared on Cu tape (CISCuT),* Solar Energy Mat. & Solar Cells **67** (2001) 49.

J. Kovác, D. Pudis, A. Satka, L. János, J. Jakabovic, R. Schwabe, V. Gottschalch, G. Benndorf, *Type-I and type-II transitions in electroluminescence spectra of GaAs/AlAs monolayer multiquantum-well structures*, Material Science & Engineering (3th Int. Conf. on low Dimensional Structures and Devices, Antalya, Turkey, 15.-17. Sept. 1999 (2000).

G. G. Kuhnle, D. Haferburg, M. Grunow, D. Hirsch, U. Hahn, *Nano-electrospray mass spectrometry with a modified commercial IonSpray source*, Rapid Communications in Mass Spectrometry **14** (2000) 1307.

H. Langguth, G. Mark, H. Mätzing, H.-R. Paur, L. Prager, J. Schubert, M. N. Schuchmann, C. von Sonntag, *The degradation of BTEX aromatics by electron beam treatment of stripair in ground water remediation*, Proc. ConSoil 2000, 7th Int. FZK/TNO Conf. On Contaminated Soil, 18-22. Sept. 2000, Leipzig **2** (2000) 1323.

A. P. Lima, C. R. Miskys, U. Karrer, O. Ambacher, A. Wenzel, B. Rauschenbach, M. Stutzmann, *Growth of quaternary AlInGa/GaN heterostructures by plasma - induced molecular beam epitaxy*, Journal of Crystal Growth **220** (2000) 341.

S. Mändl, R. Günzel, E. Richter, W. Möller, B. Rauschenbach, *Annealing behaviour of nitrogen implanted stainless steel*, Surface and Coatings Technology **128-129** (2000) 423.

S. Mändl, B. Rauschenbach, *Anisotropic strain in nitrided austenitic stainless steel*, J. Appl. Phys. **88** (2000) 3323.

S. Mändl, B. Rauschenbach, *Plasma-Immersions-Ionenimplantation: Ein neues Verfahren zur homogenen Oberflächenmodifizierung komplex geformter medizinischer Implantate*, Biomedizinische Technik **45** (2000) 193.

S. Mändl, G. Thorwarth, B. Rauschenbach, *Textured titanium oxide thin films produced by vacuum arc deposition*, Surface and Coatings Technology **133-134** (2000) 283.

G. R. Mahalaxmi, R. Hermann, S. Naumov, O. Brede, *Free electron transfer from several phenols to radical cations of non-polar solvents*, Phys. Chem. Chem. Phys. **2** (2000) 4947.

D. Manova, P. Huber, S. Mändl, B. Rauschenbach, *Surface modification of aluminium by plasma immersion ion implantation*, Surface and Coatings Technology **128-129** (2000) 249.

R. Mehnert, *Warum strahlenhärtende Lacke?,* besser lackieren! **2** (2000) 6.

R. Mehnert, S. Naumov, W. Knolle, I. Janovský, *Radical formation in electron-irradiated acrylates:*

studied by pulse radiolysis and electron paramagnetic resonance, Macromol. Chem. Phys. **201** (2000) 2447.

J. Meinhardt, S. Howitz, *Modifizierung von Mikroporenarrays für die Biotechnologie*, 8. Neues Dresdner Vakuumtechnisches Kolloquium, Institut für Polymerforschung Dresden e. V., Tagungsband (2000) 158.

S. Naumov, A. Barthel, J. Reinhold, F. Dietz, J. Geimer, D. Beckert, *Calculation of spin densities of radicals of pyrimidine-type bases by density functional theory. Influence of solvent and comparison with EPR results*, Phys. Chem. Chem. Phys. **2** (2000) 4207.

B. Ocker, M. Scherer, T. Chassé, B. Rauschenbach, W. Frank, F. Frost, A. Schindler, D. Hirsch, G. Otto, H. Neumann, M. Haidl, S. Müllender, G. Wagner, M. Lorenz, M. Zeuner, *A Candidate for Next Generation Lithography: EUV*, Proximity (2000) 32.

B. Ocker, M. Scherer, T. Chassé, B. Rauschenbach, W. Frank, F. Frost, A. Schindler, D. Hirsch, G. Otto, H. Neumann, M. Haidl, S. Müllender, G. Wagner, M. Lorenz, M. Zeuner, *A Candidate for Next Generation Lithography: EUV*, Chip (2000) 30.

K. Otte, G. Lippold, D. Hirsch, A. Schindler, F. Bigl, *XPS and Raman investigations of nitrogen ion etching for depth profiling of $CuInSe_2$ and $CuGaSe_2$*, Thin Solid Films **361-362** (2000) 498.

K. Otte, G. Lippold, D. Hirsch, A. Schindler, M. V. Yakushev, R. W. Martin, F. Bigl, *Surface cleaning of $Cu(In,Ga)Se_2$ by low energy hydrogen ion beam implantation*, Proc. of 16th European Solar Energy Conference, 1-5 May 2000, Glasgow, UK 915-918.

L. Prager, *UV-light initiated purification of CHC-contaminated exhaust gases from ground water remediation plants, and subsequent technological steps*, Proc. ConSoil 2000, 7th Int. FZK/TNO Conf. On Contaminated Soil, 18-22 Sept. 2000, Leipzig **2** (2000) 1321.

L. Prager, E. Hartmann, *Decomposition of chlorinated ethylenes in exhaust gases from ground water remediation by direct 222 nm UV irradiation, alkaline scrubbing and subsequent thermal treatment of the charged scrubber solution*, Proc. CUTEC Serial Publication, ed.: Vogelpohl, A. Kragert B 46 (2000).

A. B. Preobrajenski, K. Barucki, T. Chassé, *Exploiting the Difference in Lattice Structures for Formation of Self-Assembled PbS Dots on InP(110),* Phys. Rev. Lett. **85** (2000) 4337.

A. B. Preobrajenski, T. Chassé, *Atomic and electronic structure of epitaxial PbS on InP(110) and InP(001)*, Appl. Surf. Science **166** (2000) 201.

A. B. Preobrajenski, S. Schömann, R. K. Gebhardt, T. Chassè, *Passivation of the Ge/InP(110)interface by As interlayers: Interface reactions and band offsets*, J. Vac. Technol. B **18** (2000) 1973.

B. Rauschenbach, *Ion assisted deposition of thin layers*, Advances in Solid State Physics, Ed. B. Kramer, Vieweg & Sohn Braunschweig **40** (2000) 439.

B. Rauschenbach, *Ion implantation, isolation and thermal processing of GaN and related materials*, III-Nitride Semiconductors: Electrical, Structural and Deffects Properties 193-249 (2000).

B. Rauschenbach, J. W. Gerlach, *Texture Development in Titanium Nitride Films Grown by Low-Energy Ion Assisted Deposition*, Cryst. Res. Technol. **35** (2000) 675.

St. Rudschuck, D. Hirsch, K. Zimmer, K. Otte, A. Braun, R. Mehnert, F. Bigl, *Replication of 3D-mircro- and nanostructures using different UV-curable polymers*, Microelectronic Engineering **53** (2000) 557.

T. Scherzer, U. Decker, *The effect of temperature on the kinetics of diacrylate photopolymerizations studied by real-time FTIR-ATR spectroscopy*, Polymer **41** (2000) 7681.

A. Schindler, G. Böhm, W. Frank, T. Hänsel, A. Nickel, F. Bigl, *Advanced Technology for Deep Precision Aspheres Fabrication with High Convergence – Demonstration of the Processing Cycle,* OSA Technical Digest (Optical Society of America, Washington DC, 2000) 20.

A. Schindler, T. Hänsel, M. Zeuner, G. Seidenkranz, *Ion Beam Figuring and Ion Beam Polishing Production Tools – Processing Technology Included – for Customized Solutions,* OSA Technical Digest (Optical Society of America, Washington DC, 2000) 135.

M. N. Schuchmann, H. P. Schuchmann, W. Knolle, J. von Sonntag, S. Naumov, W. F. Wang, C. von Sonntag, *Free-radical chemistry of thiourea in aqueous solution, induced by OH radical, atom, alpha-hydroxylalkyl radicals, photoexcited malemide, and the solvated electron*, Nukleonika **45** (2000) 55.

H. Sprinz, J. Schwinn, S. Naumov, O. Brede, *Mechanism of thiyl radical-catalyzed isomerization of unsaturated fatty acid residues in homogenous solution and in liposomes*, Biochimica et Biophysica Acta (BBA) **1483** (2000) 91-100.

M. Tartz, R. Deltschew, E. Hartmann, H. Neumann, *Effect of the plasma inhomogeneity on grid performance*, Surf. Coat. Technol. **142-144** (2001) 34.

M. Tartz, E. Hartmann, R. Deltschew, H. Neumann, *Approximation of the plasma inhomogenity by broad beam measurements and simulation*, Rev. Sci. Instrum. **71** (2000) 678.

M. Tartz, E. Hartmann, R. Deltschew, H. Neumann, *Broad beam modelling and experiments for electric spacecraft propulsion*, Rev. Sci. Instrum. **71** (2000) 732.

M. Tartz, E. Hartmann, R. Deltschew, H. Neumann, *Effect of the plasma inhomogeneity on grid performance*, Proc. 36th Joint Prupuls. Conf., Huntsville, 17.-19.07.2000, AIAA-Paper 2000-3665.

A. Tauber, T. Scherzer, R. Mehnert, *UV curing of aqueous polyurethane acrylate dispersions. A. comparative study by real-time FTIR spectroscopy and pilot scale curing*, J. Coat. Techn. **72** (2000) 51.

G. Thorwarth, S. Mändl, B. Rauschenbach, *Plasma immersion ion implantation using titanium and oxygen ions*, Surface and Coatings Technology **128-129** (2000) 116.

C. L. Trimble, E. Franke, J. S. Hale, J. A. Woollam, *Electrochromic emittance modulation devices for spacecraft thermal control*, AIP Conf. Proc. **504** (2000) 797.

J. von Sonntag, *Kinetische Untersuchungen zur Photochemie des Maleimids und seiner Derivate. Beiträge zum Mechanismus selbstinitiierter radikalischer Polymerisationen*, Dissertation, Universität Leipzig, Fak. Chemie u. Mineralogie (2000).

J. von Sonntag, W. Knolle, *Maleimides as electron-transfer photoinitiators: quantum yields of triplet states and radical-ion formation*, Photochem. Photobiol. A: Chem. **136** (2000) 133.

J. von Sonntag, W. Knolle, *A simple fully automated sample flow system and a combined trigger /energy-monitoring system for laser flash photolysis*, Photochem. Photobiol. A: Chem. **132** (2000) 25.

G. Wagner, U. Lange, K. Bente, J. Lenzer, M. Lorenz, *Structural properties of thin Zn0.62Cu0.19In0.19S alloy films grown on Si(111) substrates by pulsed laser deposition*, Thin Solid Films **358** (2000) 80.

M. Winkler, O. Tober, J. Penndorf, K. Szulzewsky, D. Röser, G. Lippold, K. Otte, *Phase constitution and element distribution in Cu-In-S based absorber layers grown by the CISCuT-Process*, Thin Solid Films **361-362** (2000) 273.

K. Zimmer, A. Braun, F. Bigl, *Combination of different processing methods for the fabrication of 3D-polymer structures by ecximer laser machining*, Appl. Surf. Sci. **154-155** (2000) 601.

T. Arnold, G. Böhm, A. Schindler, *Ultra-high rate plasma jet chemical etching of silicon*, J. Vac. Sci. Technol. A **19** (2001) 2586.

L. Aschke, F. Schubert, J. Kegeler, A. Schindler, T. Hänsel, K. Knapp, *Flatness Correction of NZTE Mask Blank Substrates*, Proc. of SPIE **4343** (2001) 646.

W. Attenberger, G. Thorwarth, D. Manova, S. Mändl, B. Stritzker, B. Rauschenbach, *Interface Properties of TiO2 on Si Formed by Simultaneous Implantation and Deposition of Titanium and Oxygen Ions*, Surface and Coatings Technology **142** (2001) 412.

F. Bauer, W.-H. Chen, Q. Zhao, A. Freyer, S.-B. Liu, *Improvement of coke-induced selectivation of H-ZSM-5 during xylene isomerization*, Microporous and Mesoporous Materials **47** (2001) 67.

F. Bauer, A. Freyer, *Use of coke-selectivated H-ZSM-5 in xylene isomerization*, Stud. Surf. Sci. Catal. **135** (2001) 307.

F. Bauer, A. Freyer, H. Ernst, H.-J. Gläsel, R. Mehnert, *Application of temperature-programmed oxidation, multinuclear MAS NMR and DRIFT spectroscopy to the surface characterization of modified silica nanoparticles*, Appl. Surf. Sci. **179** (2001) 118.

D. Beckert, J. M. Lü, S. Naumov, J. Geimer, *A fourier transform EPR study of vracil and thymine radical anions in aqueous solution*, Phys. Chem. Chem. Phys. **3** (2001) 952.

G. Blasek, U. Kestler, H. U. Poll, S. Schreiter, R. Mehnert, R. Mix, *Oberflächenglättung mittels Plasmapolymerisation*, Konferenzband, 9. NDVaK, Dresden, 18.-19.10.2001 (2001) 94.

O. Brede, G. R. Mahalaxmi, S. Naumov, W. Naumann, R. Hermann, *Localized electron transfer in non-polar solution: reaction of phenols and thiophenols with free solvent radical cations*, J. Phys. Chem. A **105** (2001) 3757.

O. Brede, J. Schwinn, S. Leistner, S. Naumov, H. Sprinz, *Reactivity and selectivity of reactions of small radicals with multifunctional heterocyclic molecule: 3-(Mercaptoethyl)chinazoline-2,4-(1H,3H)dione*, J. Phys. Chem. A **105** (2001) 119.

P. Crimmann, G. Leps, J. Meinhardt, J. Adhikari, *Oberflächenmodifizierung von Polypropylen zur Metallisierung mit Kupfer*, Tagungsband 9. Neues Dresdner Vakuumtechnisches Kolloquium, Dresden, (2001) 159.

E. Dayss, G. Leps, J. Meinhardt, H.-G. Struck, *Plasmamodifizierung von Silikonimplantaten*, Tagungsband ISBN: 3-00-007466-X, BFPT Greifswald, (2001) 52.

E. Dayss, G. Leps, J. Meinhardt, A. Wutzler, *Charakterisierung von plasmamodifizierten Polymeroberflächen*, Proc. II. Oberflächentechnisches Kolloquium Oberflächentechnik, Merseburg, Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg, ISBN 3-86010-620-1 (2001) 9.

R. Deltschew, D. Hirsch, H. Neumann, T. Herzog, K. J. Wolter, M. Nowottnick, K. Wittke, *Plasma treatment for fluxless soldering*, Surface and Coatings Technology **142-144** (2001) 803.

R. Deltschew, M. Tartz, V. Plicht, E. Hartmann, H. Neumann, H. J. Leiter, J. Esch, *Sputter Characteristics of Carbon-Carbon Compound Material*, 27th International Electric Propulsion Conference Pasadena, CA, 15-19 October, 2001, Paper IEPC-01-118 (2001).

R. Deltschew, M. Tartz, V. Plicht, E. Hartmann, H. Neumann, H. J. Leiter, J. Esch, *Sputter yield measurements of graphite and carbon-carbon material for ion thruster grids*, 37th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference, Salt Lake City, Utah 8-11.07.2001, Paper AIAA-2001-3493 (2001).

J. Dienelt, K. Zimmer, B. Rauschenbach, *Etching behaviour of GaAs with chlorine chemically assisted ion beam etching depending on the surface temperature*, GaAs 2001 Conference Proceedings, The 9th European Gallium Arsenide and other semiconductors Application Symposium, London 2001, published by Microwave Engineering Europe, CMP Europe ltd. 9-12 (2001).

D. Flamm, F. Frost, D. Hirsch, *Evolution of surface topography of fused silica by ion beam sputtering*, Applied Surface Science **179** (2001) 96.

E. Franke, M. Schubert, C. L. Trimble, M. J. DeVries, J. A. Woollam, *Optical properties of amorphous and polycrystalline tantalum oxide thin films measured by spectroscopic ellipsometry from 0.03 to 8.5 eV*, Thin Solid Films **388** (2001) 283.

F. Frost, D. Hirsch, A. Schindler, *Evaluation of AFM tips using nanometer-sized structures induced by ion sputtering*, Applied Surface Science **179** (2001) 8.

F. Frost, D. Hirsch, A. Schindler, B. Rauschenbach, *AFM tip calibration using nanometer-sized structures induced by ion beam sputtering,* Proc. SPIE **4449** (2001) 225.

J. W. Gerlach, R. Schwertberger, D. Schrupp, S. Sienz, W. Attenberger, B. Rauschenbach, *Influence of the Ion Irradiation during Low-Energy Nitrogen Ion Assisted Deposition of Wurtzitic Gallium Nitride Films on Sapphire*, IPAP Conf. Series **1** (2001) 202.

H.-J. Gläsel, F. Bauer, E. Hartmann, H. Langguth, R. Mehnert, *Nanomodified polymeric coatings of enhanced physical and chemical surface properties*, Proc. 2nd Europ. Cong. Adhes. Seal., Nürnberg 2001 (2001) 483.

C. Hammerl, B. Rauschenbach, *Synthesis ob buried metal oxide films by high fluence oxygen ion implantation into metals*, Nuclear Instuments and Methods in Physics Research **178** (2001) 220.

T. Hänsel, A. Nickel, A. Schindler, *Stitching interferometry of aspherical surfaces,* Proc. SPIE **4449** (2001) 265.

J.-D. Hecht, F. Frost, T. Chassé, D. Hirsch, H. Neumann, A. Schindler, F. Bigl, *In-situ-characterization of the nitridation of AIII-BV semiconductor surfaces by means of x-ray photoelectron spectroscopy*, Applied Surface Science **179** (2001) 197.

J.-D. Hecht, F. Frost, T. Chassè, A. B. Preobrajenski, D. Hirsch, H. Neumann, A. Schindler, B. Rauschenbach, *Interstitial nitrogen induced by low-energy ion beam nitridation of AIII–BV semiconductor surfaces*, Journal of Applied Physics **90** (2001) 6066.

J.-D. Hecht, F. Frost, A. B. Preobrajenski, T. Chassé, *XANES study of the low-energy ion beam nitridation of AIII-BV semiconductor surfaces*, BESSY Annual Report 2000 (2001) 163.

R. Hermann, S. Naumov, O. Brede, *Why are sterically hindered phenols extremely efficient light quenchers?*, Proc. UPS 2001, XII Conference Ultrafast Processes in Spectroscopy, Florence, (2001).

P. Huber, D. Manova, S. Mändl, W. Assmann, B. Rauschenbach, *Formation of textured TiN-layers on Si by metal plasma immersion ion implantation and deposition*, Proceed. Intern. Conf. on Ion Implantation, IEEE Proceed. XXVI (2001) 508.

P. Huber, D. Manova, S. Mändl, B. Rauschenbach, *Optical Characterisation of TiN Produced by Me-PIIID*, Surface and Coatings Technology **142-144** (2001) 418.

J. Keckes, J. W. Gerlach, R. Averbeck, H. Riechert, S. Bader, B. Hahn, H.-J. Lugauer, A. Lell, V. Härle, A. Wenzel, B. Rauschenbach, *Temperature dependence of stresses in GaN thin films grown on (0001) sapphire: Modeling of thermal stresses,* Appl. Phys. Lett. **79** (2001) 4307.

G. Keller, S. Mändl, U. Rüde, B. Rauschenbach, *Ion mass and scaling effects in PIII simulation*, Surface and Coatings Technology **136** (2001) 117.

W. Knolle, V. I. Feldman, I. Janovský, S. Naumov, R. Mehnert, H. Langguth, F. F. Sukhov, A. Y. Orlov, *EPR study of methyl and ethyl acrylate radical cations and their transformations in low-temperature matrices*, Perkin Trans. **2** (2001) 687.

I. Konovalov, O. Tober, M. Winkler, K. Otte, *Electrical properties of Cu-In-S absorber prepared on Cu tape (CISCuT)*, Solar Engergy Materials & Solar Cells **67** (2001) 49.

A. Kreuter, G. Wagner, K. Otte, G. Lippold, A. Schindler, M. Schubert, *Anisotropic dielectric function spectra from single-crystal $CuInSe_2$ with orientation domains*, Appl. Phys. Lett. **78** (2001) 195.

A. Krtschil, A. Kielburg, H. Witte, A. Krost, J. Christen, A. Wenzel, B. Rauschenbach, *Electri-*

cal Charaterization of Ion Implantation Induced Defect States in Gallium Nitride, IPAP Conf. Series **1** (2001) 625.

A. Krtschil, A. Kielburg, H. Witte, A. Krost, J. Christen, A. Wenzel, B. Rauschenbach, *Implantation induced defect states in gallium nitride and their annealing behavior*, Phys. Stat. Sol. **228** (2001) 325.

R. N. Kumar, R. Mehnert, *Electron beam curing of the system cycloaliphatic diepoxide-epoxidized natural rubber-glycidyl methacrylate in presence of cationic initiators*, Macromol. Mater. Eng. **286** (2001) 449.

R. N. Kumar, R. Mehnert, T. Scherzer, F. Bauer, *Application of Real-Time FTIR and MAS NMR Spectroscopy to the Characterization of UV/EB Cured Epoxidized Natural Rubber Blends*, Macromol. Mater. Engn. **286** (2001), 598.

V. Lavrentiev, C. Hammerl, B. Rauschenbach, O. Kukharenko, *Formation of hardened surface layers in titanium under irradiation with intense ion beams*, Scripta mater. **44** (2001) 625.

V. Lavrentiev, C. Hammerl, B. Rauschenbach, A. Pisanenko, O. Kukharenko, *alfa-to-beta-phase transformation in titanium induced by power ion-beam irradiation*, Phil.Magazine A **81** (2001) 511.

M. Lenk, R. Mehnert, *Design and performance characteristics of a windowless argon excimer source*, Proc. RadTech Europe, Basel (2001) 153-158.

L. Li, Y. H. Yu, Z. X. Lin, X. Wang, S. Mändl, B. Sundarvel, E. Z. Luo, I. H. Wilson, *Microstructure and optical effects of buried nano-cavities formed in silicon by hydrogen ion implantation*, Proceed. Intern. Conf. On Ion Implantation, IEEE-Proceed. XXVI (2001) 769.

G. Lippold, K. Otte, F. Frost, A. Schindler, *Neue Ionenstrahlverfahren in der CIS-Dünnschichttechnologie - Stand und Ausblick,* Tagungsband: "Verfahren und Materialien für die Photovoltaik", 29.-30.03.2001, Arnstadt, veranstaltet durch die "Fördergemeinschaft Dünne Schichten e. V. "

C. Liu, A. Wenzel, B. Rauschenbach, E. Alves, A. D. Sequeira, N. Franco, M. F. da Silva, J. C. Soares, X. Wang, *Amorphization of GaN by ion implantation*, Nuclear Instuments and Methods in Physics Research **178** (2001) 200.

S. Mändl, R. Günzel, C. Hammerl, E. Richter, B. Rauschenbach, W. Möller, *PIII-nitriding of boron implantated stainless steel*, Surface and Coatings Technology **136** (2001) 176.

S. Mändl, D. Krause, G. Thorwarth, R. Sader, F. Zeilhofer, H. H. Horch, B. Rauschenbach, *Plasma immersion ion implantation treatment of medical implants*, Surface and Coatings Technology **142-144** (2001) 1046.

S. Mändl, B. Rauschenbach, *Nitrogen diffusion in austenitic stainless steel and formation of expanded austenite*, Defect and Diffusion Forum **188/190** (2001) 125.

S. Mändl, G. Thorwarth, P. Huber, S. Schoser, B. Rauschenbach, *Comparison of trenches treated in PIII-systems*, Surface and Coatings Technology **139** (2001) 81.

S. Mändl, G. Thorwarth, D. Manova, B. Rauschenbach, *Influence of Ion Energy on Titanium Oxide Formation by Vacuum Arc Deposition and Implantation*, Nucl. Instrum. Meth. B **178** (2001) 148.

G. R. Mahalaxmi, S. Naumov, R. Hermann, O. Brede, *Nucleophilic effects on the deprotonation of phenol radical cations*, Chem. Phys. Lett. **337** (2001) 335.

D. Manova, P. Huber, S. Mändl, B. Rauschenbach, *Filtered Arc Deposition and Implantation of Aluminium Nitride*, Surface and Coatings Technology **142-144** (2001) 61.

D. Manova, S. Mändl, B. Rauschenbach, *Heat balance during plasma immersion ion implantation*, Plasma Sources Sci. Technol. **10** (2001) 423.

D. Manova, S. Mändl, B. Rauschenbach, *Oxygen Behaviour During PIII-Nitriding of Aluminium*, Nucl. Instrum. Meth. B **178** (2001) 291.

R. Mehnert, *Degree of cure-measurement and process control*, Proc. RadTech Europe, Basel (2001) 167-172.

R. Mehnert, E. Hartmann, H.-J. Gläsel, S. Rummel, F. Bauer, A. Sobottka, C. Elsner, *Funktionelle Schichten durch UV- und Elektronenstrahlhärtung*, Konferenzband, 9. NDVaK, Dresden, 18.-19.10.2001 (2001) 103.

R. Mehnert, E. Hartmann, H.-J. Gläsel, S. Rummel, F. Bauer, A. Sobottka, C. Elsner, *Funktionelle Schichten durch UV- und Elektronenstrahlhärtung*, Mat.-wiss. u. Werkstofftech. **32** (2001) 774.

R. Mehnert, A. Sobottka, C. Elsner, *Microstructured polyacrylate surfaces generated by UV&EB curing*, Proc. RadTech Europe, Basel (2001) 603.

J. Meinhardt, R. Mehnert, S. Howitz, *PECVD-Oberflächenbeschichtungen für die Mikrosystemtechnik*, Proc. II. Oberflächentechnisches Kolloquium Oberflächentechnik, Merseburg, Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg, ISBN 3-86010-620-1 (2001) 31-38.

S. L. Molodtsov, W. Schneider, A. B. Preobrajenski, J. Boysen, M. Richter, T. Chassé, C. Laubschat, *Electronic Structure and Surface Reconstruction of DyNi Films Grown on W(110)*, Surface Science **482-485** (2001) 746.

W. Naumann, *Rate coefficient calculation for diffusion-influenced reversible reactions with longer-range*, J. Chem. Phys. **114** (2001) 4791.

S. Naumov, K. Hildenbrand, C. von Sonntag, *Tautomers of the N-centered radical generated by reaction of $SO_4^{\cdot-}$ with N(1)-substituted cytosines in aqueous solution. Calculation of isotropic hyperfine coupling constants by a density functional method*, J. Chem. Soc., Perkin Trans. **2** (2001) 1648.

K. Otte, G. Lippold, D. Hirsch, T. Chassé, A. Schindler, M. V. Yakushev, R. W. Martin, F. Bigl, *In situ XPS investigations of ion beam hydrogenation of $CuInSe_2$*, Thin Solid Films **387** (2001) 185.

K. Otte, G. Lippold, D. Hirsch, R. K. Gebhardt, T. Chassé, *Conductivity Type Conversion of p-type $CuInSe_2$ due to hydrogenation*, Appl. Surf. Sci. **179** (2001) 203.

K. Otte, G. Lippold, W. Frank, A. Wenzel, J. Krauser, A. Weidinger, A. Schindler, *Influence of atomic hydrogen on intrinsic defects in $CuInSe_2$*, Mat. Res. Soc. Symp. Proc. **668** (2001) H5.20.1.

M. F. Plass, C. Popov, B. Ivanov, S. Mändl, M. Jelinek, L. M. Zambov, W. Kulisch, *Correlation between photoluminescence, optical and structural properties of amorphous nitrogen-rich carbon nitride films,* Appl. Phys. A **72** (2001) 21.

T. Pohl, C. Hammerl, B. Rauschenbach, U. Rüde, *Computer simulation of Ostwald ripening for ion beam synthesis of buried layers*, Nuclear Instuments and Methods in Physics Research **178** (2001) 135.

L. Prager, H.-R. Paur, R. Mehnert, C. von Sonntag, J. Schubert, *Entwicklung und Erprobung eines Verfahrens zum Abbau aromatischer Kohlenwasserstoffe (BTEX) in der Stripperabluft und Grundwasserreinigungsanlagen durch Elektronenbestrahlung*, Abschlussbericht des BMBF-Verbundvorhabens: 02 WT 9655/56/57/58 (2001).

L. Prager, P. Dowideit, H. Langguth, H.-P. Schuchmann, C. von Sonntag, *Hydrolytic removal of the chlorinated products from the oxidative free-radical-induced degradation of chloroethylenes: acid chlorides and clorinated acetic acids*, J. chem. Soc., Perkin Trans. **2** (2001) 1641.

L. Prager, E. Hartmann, *New degradation route of chlorinated ethylenes in exhaust gases from ground water remediation*, J. Photochem. Photobiol. A **138** (2001) 177.

A. B. Preobrajenski, R. K. Gebhardt, I. Uhlig, T. Chassé, *Two types of sulfur-induced (2 x 1) reconstructions on InP(001)*, Surf. Science **481** (2001) 1.

B. Rauschenbach, *Plasma Immersion Implantation, The Enzyclopedia of Materials*, Science and Technology, Elsevier Science Oxford **10** (2001) 1.

B. Rauschenbach, S. Mändl, J. K. Gregory, R. Sader, D. Krause, W. Assmann, E. Steinhauser, *Oberflächenbehandlungen von Titanwerkstoffen*, Biomaterialien **2** (2001) 215.

B. Rauschenbach, S. Sienz, S. Six, J. W. Gerlach, *Synthesis of metal nitrides by low-energy ion assisted film growth*, Surface and Coatings Technology **142-144** (2001) 371.

H. Rumpf, H. Modrow, J. Hormes, H.-J. Gläsel, E. Hartmann, E. Erdem, R. Böttcher, K.-H. Hallmeier, *Preparation of nanocrystalline $BaTiO_3$ characterized by in situ X-ray absorption spectroscopy*, J. Phys. Chem. B **105** (2001) 3415.

R. Sader, S. Mändl, D. Krause, G. Thorwarth, F. Zeilhofer, H. H. Horch, B. Rauschenbach, *Surface Modification of Medical Titanium Implants with PIII*, Micro- and Nanostructures of Biological Systems, eds. G. Bischoff and H.-J. Hein (Shaker-Verlag, Aachen 2001) (2001) 121.

T. Scherzer, W. Knolle, S. Naumov, R. Mehnert, UV curing without photoinitiators, Proc. RadTech Europe 2001, Basel (2001) 225.

T. Scherzer, H. Langguth, *The Effect of Temperature on the Induction Period in the Photoinitiated Polymerization of Tripropylene Glycol Diacrylate*, Nucl. Instr. Meth. in Phys. Res. B **185** (2001) 276.

A. Schindler, T. Hänsel, D. Flamm, W. Frank, G. Böhm, F. Frost, R. Fechner, F. Bigl, *Ion beam and plasma jet etching for optical component fabrication*, Proceedings of SPIE **4440** (2001) 217.

S. Six, J. W. Gerlach, B. Rauschenbach, *Ion beam assisted pulsed laser deposition of epitaxial aluminium nitride thin films on sapphire substrates*, Surface and Coatings Technology **142-144** (2001) 397.

D. Spemann, T. Reinert, J. Vogt, T. Butz, K. Otte, K. Zimmer, *Novel test sample for submicron ion-beam analysis*, Nuclear Intruments and Methods in Physics Research **181** (2001) 186.

M. Tartz, E. Hartmann, R. Deltschew, H. Neumann, *Thrust vector deflection by grid misalignment*, 27th Int. Electric Propuls. Conf., Pasadena, 15.-19.10.2001, Paper IEPC-01-114 (2001)

A. Tauber, A. Prager-Duschke, *UV curing using vinyl ethers. 308 nm excimer lamps as radiation source and online monitoring of the curing process by ion mobility spectroscopy*, Proc. RadTech Europe, Basel 467-472 (2001).

A. Tauber, T. Scherzer, I. Weiß, R. Mehnert, *UV curing of pressure sensitive adhesives: from mechanistic aspects towards practical applications*, Proceedings RadTech Asia 2001, Kunming (China) 403-410 (2001).

T. Thärigen, E. Hartmann, M. Lenk, A. Mende, K. Otte, *Electron emission from arc-modified diamond-like carbon films at low electric field*, Appl. Surf. Sci. **182** (2001) 142.

J. A. Theruvathu, C. T. Aravindakumar, R. Flyunt, J. von Sonntag, C. von Sonntag, *Fenton Chemistry*

of 1,3-Dimethyluracil, J. Am. Chem. Soc. **123** (2001) 9007.

G. Thorwarth, S. Mändl, B. Rauschenbach, *Rutile formation and oxygen diffusion in oxygen PIII-treated titanium*, Surface and Coatings Technology **136** (2001) 236.

A. S. Vinogradov, A. B. Preobrajenski, S. A. Krasnikov, A. Knop-Gericke, P. Bressler, T. Chassé, R. Szargan, *Ligand effect on Fe 2p core excitations in iron compounds*, BESSY Annual Report 2000 (2001) 160.

C. von Sonntag, *Abatement of polluted ground water by stripping and gas phase electron beam irradiation: volatile chlorinate hydrocarbons and aromatic compounds*, Report of the Consultants` Meeting on "Removal of volatile organic compounds from exhaust gases by electron beam treatment", IAEA, Vienna, 1-17 (2001).

J. von Sonntag, I. Janovský, S. Naumov, R. Mehnert, *Initiation of free radical N-Alkylmaleimide polymerisation by monomer radical cations. A low temperature EPR Study*, Macromol. Chem. Phys. **202** (2001) 1355.

A. Wenzel, H. Karl, C. Liu, B. Rauschenbach, *Distribution of ion implanted dopants in gallium nitride*, Proceed. Intern. Conf. On Ion Implantation, IEEE-Proceed. XXVI 99-102 (2001).

K. J. Wolter, T. Zerna, R. Deltschew, H. Neumann, *Plasma treatment process for fluxless reflow soldering*, 51th Electronic Components and Technology Conference, Orlando, Florida 29.-01.05.2001, Paper S37 (2001) 03.

R. A. Yankov, S. Mändl, *Plasma immersion ion implantation for silicon processing*, Ann. Phys. **10** (2001) 279.

U. Zeitschel, K. Otte, K. Zimmer, D. Hirsch, F. Bigl, V. Bigl, *Mechanical fixation of neurons and astrocytes with transparent three-dimensional microstructures - a new tool manipulation of living cells*, J. Neurochem. **77** (2001) 04-63.

M. Zeuner, F. Scholze, B. Dathe, H. Neumann, *Optimisation and characterisation of a TCP type RF broad beam ion source*, Surface and Coatings Technology **142-144** (2001) 39.

M. Zeuner, F. Scholze, H. Neumann, T. Chassé, G. Otto, D. Roth, A. Hellmich, B. Ocker, *A unique ECR broad beam source for thin film processing*, Surface and Coatings Technology **142-144** (2001) 11.

Kolloquien am IOM

V. Gottschalch, Uni Leipzig, „A3B5-Monolagen-epitaxie-Synthesemöglichkeiten“, 04/00.

G. Bachmann, VDI Technologiezentr. – Abt. Zukünftige Technologien, „Zukunftschancen durch Nanotechnologie“, 05/00.

A. Kreuter, Uni Leipzig, „Optische Untersuchungen an ionenstrahlmodifizierten InSb u. $CuInSe_2$“, 05/00.

I. Weingärtner, Head of Labor. f. Image Optics, Physik.-Techn. Bundesanstalt, “Ultrapräzise Formmessung an Asphären u. Planflächen“, 05/00.

Workshop I der DFG-Forschergruppe „Teilchenstrahlen-stimulierte Ultrapräzisions-Oberflächenbearbeitung, Großbothen, 12. und 13. Mai 2000 mit Beiträgen der Projektpartner der Universitäten Jena: E.-B. Kley, Greifswald: E. Wagner, Wuppertal: H. Scheer, Leipzig: V. Gottschalch, C. Engler D. Jenichen und aus dem IOM: F. Frost, K. Zimmer, D. Flamm, M. Tartz, H. Neumann, R. Schwabe, St. Rudschuck, K. Otte, A. Braun, J. Dienelt, H. Herrenberger, A. Schindler.

C. Damm, Uni Halle/Wittenberg, „Ladungstransportprozesse in Pigmenten“, 06/00.

S. Mändl, Universität Augsburg, Inst. für Experimentalphysik, „Plasma-Immersions-Ionenimplantation: Ein Verfahren zur 3D-Behandlung“, 07/00.

M. Hülsmann, CRAY VALLEY, “Neuentwicklungen der Fa. CRAY VALLEY auf dem Gebiet strahlenhärtbarer Lackrohstoffe“, 08/00.

G. Reiße, HWT Mittweida, “Lasergestützte Schichtabscheidung“, 09/00.

S. Senz, MPI Halle, „Wafer-Bonding: Si und GaAs“, 10/00.

G. Israel, MLU Halle, „Photohalbleiter“, 10/00.

S. Teichert, TU Chemnitz, „Heteroepitaxie von Siliziden auf Si“, 11/00.

W. Möller, FZ Rossendorf, „Mechanismus des Ionen-Nitrierens von Edelstählen und Aluminium-Werkstoffen“, 11/00.

B. Ocker, UNAXIS Deutschland GmbH Alzenau, „Thin-Film-Head (TFH) - Aufbau und moderne Herstellungstechnologien“, 11/00.

K. Meerholz, LMU München, „OLED`S“, 12/00.

W. Jacob, MPI für Plasmaphysik Garching, „Was passiert an der Oberfläche bei der Plasmadeposition von amorphen Kohlenwasserstoffschichten?“, 01/01.

A. Anders, University of California Berkley, “Plasmaphysik des kathodischen Bogens und Anwendung von Bogenplasmen zur Schichtherstellung“, 04/01.

K. Ellmer, Hahn-Meitner-Institut Berlin, „Reaktives Magnetronsputtern als großflächige Abscheidemethode für Dünnschichtsolarzellen“, 04/01.

F. Kremer, Uni Leipzig, „Ferroelektrische flüssigkristalline Elastomere, von der Analyse der molekularen Dynamik zum Design von Nanomaschinen“, 05/01.

M. Grundmann, Uni Leipzig, „Halbleiter – Heterostrukturen“, 05/01.

Workshop II der DFG-Forschergruppe „Teilchenstrahlen-stimulierte Ultrapräzisions-Oberflächenbearbeitung, Großbothen, 14. und 15. Juni 2001, mit Beiträgen der Projektpartner der Universitäten Jena: L. Wittig, E.-B. Kley, Greifswald: H.-E. Wagner, Wuppertal: H. Schulz, H. Scheer, Leipzig: V. Gottschalch, C. Engler, D. Jenichen, H. Herrnberger und aus dem IOM: F. Frost, K. Zimmer, D. Flamm, M. Tartz, H. Neumann, R. Schwabe, F. Pietag, K. Otte, A. Braun, S. Jankuhn, A. Schindler.

W. Eckstein, MPI für Plasmaphysik Garching, „Simulation des Ionenbeschusses von Oberflächen“, 06/01.

H.-J. Müssig, Institut für Halbleiterphysik Frankfurt/O., „Bietet die Si(113)-Fläche gegenüber der Si(100)-Fläche neue Anwendungsmöglichkeiten“, 06/01.

Vorträge/Poster

C. L. Trimble, E. Franke, J. S. Hale, J. A. Woollam, *Electochromic emittance modulation devices for spacecraft thermal control*, Space Technology and Applications Forum 2000, Albuquerque, NM, USA 31.01.–03.02.2000

L. Aschke, F. Schubert, J. Kegeler, A. Schindler, T. Hänsel, K. Knapp, *Flatness Correction of NZTE Mask Blank Substrates*, SPIE’s 26th Annual Int. Symp. Microlithography, Santa Clara USA Feb. 25th–March 2nd 2000

B. Rauschenbach, *Ionenstrahl-gestützte Deposition von Metallnitriden*, Stiftung Caesar Bonn 29.02. 2000

F. Bauer, A. Freyer, *TG-FTIR studies on modification of zeolite surface by coking*, 12. Deutsche Zeolith-Tagung, München 01.–03.03.2000

R. Deltschew, D. Hirsch, H. Neumann, T. Herzog, K. J. Wolter, M. Nowottnick, K. Wittke, *Plasmabehandlung von PbSn-Legierungen für flussmittelarme Lötprozesse*, VII. Erfahrungsaustausch Oberflächentechnologie mit Plasmaprozessen, Mühlleiten 13.–17.03.00

H. Neumann, M. Tartz, F. Scholze, E. Hartmann, R. Deltschew, M. Zeuner, *Entwicklung von großflächigen Ionenstrahlsystemen*, VII. Erfahrungsaustausch Oberflächentechnologie mit Plasmaprozessen, Mühlleithen 13.–17.03.00

H.-J. Gläsel, F. Bauer, E. Hartmann, D. Hirsch, H. Langguth, R. Mehnert, *Kratzfeste strahlengehärtete Nanokomposit-Beschichtungen*, Maßgeschneiderte Polymere, GDCh-Tagung, Merseburg 20.–22.03.2000

T. Scherzer, *Untersuchungen zum Einfluss der Temperatur auf die Kinetik der Photopolymerisation mit Real-Time FTIR-Spektroskopie*, Strahlenchemikertreffen 2000, Bad Honnef 23.-24.3.2000

F. Frost, A. Schindler, F. Bigl, *Entwicklung der Topographie von InP-Oberflächen beim Ar-Sputtern: Skalierungsverhalten und Entstehung periodischer Nanometerstrukturen*, DPG-Frühjahrstagung Regensburg 27.–31.03.2000

J.-D. Hecht, F. Frost, D. Hirsch, H. Neumann, A. Schindler, F. Bigl, *Nitridation von AIII-BV-Halbleiteroberflächen mittels N^{2+}-Bombardement*, DPG-Frühjahrstagung Regensburg 27.–31.03.2000

B. Rauschenbach, *Ionenstrahl-gestützte Deposition dünner Schichten*, DPG–Tagung Regensburg 28.03.2000

B. Rauschenbach, *Synthesis of buried silicon oxide layers by water plasma immericen implantation*, Semicon Europa, München 05.04.2000

J. Dienelt, K. Zimmer, F. Bigl, *Ausgewählte Ergebnisse der Untersuchungen zum chemisch unterstützten Ionenstrahlätzen*, Institut für Mikrostrukturtechnologie und Analytik (IMA), Universität Kassel, Workshop "Trockenätzen für die III/V-Halbleitertechnik" 10.04.2000

F. Frost, *Reaktives Ionenstrahlätzen von InAs und InSb: Grundlagen und Anwendungen*, Institut für Mikrostrukturtechnologie und Analytik (IMA), Universität Kassel, Workshop "Trockenätzen für die III/V-Halbleitertechnik" 10.04.2000

Y. Dietzel, W. Przyborowski, G. Nocke, F. Hollstein, J. Meinhardt, P. Offermann, *Investigation with regard to PVD-Arc-Coatings on polyamide fabrics*, 27th International Conference on Metallurgical Coatings and Thin Films, ICMCTF 2000, San Diego, California, USA 10.–14.04.2000

E. Franke, M. Schubert, C. L. Trimble, M. J. DeVries, J. A. Woollam, *Optical properties of amorphous tantalum oxide thin films measured by IR-VIS-VUV (0.03 eV–8.5 eV) spectroscopic ellipsometry*, ICMCTF 2000, San Diego, California, USA 10.-14.04.2000

E. Franke, C. L. Trimble, J. S. Hale, J. A. Woollam, *Infrared switching electrochromic devices based on tungsten trioxide*, ICMCTF 2000, San Diego, California, USA 10.–14.04.2000

E. Franke, C. L. Trimble, J. S. Hale, J. A. Woollam, *Infrared switching electrochromic all-solid-state devices based on tungsten trioxide*, NASA microconference, New Jersey May 2000

K. Otte, G. Lippold, D. Hirsch, A. Schindler, M. V. Yakushev, R. W. Martin, F. Bigl, *Surface cleaning of Cu(In,Ga)Se_2 by low energy hydrogen ion beam implantation*, 16th European Photovoltaic Solar Energy Conference, Glasgow, UK 01.-05.05.2000

R. Mehnert, *Polymere und Licht*, Kolloquium; TU München 04.05.2000

A. Schindler, G. Bachmann, *Nanotechnologie – atomare Haarspalterei oder Chance für den Wirtschaftsstandort Deutschland,* 47. Großbothener Gespräch, Wilhelm Ostwald Gesellschaft zu Großbothen, 06.05.2000

W. Naumann, *Fluoreszenzlöschprozesse?*, MPI f. Biophysikal. Chemie, Göttingen 08.–09.05.2000

U. Müller, *Photoinduzierte kationische Vernetzung: Alte Weisheiten im neuen Licht*, Kolloquium, TU München 18.05.2000

B. Rauschenbach, *Synthese dünner Schichten durch Ionenstrahl–gestützte Deposition*, Universität Stuttgart, Institut für Strahlenphysik 18.05. 2000

W. Bondzio, J. Meinhardt, J. Kickelhain, R. Mehnert, *Einfluss von Oberflächenmodifizierungen auf den Haftmechanismus flexibler Schaltungsträger*, ACHEMA 2000, Internat. Meeting on chemical engineering environmental protection and biotechnology, Frankfurt/M. 22.–23.05.2000

E. Dayss, G. Leps, J. Meinhardt, A. Wutzler, H.-G. Struck, *ND-Plasmamodifizierung von Polymersubstraten für den biomedizinischen Einsatz*, ACHEMA 2000, Frankfurt/M. 22.–23.05.2000

F. Frost, *Vom Zufall zur Ordnung: Über die selbstorganisierende Entstehung periodischer Nanometerstrukturen durch Ionenstrahlerosion*, Kolloquium zur Verabschiedung von Herrn Prof. Dr. F. Bigl und Amtseinführung von Herrn Prof. Dr. B. Rauschenbach, Institut für Oberflächenmodifizierung Leipzig 24.05.2000

L. Prager, E. Hartmann, *222 nm UV photolysis of chlorinated ethylenes in exhaust gases from ground water remediation,* 2nd Intern. Conf. on Oxidation Technologies for Water and Wastewater Treatment, Clausthal-Zellerfeld, 29.–31.05. 2000

R. Mehnert, *UV-Härtung – Leistung und Potential*, Workshop "Lichtgeschützte Verfahren der Oberflächentechnik", Dresden 30.05.2000

R. Schubert, *Erzeugung von Oberflächenstrukturen durch fotochemische Mikrofaltung und Abformung*, Workshop "Lichtgeschützte Verfahren der Oberflächentechnik", Dresden 30.05.2000

K. Otte, G. Lippold, D. Hirsch, T. Chassé, A. Schindler, M. V. Yakushev, R. W. Martin, F. Bigl, *IN SITU XPS INVESTIGATIONS OF ION BEAM HYDROGENATION OF CuInSe$_2$*, E-MRS, Strasbourg, France May 30th–June 2nd 2000

N.-K. Bär, F. Bauer, D. M. Ruthven, B. J. Balcom, *Application of SRITE and other imaging techniques to the visualization of coke deposits on zeolite catalysts,* 15th European Experimental NMR Conference (EENC 2000), Leipzig 12.–17.06.2000

H. Ernst, M. Findeisen, H.-J. Gläsel, F. Bauer, *Application of multinuclear NMR spectroscopy to the characterization of trimethoxysilylterminated methacrylate grafting onto silica and alumina nanoparticles*, 15th European Experimental NMR Conference (EENC 2000), Leipzig 12.–17.06.2000

D. Flamm, F. Frost, A. Schindler, E.-B. Kley, M. Cumme, T. Harzendorf, *Herstellung von Mikrolinsenarrays mit Hilfe der Grautonlithographie und Ionenstrahlätztechniken,* Deutsche Gesellschaft für angewandte Optik, Jena 13.–17. Juni 2000

R. Steiner, R. Fechner, H.-J. Dobschal, A. Schindler, D. Hirsch, *Entwicklung diffraktiver Polarisationsstrahlteiler mit unsymmetrischem Furchenprofil für den Einsatz in Schreib-/Leseköpfen Optischer Speicher*, Deutsche Gesellschaft für angewandte Optik, Jena 13.–17. Juni 2000

A. Schindler, G. Böhm, W. Frank, T. Hänsel, A. Nickel, F. Bigl, *Advanced Technology for Deep Precision Aspheres Fabrication with High Convergence – Demonstration of the Processing Cycle,* OSA Optical Fabrication and Testing Topical Meeting, Québec, Canada, June 18th–22nd 2000

G. Böhm, W. Frank, A. Schindler, *Radical Jet Etching (RJE) – a New Tool for High Rate Figuring of Optical Surfaces,* OSA Optical Fabrication and Testing Topical Meeting, Québec, Canada, June 18th–22nd 2000

A. Schindler, T. Hänsel, M. Zeuner, G. Seidenkranz, *Ion Beam Figuring and Ion Beam Polishing Production Tools – Processing Technology Included – for Customized Solutions,* OSA Optical Fabrication and Testing Topical Meeting, Québec, Canada, June 18th–22nd 2000

E. Franke, C. L. Trimble, J. S. Hale, J. A. Woollam, *Variable Emissivity Electrochromic WO3-based Devices for Spacecraft Thermal Control*, 8th int. Symp. "Material in a Space Environment", and 5th Int. Conf. on "Protection of Materials and Structure from the LEO Space Environment", Arcachon, France July 2000

R. Deltschew, M. Tartz, S. Jankuhn, E. Hartmann, H. Neumann, *Redeposition of sputtered material on ion thruster grids*, 36th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit 17.–19.07.2000

M. Tartz, E. Hartmann, R. Deltschew, H. Neumann, *Effect of the plasma inhomogeneity on grid performance*, 36th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit, Huntsville, Alabama 17.–19.07.2000

R. Mehnert, *Radiation curing as method to produce micro structured polymer surface*, Internat. Conference on "Polymer Modification, Degradation and Stabilisation", Palermo 03.–07.09.2000

W. Knolle, I. Janovský, S. Naumov, *Current trends in surface modification by UV(EB)-irradiation*, 6th International Conference on Pulse Investigations in Chemistry, Biology and Physics, PULS ´2000, Leba, Poland 09.–15.09.2000

W. Knolle, I. Janovský, S. Naumov, *Low-temperature EPR study of radical cations*, 6th International Conference on Pulse Investigations in Chemistry, Biology and Physics, PULS´2000, Leba, Poland 09.–15.09.2000

D. Spemann, T. Reinert, J. Vogt, T. Butz, K. Otte, K. Zimmer, *Novel test sample for submicron ion beam analysis*, 7th International Conference on Nuclear Microprobe Technology & Applications (ICNMTA2000), Bordeaux, France 10.–15.09.2000

B.J. Stanbery, S. Kincal, S. Kim, J. Webb, G. Lippold, T.J. Anderson, R.K. Ahrenkiel, *Role of Sodium in the Control of Defect Structures in CIS*, 28th PVSC, Anchorage, USA 15.–22. Sept. 2000

W. Attenberger, G. Thorwarth, D. Manova, S. Mändl, B. Stritzker, B. Rauschenbach, *Interface Properties Of Tio_2 On Si Formed By Simultaneous Implantation And Deposition*, 7th Int. Conf. on Plasma Surface Engineering, Garmisch-Partenkirchen 17.–21. Sept. 2000

R. Deltschew, D. Hirsch, H. Neumann, T. Herzog, K.J. Wolter, M. Nowottnick, K. Wittke, *Plasma Treatment For Fluxless Soldering*, 7th Int.Conf. on Plasma Surface Engeneering, Garmisch-Partenkirchen 17.–21. Sept. 2000

R. Deltschew, M. Tartz, E. Hartmann, H. Neumann, *Effect of the Plasma Inhomogeneity on Grid Performance*, 7th Int. Conf. on Plasma Surface Engineering, Garmisch-Partenkirchen 17.–21. Sept. 2000

R. Deltschew, M. Tartz, E. Hartmann, H. Neumann, M. Zeuner, *Distribution Of Sputtered Material During Ion Beam Sputtering*, 7th Int. Conf. on Plasma Surface Engineering, Garmisch-Partenkirchen 17.–21. Sept. 2000

F. Hollstein, D. Kitta, P. Louda, F. Pacal, J. Meinhardt, *Investigation of low-reflective ZrCN-PVD-arc-coatings for application on medical tools for minimally invasive surgery*, 7th International Conference on Plasma Surface Engineering, Garmisch-Partenkirchen 17.–21. Sept. 2000

P. Huber, D. Manova, S. Mändl, B. Rauschenbach, *Optical characterisation of tin produced by metal-PIII*, 7th Int. Conf. on Plasma Surface Engineering, Garmisch-Partenkirchen 17.–21. Sept. 2000

S. Mändl, G. Thorwarth, R. Sader, F. Zeilhofer, H. H. Horch, B. Rauschenbach, *PIII Treatment of medical implants*, 7th Int. Conf. on Plasma Surface Engineering, Garmisch-Partenkirchen 17.–21. Sept. 2000

D. Manova, P. Huber, S. Mändl, B. Rauschenbach, *Filtered arc deposition and implantation of aluminium nitride*, 7th Int. Conf. on Plasma Surface Engineering, Garmisch-Partenkirchen 17.–21. Sept. 2000

B. Rauschenbach, S. Sienz, S. Six, J.W. Gerlach, *Synthesis of metal nitride films by low-energy ion assisted film growth*, 7th Int. Conf. on Plasma Surface Engineering, Garmisch-Partenkirchen 17.–21. Sept. 2000

B. Rauschenbach, S. Sienz, S. Six, J.W. Gerlach, *Synthesis of metal nitrides by low-energy ion assisted film deposition*, 7th Intern. Conf. on Plasma Surface Engineering, Garmisch-Partenkirchen 17.–21. Sept. 2000

S. Six, J.W. Gerlach, B. Rauschenbach, *Ion beam assisted pulsed laser deposition of epitaxial aluminium nitride thin films on sapphire substrates*, 7th Int. Conf. on Plasma Surface Engineering, Garmisch-Partenkirchen 17.–21. Sept. 2000

M. Zeuner, F. Scholze, H. Neumann, F. Bigl, A. Hellmich, B. Ocker, *A Unique ECR Broad Beam Source for Thin Film Processing*, 7th Int. Conf. on Plasma Surface Engineering, Garmisch-Partenkirchen 17.–21. Sept. 2000

M. Zeuner, F. Scholze, H. Neumann, R. Deltschew, *Optimisation and Characterisation of a TCP Type RF Broad Beam Ion Source* , 7th Int. Conf. on Plasma Surface Engineering, Garmisch-Partenkirchen 17.–21. Sept. 2000

W. Naumann, *Reversible fluorescence quenching: Generalized Stern-Volmer relations derived from approximate self-consistent relations*, Workshop Diffusion Assisted Reactions (DAR) 17.-21. Sept. 2000

A. Schindler, *Ion beam and plasma jet techniques for ultra-precision optics fabrication,* Joint Warwick-Tokyo Nanotechnology Symposium, University of Warwick, UK, Sept. 18th-21st 2000

D. Hirsch, D. Flamm, F. Frost, *Evolution of Quartz Surface Topography by Ion Beam Sputtering*, 4th Int. Conference on the Development and Technological Applications of Scanning Probe Methods, Münster 24.–27. September 2000

W. Knolle, *The lotos effect: Surface micro structuring using UV and EB curing*, IRaP 2000, Gouvieux-Chantilly, France 24.–28.09.2000

S. Naumov, *Fundamental physical and chemical processes*, IRaP 2000, Gouvieux-Chantilly, France 24.–28.09.2000

T. Scherzer, *Effect of temperature on the kinetics of acrylate photopolymerization*, 4th Symposium on

Ionizing Radiation and Polymers, Gouvieux-Chantilly, France 24.–28.09.2000

D. Flamm, F. Frost, D. Hirsch, *Evolution of Quartz Surface Topography by Ion Beam Sputtering*, 11. Arbeitstagung Angewandte Oberflächenanalytik AOFA 11, Leipzig 24.–28. September 2000

A. Freyer, F. Bauer, H. Ernst, H.-J. Gläsel, R. Mehnert, *Application of Temperature-Programmed Oxidation, multinuclear MAS NMR and DRIFT spectroscopy to the surface characterization of modified silica nanoparticles*, 11. Arbeitstagung Angew. Oberflächenanalytik AOFA 11, Leipzig 24.–28.09.2000

F. Frost, D. Hirsch, A. Schindler, *Die Charakterisierung von AFM-Spitzen unter Verwendung von periodischen Nanometerstrukturen, hergestellt durch Ionenstrahlsputtern*, 11. Arbeitstagung Angewandte Oberflächenanalytik AOFA 11, Leipzig 24.–28. September 2000

J.-D. Hecht, F. Frost, T. Chassé, D. Hirsch, H. Neumann, A. Schindler, F. Bigl, *In-situ-Charakterisierung der Nitridierung von AIII-BV-Halbleiteroberflächen mittels XPS und in-situ-Ellipsometrie*, 11. Arbeitstagung Angewandte Oberflächenanalytik AOFA 11, Leipzig 24.–28.09.2000

K. Otte, G. Lippold, D. Hirsch, R. K. Gebhardt, T. Chassé, *Conductivity Type Conversion of p-type $CuInSe_2$ due to Hydrogenation*, 11. Arbeitstagung Angewandte Oberflächenanalytik AOFA 11, Leipzig, 25.–28.09.2000

A. Schindler, T. Hänsel, *Ultrapräzise Bearbeitung optischer und Präzisionsmechanischer Oberflächen mittels Ionenstrahl- und Plasmaverfahren,* 295. Jenaer Carl-Zeiss-Optikkolloquium, Jena, 26.09.2000

F. Bauer, *Coke formation in zeolites*, Colloquium, National Taiwan University, Taipei 28.09.2000

A. Schindler, *Herstellung optischer Präzisionsflächen und mikrooptischer Komponenten mittels Ionenstrahl- und Plasmajet-Techniken*, Mikrooptik 2000 - Workshop des DGaO-Arbeitskreises Mikrooptik, Fernuniversität Hagen,28.-29.09.2000

C. L. Trimble, E. Franke, M. Schubert, J. S. Hale, J. A. Woollam, *Optical Thin Film Multilayer Systems for Thermal Emittance Modulation in the 300 K Blackbody Spectral Region*, AVS 2000, Boston, MS, USA 02.–06.10.2000

F. Bauer, *Deactivation of zeolite H-ZSM-5 during Methanol-To-Gasoline Process*, Colloquium, National Tsinghua University, Hsinchu 04.10.2000

R. Deltschew, *Charakterisierung plasmabehandelter Oberflächen vor und nach Reflowlötprozessen*, 8. Workshop Mikrotechnische Produktion, Dresden 05.10.2000 Proc. T. 6

F. Bauer, *Isotopic studies in zeolit catalysis*, Colloquium, Academiy Sinica, Taipei 06.10.2000

J. Meinhardt, *Modifizierte PECVD-Kohlenstoff-Fluor-Schichten für die Mikrosystemtechnik*, DFG Rundgespräch, Stuttgart 11.–12.10.2000

R. Schubert, C. Elsner, R. Mehnert, *Funktionelle Lackschichten mit strukturierten Oberflächen*, 2. Wörlitzer Workshop, Dessau/Sachsen-Anhalt 12.10.2000

W. Bondzio, J. Meinhardt, J. Kickelhain, R. Mehnert, *Probleme bei der Auswahl von Polyimidfolien für die Metallisierung*, 8. Neues Dresdner Vakuumtechnisches Kolloquium, Institut für Polymerforschung, Dresden 19.–20.10.2000

E. Dayss, J. Meinhardt, G. Leps, H. G. Struck, *Plasmamodifizierung von Silikonimplantaten*, 8. Neues Dresdner Vakuumtechnisches Kolloquium, Institut für Polymerforschung, Dresden 19.–20.10.2000

Y. Dietzel, W. Przyborobski, G. Nocke, P. Offermann, J. Meinhardt, F. Hollstein, *Verfahrenseinflüsse auf die chemische Zusammensetzung PVD-metallisierter Oberflächen textiler Flächengebilde*, 8. Neues Dresdner Vakuumtechnisches Kolloquium, Institut für Polymerforschung, Dresden 19.–20.10.2000

J. Meinhardt, S. Howitz, *Modifizierung von Mikroprenarrays für die Biotechnologie*, 8. Neues Dresdner Vakuumtechnisches Kolloquium, Institut für Polymerforschung, Dresden 19.–20.10.2000

A. Schindler, T. Hänsel, G. Böhm, W. Frank, D. Flamm, A. Nickel, R. Fechner, F. Frost, H. Neumann, H.-J. Thomas, F. Bigl, *Precision machining of optical surfaces by ion beams and plasma jets,* Japanese German Symposium – Strategies in Nanotechnology, Berlin, October 30th–31st, 2000

R. Mehnert, *Herstellung von Eigenschaften mikrostrukturierter Polymeroberflächen*, Kolloquium – Festkörperoberflächen, Greifswald 02.11.2000

R. Mehnert, *Physik der Oberfläche: Die saubere Fassade*, Seminar Sachverständigentagung, Maler u. Lackierer Landesinnungsverband Nordrhein, Lahnstein 16.11.2000

L. Prager, *Abbau chlorierter Ethene in Stripperabluft: Grundlagen, Verfahren, Anlagen*, Stadtwerke Düsseldorf, HA Wassergewinnung und Grundwassersanierung, 22.11.2000

A. Schindler, *Welt der Nanotechnologie*, Fechner-Gymnasium Leipzig, 23.11.2000

B. Stritzker, B. Rauschenbach, *Ion beam assisted texture evolution during thin film deposition of metal nitride*, MRS Fall Meeting, Boston/Mass. USA 27.11.–01.12.2000

D. Hirsch, *100 pm RMS-Gerät und Umgebung,* 7th User Meeting VEECO/Digital Instruments 10.–11.01.2001

J. W. Gerlach, S. Sienz, W. Attenberger, B. Rauschenbach, *Epitaxie ionenstrahlgestützt abgeschiedener Galliumnitridschichten auf r-Saphir,* 15. Workshop des DGKK-Arbeitskreises "Epitaxie von III/V-Halbleitern", Bad Dürkheim, 11.-12. Dezember 2000

K. Otte, *Fabrication of three-dimensional micro- and nanostructures for biological applications,* 7th Workshop on SEM based Electron Beam Lithography for Applications in Nanotechnology, Dortmund, 15.-16.2.2001

E. Dayss, G. Leps, J. Meinhardt, H.-G. Struck, *Plasmamodifizierung von Silikonimplantaten*, 10. Bundesfachtagung Plasmatechnologie, Greifswald 28.02.–02.03.2001

S. Mändl, R. Sader, G. Thorwarth, D. Krause, F. Zeilhofer, H. H. Horch, B. Rauschenbach, *Biokompatibilität medizinischer Implantate nach Plasma-Immersions-Behandlung*, 10. Bundesfachtagung Plasmatechnologie, Greifswald 28.02.–02.03.2001

A. Schindler, *Präzisionsoberflächenbearbeitung mit Ionen- und Plasmastrahl,* 10. Bundesfachtagung Plasmatechnologie, Greifswald 28.02.–02.03.2001

F. Bauer, E. Bilz, A. Freyer, E. Löffler, *Temperature-programmed characterization of coke-selectivated zeolites*, 13. Deutsche Zeolith-Tagung, Erlangen 07.–09.03.2001

R. Deltschew, M. Tartz, H. Neumann, *Aufbau und Funktion einer Feinstrahlionenquelle*, VIII. Erfahrungsaustausch "Oberflächentechnologie mit Plasmaprozessen", Mühlleithen 13.–15. März 2001

J. Dienelt, K. Zimmer, *Strukturierung in GaAs mittels chemisch unterstützten Ionenstrahlätzens*, VIII. Erfahrungsaustausch "Oberflächentechnologie mit Plasmaprozessen", Mühlleithen 13.–15. März 2001

J. Gerlach, B. Rauschenbach, *Nukleare Analyseverfahren zur Charakterisierung ionenstrahlmodifizierter Festkörperoberflächen,* VIII. Erfahrungsaustausch "Oberflächentechnologie mit Plasmaprozessen", Mühlleithen 13.–15. März 2001

D. Flamm, F. Frost, *Entwicklung der Topographie von Quarzoberflächen beim Ionenstrahlsputtern,* VIII. Erfahrungsaustausch "Oberflächentechnologie mit Plasmaprozessen", Mühlleithen 13.–15. März 2001

F. Frost, *Entstehung von geordneten periodischen Nanometerstrukturen auf Halbleiteroberflächen durch Ionenbeschuss bei simultaner Probenrotation*, VIII. Erfahrungsaustausch "Oberflächentechnologie mit Plasmaprozessen", Mühlleithen 13.–15. März 2001

S. Mändl, *Plasmaimmersionsimplantation mit Metallionen: Einfluss von Geometrie und Hochspannung auf Homogenität und Textur*, VIII. Erfahrungsaustausch "Oberflächentechnologie mit Plasmaprozessen", Mühlleithen 13.–15. März 2001

H. Neumann, T. Chassé, M. Zeuner, B. Ocker, *EUV – Ein Kandidat für die Lithografie der nächsten Generation*, VIII. Erfahrungsaustausch "Oberflächentechnologie mit Plasmaprozessen", Mühlleithen 13.–15. März 2001

M. Zeuner, F. Scholze, K. Barucki, H. Neumann, *Breitstrahl-Ionenquellen – Prinzipien und Anwendungen*, VIII. Erfahrungsaustausch "Oberflächentechnologie mit Plasmaprozessen", Mühlleithen 13.–15. März 2001

G. Böhm, F. Frost, *Umverteilung von Ladungsträgern in hoch angeregten (GaAs) m (AlAs) n-Supergittern nahe des TypI-TypII-Übergangs*, 65. DPG-Frühjahrstagung, Hamburg 26.–30. März 2001

R. Böttcher, H.-J. Gläsel, E. Hartmann, H.-C. Semmelhack, *Größeneffekte in Mn-dotierten $BaTiO_3$-Nanopulvern,* Symp. "Phänomene an den Miniaturisierungsgrenzen" des INK 24/B1-1, Leipzig 19.–20.03.2001

R. Böttcher, H.-J. Gläsel, E. Hartmann, H.-C. Semmelhack, G. Völkel, *Size effects in perovskitic nanopowders*, 65. DPG-Frühjahrstagung, Hamburg 26.–30. März 2001

F. Frost, D. Flamm, D. Hirsch, B. Rauschenbach, *Periodische Ripple-Strukturen auf Fused Silica Oberflächen durch Ionenstrahlerosion: Ein Vergleich zwischen Experiment und Theorie*, 65. DPG-Frühjahrstagung, Hamburg 26.–30. März 2001

F. Frost, A. Schindler, F. Bigl, B. Rauschenbach, *Selbstorganisierende Entstehung von periodischen Nanometerstrukturen durch die Ionenstrahlerosion von Halbleiteroberflächen bei simultaner Probenrotation*, 65. DPG-Frühjahrstagung, Hamburg 26.–30. März 2001

J.W. Gerlach, S. Sienz, W. Attenberger, B. Rauschenbach, *Ionenstrahlgestütztes, epitaktisches Wachstum dünner Galliumnitridschichten auf r-Ebenen-Saphir: Einfluss der Ionenbestrahlung*, 65. DPG-Frühjahrstagung, Hamburg 26.–30. März 2001

J.-D. Hecht, F. Frost, T. Chassé, D. Hirsch, H. Neumann, A. Schindler, B. Rauschenbach, *Auswirkungen des N_2-Bombardements auf Inhaltige AIII-BV-Halbleiteroberflächen*, 65. DPG-Frühjahrstagung, Hamburg 26.–30. März 2001

A. Kritschl, A. Kielburg, H. Witte, J. Christen, A. Krost, A. Wenzel, B. Rauschenbach, *Nachweis von implantationsinduzierter Defektgeneration in GaN durch tiefenaufgelöste Störstellenspektroskopie*, 65. DPG-Frühjahrstagung, Hamburg 26.–30. März 2001

T. Riedle, A. Neisser, K. Otte, R. Klenk, N. Esser, W. Richter, M. C. Lux-Steiner, *Raman spectroscopy from thin $Cu(In,Ga)S_2$ films*, 65. DPG-Frühjahrstagung, Hamburg 26.–30. März 2001

A. Schindler, T. Hänsel, H. Neumann, B. Rauschenbach, *Ion Beam Ultra-Precision Surface Figuring*, 65. DPG-Frühjahrstagung, Hamburg 26.–30. März 2001

S. Sienz, J.W. Gerlach, A. Wenzel, B. Rauschenbach, A. Leil, S. Bader, G. Brüderl, A. Weimar, *In-situ-Messung mechanischer Spannungen während der Ionenimplantation in dünne GaN-Schichten*, 65. DPG-Frühjahrstagung, Hamburg 26.–30. März 2001

W. Knolle, *Mikrostrukturierung von Polymer-Oberflächen mittels UV- und Elektronenbestrahlung*, Abteilungskolloquium am Institut für Physikalische Chemie und Elektrochemie, Technische Universität Dresden, 28. März 2001

G. Lippold, K. Otte, F. Frost, A. Schindler, *Neue Ionenstrahlverfahren in der CIS-Dünnschichttechnologie – Stand und Ausblick*, Workshop „Verfahren und Materialien für die Photovoltaik“, Arnstadt, Germany 29.–30.03.2001

B. Rauschenbach, *Ionenstrahl-gestützte Deposition dünner Schichten*, XI. Workshop des Graduiertenkollegs "Physikalische Chemie der Grenzflächen", Großbothen 30.–31. März 2001

H.-J. Gläsel, F. Bauer, E. Hartmann, H. Langguth, R. Mehnert, *Nanomodified polymeric coatings of enhanced physical and chemical surface properties*, 2nd Europ. Cong. Adhes. Seal., Nürnberg 02.-04.04.2001

S. Mändl, *Plasma-Immersions-Ionenimplantation*, Physik-Kolloquium der Universität Leipzig, 03.04.2001

B. Rauschenbach, *Plasma-Immersions-Ionen-Implantation zur Oberflächenbehandlung*, Innovationsforum "Neuartige Applikationsfelder für die plasmagestützte Oberflächentechnik", Zittau 2001, 05.–06. April 2001

S. Naumov, W. Knolle, I. Janovský, R. Mehnert, *Comparative quantum chemical calculations of hyperfine structures of cyclic radical cations*, 22nd Miller Conference on Radiation Chemistry, Windermere, UK 07.–12.04.2001

F. Frost, D. Hirsch, *Characterization of AFM tips using self-organized nanometer structures prepared by ion sputtering*, VII. Digital Instruments User-Meeting, Göttingen 10.–11.04.2001

D. Hirsch, D. Flamm, F. Frost, *Evolution of Quartz Surface Topography by Ion Beam Sputtering*, VII. Digital Instruments User-Meeting, Göttingen 10.–11.04.2001

K. Otte, G. Lippold, W. Frank, A. Wenzel, J. Krauser, A. Weidinger, A. Schindler, *Influence of atomic hydrogen on intrinsic defects in $CuInSe_2$*, presented at MRS-Spring Meeting, San Francisco, USA 16.–20. April 2001

T. Chassé, *Bindung, Struktur und Reaktionen in geordneten Schichten und selbstorganisierenden Systemen,* Kolloquium, Universität Tübingen, Institut für Physikalische und Theoretische Chemie 26. April 2001

C. Damm, *Methoden zur Reinheitsprüfung von Festkörperproben eines Benzidin-Typ-Lochleiters*, Innovationsforum "Funktionelle Schichten", Wolfen 26.04.2001

R. Mehnert, E. Hartmann, H.-J. Gläsel, S. Rummel, F. Bauer, A. Sobottka, C. Elsner, *Funktionelle Schichten durch UV- und Elektronenstrahlhärtung*, Innovationsforum "Funktionelle Schichten", Wolfen 26.04.2001

J. Dienelt, K. Zimmer, *Der Einfluss der Oberflächentemperatur auf die Ätzrate des chemisch unterstützten Ionenstrahlätzens von GaAs mit Chlor*, III-V-Trockenätz-Workshop, Universität Ulm 27. April 2001

K.J. Wolter, T. Zerna, R. Deltschew, H. Neumann, *Plasma Treatment Process For Fluxless Reflow Soldering*, 51st Electronic Components & Technology Conference, Orlando, Florida 29.04.–01.05.2001

A. Tauber, *UV curing of pressure sensitive adhesives: from mechanistic aspects towards practical applications*, RadTech Asien 2001, Kunming (China) Mai 2001

J. Meinhardt, *Plasmapolymerisations- und Plasma-CVD-Verfahren für die Mikrosystemtechnik*, VDI-Seminar "Plasmapolymerisation und Plasma-CVD", Düsseldorf 07.–08.05.2001

R. Mehnert, *EBC coatings - properties and application in the wood working industry*, Kunz-Holding-Symposium, Session II - Surface Technology and Materials, Leipzig 25.–26.05.2001

K. Hasche, K. Herrmann, G. Ulm, S. Schädlich, W. Frank, M. Procop, *Calibrated Reference Standards for Films in the Nanometre Range*, Proceedings of the EUSPEN 2nd Int. Conf., Turin, May 2001, pp. 396–399, 27.–30.05.2001

T. Chassé, *Spectroscopy of epitaxial layers and self-assembled systems on semiconductors: Photoemission view on arsenic and sulfur-passsivated InP surfaces,* Colloquium, Chalmers University of Technology, Dept. Phys., Göteborg/Schweden 31. Mai 2001

T. Scherzer, *Kinetic investigations on the effect of temperature on the photopolymerization of acrylates,* International Symposium on Free Radical Polymerization, Lucca 03.–08.06.2001

S. Mändl, P. Huber, D. Manova, B. Rauschenbach, *Lateral Homogeneity Variation in Metal Plasma Immersion Ion Implantation and Deposition*, EMRS Spring Meeting, Strasbourg 04.–08.06.2001

R. Sader, S. Mändl, D. Krause, G. Thorwarth, H. H. Horch, B. Rauschenbach, *Investigation on Plasma Immersion Ion Implantation Treated Medical Implants*, EMRS Spring Meeting, Strasbourg 04.–08.06.2001

D. Manova, D. Schreck, S. Mändl, B. Stritzker, B. Rauschenbach, *Orientation Dependent Sputter Yield of Aluminium,* EMRS Spring Meeting, Strasbourg 05.–08.06.2001

F. Frost, *Selbstorganisierte Nanometerstrukturen durch Ionenstrahlerosion,* Universität Leipzig, 07.06.2001

F. Bauer, *Einsatz von isotop-markierten Verbindungen zur Mechanismusaufklärung*, Institut für Technische Chemie, Universität Leipzig, Leipzig 19.06.2001

J.-D. Hecht, F. Frost, A. B. Preobrajenski, T. Chassé, *X-Ray Absorption Near Edge Structure and Photoemission Investigations of Nitrided AIII-BV Semiconductor Surfaces,* 11. Tagung Festkörperanalytik, Chemnitz 25.-28. Juni 2001

M. Procop, M. Radtke, M. Krumrey, K. Hasche, S. Schädlich, W. Frank, *EMPA measurement of thin-film thickness in the nanometre range*, 1. Tagung "Festkörperanalytik, Chemnitz 25.-28.06.2001

P. Huber, D. Manova, S. Mändl, B. Rauschenbach, *Lateral Texture Evolution During Formation of TiN by MePIIID*, 6th Int. Workshop on Plasma Based Ion Implantation, Grenoble 26.–29.06.2001

S. Sienz, S. Mändl, B. Rauschenbach, *In Situ Stress Measurements During Low Energy Nitriding of Stainless Steel*, 6th Int. Workshop on Plasma Based Ion Implantation, Grenoble 26.–29.06.2001

E. Dayss, G. Leps, J. Meinhardt, A. Wutzler, *Charakterisierung von plasmamodifizierten Polymeroberflächen*, 2. Oberflächentechnisches Kolloquium, Merseburg, Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg 28.06.2001

J. Meinhardt, R. Mehnert, S. Howitz, *PECVD-Oberflächenbeschichtungen für die Mikrosystemtechnik*, II. Oberflächentechnisches Kolloquium, Merseburg, Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg 28.06.2001

R. Deltschew, M. Tartz, V. Plicht, E. Hartmann, H. Neumann, H. J. Leiter, J. Esch, *Sputter yield measurements of graphite and carbon-carbon material for ion thruster grids*, 37th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference, Salt Lake City, Utah 08.–11.07.2001

F. Bauer, A. Freyer, *Use of coke-selectivated H-ZSM-S in xylene isomerization*, 13th Internat. Zeolite Conference, Montpellier 08.–13.07.2001

S. Mändl, B. Stritzker, B. Rauschenbach, *In Situ Diffusion Measurements During RBS Analysis of Polymers Coated with Aluminium*, 15th Int. Conference on Ion Beam Analysis, Cairns 15.–20.07.2001

J.W. Gerlach, S. Sienz, W. Attenberger, B. Rauschenbach, *Influence of defects in low-energy nitrogen ion beam assisted gallium nitride thin film deposition*, International Conference on Defects in Semiconductors (ICDS), Gießen 16.–20.07.2001

F. Frost, *Selbstorganisierte geordnete Nanometerstrukturen durch Ionenstrahlerosion,* Universität Augsburg, 19.07.2001

T. Chassé, K.-H Hallmeier, J.-D. Hecht, F. Frost, *X-ray absorption near edge structure and photoemission investigations of nitrided AIII-BV semiconductor surfaces*, Int. Conf. on VUV Radiation Physics (VUV-XIII), Trieste (Italy) 23.-27.07.2001

S. Mändl, *Homogeneity Investigations for Plasma Immersion Ion Implantation and Metal Plasma Immersion Ion Implantation & Deposition,* University of Sydney, Applied Physics Department 24.07.2001

S. Mändl, *Nitriding of Stainless Steel and Aluminum by PIII*, Australian Nuclear Science & Technology Organisation, Lucas Heights 26.07.2001

F. Frost, D. Hirsch, A. Schindler, B. Rauschenbach, *AFM tip calibration using nanometer-sized structures induced by ion beam sputtering*, SPIE's 46th Annual Meeting, San Diego, USA 29.07.–03.08.2001

A. Schindler, T. Hänsel, D. Flamm, W. Frank, G. Böhm, F. Frost, R. Fechner, F. Bigl, B. Rauschenbach, *Ion beam and plasma jet etching for optical component fabrication*, SPIE's 46th Annual Meeting, San Diego, USA 29.07.–03.08.2001

A. Schindler, T. Hänsel, G. Böhm, W. Frank, A. Nickel, B. Rauschenbach, F. Bigl, *Precision optical asphere fabrication by plasma jet etching and ion beam figuring*, SPIE's 46th Annual Meeting, San Diego, USA 29.07.–03.08.2001

T. Hänsel, A. Nickel, A. Schindler, *Stitching interferometry of aspherical surfaces,* SPIE's 46th Annual Meeting, San Diego, USA 29.07.–03.08.2001

A. Schindler, T. Hänsel, D. Flamm, W. Frank, G. Böhm, F. Frost, R. Fechner, *Ion beam and plasma jet technologies for precision optical surface processing*, Regular Meeting, EUV Optics Group, Lawrence Livermore National Laboratory, Livermore USA, 6th Aug. 2001

T. Scherzer, *Depth profiling of the conversion during the photopolymerization of acrylates using real-time FTIR-ATR spectroscopy,* ICAVS-1, 1st International Conference on Advanced Vibrational Spectroscopy, Turku 19.–24.08.2001

T. Scherzer, A. Tauber, R. Mehnert, *UV curing of pressure sensitive adhesives studied by real-time FTIR spectroscopy,* ICAVS-1, 1st International Conference on Advanced Vibrational Spectros-

copy, Turku 19.–24.08.2001

F. Bauer, V. Sauerland, H. Ernst, A. Freyer, H.-J. Gläsel, R. Mehnert, *Application of MALDI-TOF mass spectroscopy to the surface characterization of silane modified silica and alumina nanoparticles*, ESOPS-14, Dresden 02.–05.09.2001

T. Scherzer, *Effects of temperature on the photoinitiated polymerization of acrylates studied by real-time FTIR-ATR spectroscopy,* ESOPS-14, Dresden 02.–05.09.2001

T. Scherzer, *Real-time FTIR-ATR spectroscopy of photopolymerization reactions*, ESOPS-14, Dresden 02.–05.09.2001

T. Scherzer, A. Tauber, R. Mehnert, *Photopolymerization of aqueous urethane acrylate dispersions. A comparative study by real-time FTIR spectroscopy and curing in pilot scale,* ESOPS-14, Dresden 02.–05.09.2001

M. Tartz, E. Hartmann, R. Deltschew, H. Neumann, *Effects of aperture displacement in broad-beam ion extraction systems*, Int. Conf. on Ion Sources – ICIS, Oakland 03.–07.09.2001

A. Schindler, T. Haensel, D. Flamm, W. Frank, G. Boehm, F. Frost, R. Fechner, F. Bigl, B. Rauschenbach, *Ultra Precision Surface machining by Ion Beams and Plasma Etching,* Sino-German Symposium on Micro Systems and Nano Technology, Braunschweig, 7-9 September 2001

A.V. Ankudinov, V.A. Kosobukin, S.O. Romanovsky, A.V. Selkin, A.N. Titkov, D. Hirsch, F. Silva-Andrade, *Resonant diffuse reflection of light from randomly rough CdS surfaces characterized by atomic force microscopy,* 10th International Conference on II-VI Compounds, Bremen 09.–14.09.2001

T. Chassé, A.B. Preobrajenski, *Structure formation by sulfurization of compound semiconductor surfaces*, II International Seminar on Semiconductor Surface Passivation – SSP'2001, Ustron/Polen 10.–13. September 2001

J.-D. Hecht, F. Frost, T. Chassé, *Low-Energy Ion Beam Nitridation of AIII-BV Semiconductor Surfaces Studied by X-Ray Absorption Near Edge Structure and Photoemission Measurements*, II International Seminar on Semiconductor Surface Passivation - SSP'2001, Ustron/Polen 10.-13. September 2001

A.V. Ankudinov, V.A. Kosobukin, S.O. Romanovsky, A.V. Selkin, A.N. Titkov, D. Hirsch, F. Silva-Andrade, *Resonant diffuse reflection of light from randomly rough CdS surfaces characerized by atomic force microscopy (in Russian)*, 5th Russian Conference on the Physics of Semiconductors, Nishni-Novgorod 10.–14.09.2001

J.W. Gerlach, S. Sienz, B. Rauschenbach, *Influence of ion beam induced defects on the structure of thin epitaxial gallium nitride films grown by low-energy ion beam assisted deposition*, 5th Autumn School 'X-ray Scattering from Surfaces and Thin Layers', Smolenice/Slovakia 12.–15.09.2001

S. Naumov, I. Janovský, W. Knolle, R. Mehnert, *Quantenchemische Berechnung der Hyperfeinkopplungskonstanten organischer Radikale*, Strahlenchemikertreffen, Naumburg 17.-20.09.2001

T. Scherzer, W. Knolle, S. Naumov, R. Mehnert, *Photoinitiatorfreie UV-Härtung von Acrylaten*, Strahlenchemikertreffen, Naumburg 17.–20.09.2001

J. Dienelt, K. Zimmer, B. Rauschenbach, *Etching behaviour of GaAs with chlorine chemically assisted ion beam etching depending on the surface temperature,* GaAs 2001 Conference Proceedings, The 9th European Gallium Arsenide and other semiconductors Application Symposium, London 2001, 24.-25.09. 2001

F. Bauer, A. Freyer, H. Ernst, V. Sauerland, R. Mehnert, H.-J. Gläsel, *Surface characterization of modified inorganic nanoparticles in scratch resistant polymeric composite materials*, Chemical Nanotechnology Talks II, Frankfurt/M. 08.-09.10.2001

H.-J. Gläsel, F. Bauer, E. Hartmann, H. Langguth, R. Mehnert, *Radiation-cured nanocomposite coatings of enhanced physical and chemical surface properties*, Chemical Nanotechnolgy Talks II, Frankfurt/M. 08.–09.10.2001

T. Scherzer, W. Knolle, S. Naumov, R. Mehnert, *UV-curing without photoinitiators*, RadTech Europe 2001, Basel 08.–10.10.2001

M. Lenk, L. Prager, R. Mehnert, *Design and performance characteristics of a windowless argon excimer source*, RadTech Europe 2001, Basel 08.–10.10.2001

R. Mehnert, *Degree of cure – measurement and process control*, RadTech Europe 2001, Basel 08.–10.10.2001

R. Mehnert, A. Sobottka, C. Elsner, *Microstructured polyacrylate surfaces generated by UV & EB curing*, RadTech Europe 2001, Basel 08.-10.10.2001

A. Tauber, A. Prager-Duschke, *UV-curing using vinyl ethers. 308 nm excimer lamps as radiation source and on-line monitoring of the curing process by ion mobility spectroscopy*, RadTech Europe 2001, Basel 08.–10.10.2001

R. Deltschew, M. Tartz, V. Plicht, E. Hartmann, H. Neumann, H.J. Leiter, J. Esch, *Sputter characteristics of carbon-carbon compound material*, 27th Int. Electric Propuls. Conf., Pasadena, CA, 15.-19.10.2001

M. Tartz, E. Hartmann, R. Deltschew, H. Neumann, *Thrust vector deflection by grid misalignment*, 27th Int. Electric Propuls. Conf., Pasadena, CA, 15.-19.10.2001

P. Crimmann, G. Leps, J. Meinhardt, J. Adhikari, *Oberflächenmodifizierung von Polypropylen zur Metallisierung mit Kupfer*, 9. Neues Dresdener Vakuumtechnisches Kolloquium, Dresden 18.-19.10.2001

R. Mehnert, G. Blasek, U. Kestler, H. U. Poll, S. Schreiter, R. Mix, *Oberflächenglättung mittels Plasmapolymerisation*, 9. Neues Dresdner Vakuumtechnisches Kolloquium, Dresden 18.-19.10.2001

R. Mehnert, E. Hartmann, H.-J. Gläsel, S. Rummel, F. Bauer, A. Sobottka, C. Elsner, *Funktionale Schichten durch UV- und Elektronenstrahlhärtung*, 9. Neues Dresdner Vakuumtechnisches Kolloquium, Dresden 18.–19.10.2001

H. Neumann, M. Zeuner, F. Scholze, B. Rauschenbach, T. Chassè, B. Dathe, B. Faust, F. Frost, *Broad Beam Ion Sources and their Applications*, eingeladener Vortrag Ruhr-Uni Bochum, Physik, Prof. Zabel, 06.12.2001

J. W. Gerlach, S. Sienz, B. Rauschenbach, *Anwendungen der Röntgenstrahl-Texturanalyse bei der Untersuchung epitaktisch abgeschiedener Galliumnitridschichten*, 16. Workshop des DGKK-Arbeitskreises "Epitaxie von III/V-Halbleitern", Berlin 06.–07. Dezember 2001

Bearbeitete Projekte

BMBF, Carl Zeiss Oberkochen, Roth&Rau GmbH Wüstenbrand, AIS GmbH Dresden, INP Greifswald, A. Schindler, 11/96-04/00, „Lokales Hochrateplasmaätzen zur Veredlung optischer Oberflächen - Grundlagen und Technologien (PACE)“

BMBF, Forschungszentrum Karlsruhe, PTWT, L. Prager, 6/97-5/00, „Elektronenstrahlverfahren für BTEX-Abbau“.

BMBF, Sengewaldverpackungen GmbH, P. Klenert, 7/99-6/02, „Prototypische Entwicklung einer Inline Kaschierung für strahlenhärtbare Verpackungsverbunde im Flexodruck“.

BMBF, Umweltforschungszentum Leipzig/Halle GmbH (UFZ), K. Zimmer, 1/99-12/00, „Excimerlaserbearbeitung zur Oberflächenstrukturierung und -modifizierung von Mikroelektrodenarrays“.

BMBF, E. Hartmann, 07/99-11/01 „Optimierung von Gittersystemen für elektrostatische Triebwerke“.

BMBF, A. Schindler, Carl-Zeiss Oberkochen, 08/00-08/01 „Direktbearbeitung strukturierter Beleuchtungskomponenten für die EUV-Lithographie“, Unterauftrag CZ.

BMBF, A. Schindler, Physikalisch-Technische Bundesanstalt Braunschweig, 01/00-12/02 „Kalibrierte Schichtdickenmaßverkörperungen für Nanometerschichten“, Teilprojekt „Ionenstrahlbearbeitungstechnologien zur Herstellung von Substraten und Nanometerschichten“, Unterauftrag PTB.

BMBF, H. Neumann, Ziegler Feinwerktechnik GmbH, IOT – Innovative Oberflächentechnologien GmbH, 04/01-03/03 „Herstellungstechnologie und Charakterisierung von nitrierten Metallgittersystemen für Breitstrahlionenquellen“.

BMBF, R. Mehnert, 01/99-08/02 „Entwicklung umweltgerechter Farben und Verfahren für den Verpackungstiefdruck“.

BMBF, E. Hartmann, Projektträger Jülich, 04/01-03/04 „Kratz- und abriebfeste polymere Nanokomposit-Beschichtungen, strahlengehärtete Nanokomposit-Beschichtungen“.

BMBF, A. Schindler, 06/01-01/04 „Nanometer-Optikkomponenten, Ionenstrahl- und Plasmabearbeitungstechnologien“.

BMBF, H. Neumann, Ernst-Moritz-Arndt-Universität Greifswald, 02/01-01/04 Fa. Jenion, „Grundlegende Untersuchungen zur Anpassung des Strahlprofils von Breitstrahlionenquellen“.

BMBF, B. Rauschenbach, 08/01-12/01 „Innovationslabor zur Strukturierung von anorganischen Materialien“.

BMBF, B. Rauschenbach, 04/01-03/04 „Aufbau einer Experimentiereinrichtung zur in-situ-Charakterisierung bei der Synthese von vergrabenen, optisch transparenten Übergangsmetalloxidschichten durch Hochenergie-Ionenbestrahlung“.

BMBF, T. Chassé, 04/01-03/04 „Röntgenbeugung und Spektroskopie an ionengestützt abgeschiedenen Gruppen-III-N-Epitaxieschichten auf fehlangepassten Substraten“.

DFG, F. Bauer, 11/98-10/00, „Desaktivierung von Zeolith-Katalysatoren“.

DFG, R. Mehnert, 8/98-7/01, „Theoret. Behandlung photochemischer Oberflächenreaktionen“.

DFG, Universität Leipzig, F. Bigl, 1/96-12/00, „Molekulare Prozesse der Zelloberfläche (INK)“.

DFG, Universität Leipzig, F. Bigl, 1/98-12/00, „Abscheidung von III-Nitriden“.

DFG, Universität Leipzig, Inst. f. Anorganische Chemie, K. Zimmer, D. Hirsch, 1/96-12/00, „Nanometerstruktur mittels Scanningmikroskop-Techniken (STM, ECAFM) (INK)“.

DFG, Universität Leipzig, Inst. f. Experimentalphysik II, R. Schwabe, 5/98-4/00, „Einsatz alternativer Quellen beim MOVPE-Wachstum von kubischen (Ga,In)(N,P,As)-Heterostrukturen auf verschiedenen A(III)-B(V)-Halbleitersubstraten“.

DFG-Forschergruppe am IOM „Teilchenstrahlstimulierte ultrapräzise Oberflächenbearbeitung“,

V. Gottschalch und C. Engler (Uni Leipzig), H. Scheer (Uni Wuppertal), H.-E. Wagner (Uni Greifswald), A. Tünnermann und E.-B. Kley (Uni Jena), U. Gösele (MPI Halle), A. Schindler (Sprecher), R. Mehnert, F. Frost, R. Schwabe, K. Zimmer, E. Hartmann, 12/99–12/02,

mit folgenden Projekten (nur IOM):

F. Frost, T. Chassé, „Oberflächenglättung im Sub-Nanometer-RMS-Bereich durch (reaktives) Ionenstrahlätzen“,

K. Zimmer, D. Flamm, „Ionen- und plasmagestützte Übertragung dreidimensionaler Strukturen im µm-und Sub-µm-Bereich“,

R. Mehnert, „Replikation dreidimensionaler Strukturen im Nanometerbereich mit strahlenhärtbaren Polymeren“,

A. Schindler, (M. Zeuner) „Mechanismen und Dynamik der lokalen Plasma-Jet-Oberflächenbearbeitung“,

C. Engler, T. Chassé „Quantenchemische Untersuchungen zum Reaktionsverhalten von Gasphasenspezies an Halbleiteroberflächen bei Abscheidungs- und Ätzprozessen“,

R. Schwabe, A. Schindler „Mikrooptiken und -strukturen in III-V-Halbleiterschichtanordnungen: Grundlagenuntersuchungen und Anwendungen“,

A. Schindler, „Ionenstrahlgestütztes Direktbonden heterogener Materialien“,

E. Hartmann, „Optimierung und gezielte Formung von Ionenstromdichteprofilen für die Ultrapräzisions-Oberflächenbearbeitung“

DFG, F. Frost, 05/01-04/03 „Selbstorganisierende Nanometerstrukturen durch Ionenstrahlerosion“.

DFG, B. Rauschenbach, 07/00-06/02 „Synthese von vergrabenen und optisch transparenten Übergangs-Metalloxidschichten durch Hochdosis-Ionen-Implantation“.

DFG, B. Rauschenbach, 11/00-02/02 „Ionen-/Atomstrahlgestützte Synthese von epitaktischen Galliumnitrid-Schichten“.

DFG, F. Bauer, 11/00-04/02 „Modifizierung von Zeolitheigenschaften durch gezielte Ablagerung von Koks“.

DFG, K. Zimmer, 09/01-08/03 „Laserstrahl-induziertes Rückseitenätzen dielektrischer Materialien“.

SMWA, GeSIM, J. Meinhardt, 3/99-12/00, „PECVD modifizierte Targets mit Mikrostrukturen für die Biotechnologie; Teilthema: PECVD-Technologien“.

SMWK, Umweltforschungszentrum Halle/Leipzig, Uni Leipzig, HTWK Leipzig, Biotechnologie & Analytik Leipzig, F. Bauer, 7/98-12/00, „Erzeugung von synthetischem Benzin aus Bioalkohol“.

SMWK, Inst. f. Kern- u. Teilchenphysik, TU Dresden, E. Hartmann, 7/98-12/00, „Optimierung strahlentechnologischer Basisprozesse für Werkstoffforschung, Oberflächen- und Schichttechnologie sowie Umwelttechnik“.

SMWK, Interdisziplinäre Arbeitsgruppe Uni Leipzig, R. Mehnert, 7/98-12/00, „Theoretische Behandlung photochemischer Oberflächenreaktionen von Nanometerteilchen mit modernen diffusionskinetischen Konzepten“.

SMWK, K. Zimmer, 07/01-12/03 „Antworten retinaler Zellen auf mechanische Belastung: Netzhautchirurgische Konsequenzen“.

SMWK, R. Mehnert, 01/01-08/01 „ Diffusionskinetische Behandlung von Photoionisationsprozessen in nanostrukturierten Systemen“.

SMWA, AMTEC GmbH, A. Schindler, 7/97-9/00, „Miniaturisierter Totalreflexions-Röntgenfluoreszenz-Analysator; Teilthema: Physikalische und technische Grundlagen“.

SMWA, Bruker Saxonia Analytik GmbH, R. Schwabe, 7/98-12/00, „Entwicklung von optoelektronischen Komponenten für ein mobiles FTIR-Spektrometer zur Schadstoffanalyse“.

SMWA, Bruker Saxonia Analytik GmbH, K. Zimmer, 7/98-12/00, „Entwicklulng eines miniaturisierten Ionenmobilitätsspektrometers (IMS) und miniaturisierter Komponenten für die Bioanalytik mit Hilfe von MALDI-TOF“.

SMWA, DTVa Dresden, J. Meinhardt, 7/99-12/00, „Plasmaverfahren zur Oberflächenglättung für im Vakuum zu beschichtende Teile“.

SMWA, Fraunhofer-Inst. Werkstoff- und Strahltechn. Dresden, A. Schindler, 7/98-12/00, „Optimierung nanostrukturierter Grenzschichten in Multischichtsystemen für röntgenoptische Anwendungen – Teilprojekt“.

SMWA, FZ Rossendorf u. a., H. Neumann, 7/97-6/00, „Härtung von Edelstahl durch großflächige Niederenergie-Ionenstrahlimplantation“.

SMWA, G. Lippold, 6/99-5/01, „Ionenstrahlgestütztes Verfahren zur Herstellung des aktiven Bereichs von $CuInSe_2$-Dünnschichtsolarzellen“.

SMWA, A. Schindler, NTGL, „Entwicklung von Technologien und Anlagen zur Oberflächenplanarisierung und ultragenauen Oberflächenformgebung von optischen, röntgenoptischen und mechanischen Komponenten“ 10/01-09/03.

SMWA, H. Neumann, FZ Rossendorf, AIS-GmbH, Ostec GmbH. „Aufsticken von Edelstahloberflächen“ 04/00-09/02.

Patente

A. Braun, K. Zimmer, F. Bigl, „Verfahren und Vorrichtung zur Abschwächung eines in einem Opti-

schen Strahlengang geführten Lichtstromes“, AT: angemeldet.

B. Hößelbarth, R. Mehnert, K. Weidig, D. Becker, K. Gumbiowski, W. Sack, „Support material for image-recording processes“, AT: 05.12.00, Pat.Nr. 6,156,420, Akte 80/246 US, Partner: Felix Schoeller, internat. Patentanmeldung.

S. Rummel, R. Mehnert, H.-J. Gläsel, H. Langguth, „Verfahren zur Herstellung von strahlenhärtbaren Beschichtungsformulierungen und Verwendung dieser zur Erzeugung von kratz-, abrieb- u. haftfesten Beschichtungen“, AT: 13.12.00 Akz.: PCT/EP00/12669.

J. W. Gerlach, S. Bader, A. Lell, B. Hahn, H.-J. Lugauer, V. Härle, R. Handschuh, „Verfahren zur Herstellung einer Nitridschicht auf einem Substrat und mit dem Verfahren hergestelltes Quasisubstrat“, AT: 20.05.00, 100 25 562.0, Partner: Osram Opto Semiconductors Regensburg.

Förderung/Qualifizierung

Ehrungen/Preise/Berufungen

Prof. Dr. habil. F. Bigl

wurde mit dem Bundesverdienstkreuz erster Klasse der Bundesrepublik Deutschland für seine Verdienste als Gründungsdirektor des Institutes für Oberflächenmodifizierung Leipzig ausgezeichnet.

Dr. S. Mändl

wurde mit dem Preis der Gesellschaft für Plasmatechnologie Deutschland für seine Arbeiten auf dem Gebiet der Plasma-Immersions-Ionenimplantation ausgezeichnet;

Prof. Dr. habil. B. Rauschenbach

wurde in das Kuratorium der Stiftung für Innovation und Technologietransfer berufen;

Lehrveranstaltungen

PD Dr. habil. F. Bauer

Radioaktivität, Kernenergie und Strahlenschutz
Vorlesung WS 2001/2002, Hochschule für Technik, Wirtschaft und Kultur Leipzig, Fachbereich Maschinen- und Energietechnik

Prof. Dr. habil. T. Chassé

Spektroskopische und mikroskopische Methoden zur Untersuchung von Festkörperoberflächen
Vorlesung SS 2000, SS 2001, Universität Leipzig, Fakultät für Chemie und Mineralogie

PD Dr. E. Hartmann

Fortgeschrittenen-Praktikum bis SS 2001, Universität Leipzig, Fakultät für Physik und Geowissenschaften

Prof. Dr. habil. B. Rauschenbach

Physik dünner Schichten: Keimbildung, Wachstum, Epitaxie, Struktur
Vorlesung WS 2000/2001, Universität Leipzig, Fakultät für Physik und Geowissenschaften

Ionen-Festkörper-Wechselwirkung
Vorlesung SS 2001, Universität Leipzig, Fakultät für Physik und Geowissenschaften

Physikalische Grundlagen der Oberflächen- und Dünnschichtanalytik
Vorlesung WS 2001/2002, Universität Leipzig, Fakultät für Physik und Geowissenschaften

PD Dr. habil. A. Schindler

Moderne Oberflächen- und Schichttechnologien – Grundlagen und Anwendungen
Vorlesung SS 2000, WS 2000/2001, Universität Leipzig, Fakultät für Physik und Geowissenschaften

Dünnschichttechnologie magnetischer und supraleitender Schichten, Teil I: Moderne Oberflächen- und Schichttechnologien – Grundlagen und Anwendungen
Ringvorlesung SS 2001, Universität Leipzig, Fakultät für Physik und Geowissenschaften

Oberflächen- und Dünnschichtanalytik
Vorlesung im Rahmen des Aufbaustudiums "Analytik und Spektroskopie", Mai 2000 und Mai 2001, Universität Leipzig, Fakultät für Chemie und Mineralogie

Nanometer Precision Ion Beam Figuring of Optical Surfaces
Two session lecture at the 6th Annual Center for Optics Manufacturing / Institute of Optics - Summer School on "New Machines, Tools, and Processes for Modern Optics Manufacturing", University of Rochester, June 12-15, 2000, Rochester, NY, USA

Dissertationen

J. v. Sonntag, „Kinetische Untersuchungen zur Photochemie des Maleimids und seiner Derivate. Beiträge zum Mechanismus selbstinitiierter radikalischer Polymerisationen“, Universität Leipzig, Fakultät für Chemie und Mineralogie (2000).

G. Böhm, „Ladungsträgerdynamik und optische Nichtlinearität im (Al,Ga)As-Mischkristall und (GaAs)(AlAs)-Supergittern nahe des Direkt-Indirekt-Übergangs“, Universität Leipzig, Fakultät für Physik und Geowissenschaften (2000)

L. Prager, „Abbau chlorierter Ethene in Abluft aus Grundwasser- und Bodensanierungsanlagen: 222-nm-Bestrahlung, alkalische Wäsche und thermische Nachbehandlung der Waschlauge“, Universität Leipzig, Fakultät für Chemie und Mineralogie (2000).

Gegenwärtig beschäftigte Doktoranden
(Arbeitsgebiete)

T. Arnold, (Plasmacharakterisierung bei PACE)

A. Braun, (Oberflächenformgebung von synthetischen Polymeren mittels UV-Laserablation)

J. Dienelt, (Chemisch unterstützte Ionenstrahlprozesse)

M. Gerhardt, (MOVPE von Laserstrukturen mit alternierenden Gruppe-V-Quellen)

J.-D. Hecht, (Modifizierung von Halbleiteroberflächen durch niederenergetische Ionen)

S. Jankuhn, (Elementanalytik biologischer Proben)

E. Mvula, (Pulsradiolyse wässriger Systeme am LINAC Elektronika)

K. Otte, (Modifizierung von $Cu(In,Ga)Se_2$ mit Niederenergie-Ionenstrahlen)

F. Pietag, (Optische Charakterisierung von III-V-Verbindungshalbleitern)

N. Razek, (Ionenstrahlgestütztes Waferbonden)

A. Sidorenko, (Röntgenbeugung und Spektroskopie an ionengestützt abgeschiedenen Gruppe-III-N-Epitaxieschichten auf fehlangepassten Substraten)

S. Sienz, (Ionenstrahlgestützte GaN-Schichtdeposition)

M. Tartz, (Modellierung von Ladungstransportprozessen)

Diplomarbeiten

T. Arnold, „In situ-Untersuchungen zum plasmachemischen Hochrateätzen von Silizium“, Universität Leipzig, Fakultät für Physik und Geowissenschaften, (2000).

R. Böhme, “Untersuchungen zum laserinduzierten Flüssigkeits-Rückseitenätzen von UV-transparenten Materialien mit dem Excimerlaser“, Hochschule für Technik und Wirtschaft Mittweida (FH)

E. Erdem, „Preparation and Characterisation of Ferroelectric/Ferromagnetic Polymeric Nanocomposits”, Universität Leipzig (2001).

I. Sander, „Einfluss von Nanopartikeln auf die Barriereeigenschaften strahlenhärtbarer Acrylatformulierungen“, Hochschule für Technik, Wirtschaft und Kultur Leipzig, Fachbereich Polygrafische Technik (2001).

Praktika

2000/01 führten 16 Studenten mehrwöchige Praktika im IOM durch.

Gastwissenschaftler

Dr. H. Abdel-Rehim, Ägypten, Internationale Atomenergie-Organisation (IAEA)
E. S. Akcadag, Türkei, Universität Leipzig
Prof. E. V. Charnaya, Russland, Staatliche Universität St. Petersburg
Prof. A. Dessouki, Ägypten, IAEA
Dr. N. El-Kelesh, Ägypten, National Centre for Radiation Research and Technology
Dr. R. Flyunt, Ukraine, Max-Planck-Institut Mülheim/Ruhr
N. Grigorieva, Russland, Staatliche Universität St. Petersburg
Dr. J. Jakabovic, Slowakei
Dr. I. Janovský, Tschechien, IAEA
Dr. J. Kovác, Slowakei, Slovak University of Technology, Bratislava
Prof. N. R. Kumar, Malaysia, Universität Malaysia
Dr. N. G. Nik-Salleh, Ägypten, IAEA
Prof. B. V. Novikov, Russland, Staatliche Universität St. Petersburg
S. Romanovski, Russland, Staatliche Universität St. Petersburg
M. Z. Salleh, Malaysia, IAEA
Prof. C. v. Sonntag, Deutschland, Max-Planck-Institut Mülheim/Ruhr
Dr. D. Tyurin, Russland, Russische Akademie der Wissenschaften
Dr. K. Vacek, Tschechien
D. Yaskov, Russland, Staatliche Universität St. Petersburg
Dr. S. M. Yunusov, Russland, Russische Akademie der Wissenschaften

Sonstiges

Beteiligungen und Mitgliedschaften des IOM

Kompetenzzentren der Nanotechnologie: „Ultrapräzisions-Oberflächenbearbeitung e. V.“ (CC-UPOB) und „Ultradünne Funktionale Schichten“ (CC-UFS)

Kooperationsverbund Mikromechanik, Mikrooptik, Optoelektronik MIMO mit der Universität Leipzig und der Fa. Bruker Saxonia

Europäische Fördergemeinschaft Dünne Schichten (EFDS)

IOM-Beteiligung an Messen und Ausstellungen

Hannover Messe Industrie 20.-25. März 2000
Gemeinschaftsstand „Forschungsland Sachsen“

Tage der Universität Campus 2000 der Universität Leipzig
30. Juni-01. Juli 2000

Hannover Messe Industrie 23.-28. April 2001

Laser 2001, Messe München 18.-22. Juni 2001
Gemeinschaftsstand „Forschungsland Sachsen“

Tage der Universität Campus 2001 der Universität Leipzig
01.-02. September 2001