

# Schlussbericht

zum BMBF-Vorhaben:

## Compact Optohybrids (CoOp)

Teilvorhaben:

## Ionenätzverfahren für die Strukturierung

*Förderkennzeichen:* 16 SV 1809  
*Zuwendungsempfänger:* IOM Leipzig  
*Laufzeit des Vorhabens:* 01.01.2003 – 31.08.2005  
*Projektleiter:* Dr. Axel Schindler  
*Autoren:* Axel Schindler, Dieter Flamm, Thomas Hänsel, Georg Böhm  
*Tel.:* 0341 235 2234  
*Fax:* 0341 235 2595  
*E-Mail:* axel.schindler@iom-leipzig.de

**Leipzig, Juli 2006**

## Inhalt

<b>1 BMBF- Verbundvorhaben CoOp - Ergebnisse des Teilvorhabens des IOM Leipzig</b>	
<b>„Ionenätzverfahren für die Strukturierung“ .....</b>	<b>3</b>
1.1 Kurzdarstellung .....	3
1.1.1 Aufgabenstellung und Voraussetzungen unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde	3
1.1.2 Planung und Ablauf des Vorhabens .....	3
1.1.2.1 Beiträge zu AP 2.2 und 3.1 Prozessentwicklung Strukturierung .....	4
1.1.2.2 Beiträge zu AP 2.3 Grautonstrukturierung mit HEBS, 3D-Taper mit Grautonstrukturierung.....	4
1.1.2.3 Beiträge zu AP 2.3 Alternativtechnologien .....	4
1.1.3 Wissenschaftlicher und technischer Stand .....	5
1.1.4 Zusammenarbeit mit anderen Stellen .....	6
1.2 Eingehende Darstellung .....	7
1.2.1 Ergebnisse.....	7
1.2.1.1 Erzeugung von 3D Topologien als mögliche Taperstrukturerzeugung .....	7
1.2.1.2 Untersuchungen zur Transmissionsvariation von Gelbglasproben der Fa. FOB mittels Ionenstrahlabtrag .....	9
1.2.1.3 Untersuchungen zur Erzeugung von 3D-Strukturen mit schreibenden Strahlwerkzeug .....	9
1.2.2 Voraussichtlicher Nutzen und Verwertbarkeit der Ergebnisse.....	13
1.2.3 Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen .....	13
1.2.4 Veröffentlichungen der Ergebnisse .....	14

# **1 BMBF- Verbundvorhaben CoOp - Ergebnisse des Teilvorhabens des IOM Leipzig „Ionenätzverfahren für die Strukturierung“**

## **1.1 Kurzdarstellung**

### **1.1.1 Aufgabenstellung und Voraussetzungen unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde**

Ziel des Teilvorhabens ist die Entwicklung bzw. Anpassung/Optimierung von reaktiven Ionen-(strahl)ätzverfahren (RIE – reactive ion etching bzw. RIBE – reactive ion beam etching) für die Herstellung Wellenleiter-, 3D-Taper- und Umlenkspiegelstrukturen in den relevanten harten optischen Materialien. Hauptaugenmerk liegt dabei auf der Qualität der Seitenwände (senkrechte Wände bei den Wellenleitern und Spiegeln und Formtreue bei den durch Proportionaltransfer von 3-D Resistmasken zu übertragenden Tapern). Hier arbeitet das IOM sehr eng mit der Universität Jena zusammen, die die entsprechenden Masken auf den Wafern herstellt. Im Vergleich mit Ätzverfahren an der Uni Jena werden im IOM Ätzrezepturen zur Ionenstrahlübertragung, eingeschlossen der so genannte 3D-Proportionaltransfer, entwickelt.

Ein zweites Hauptaugenmerk ist für alle in das optische Material zu übertragenden Strukturen die Minimierung der Rauheit der Oberflächen und der Seitenwände. Neben der diesbezüglichen Optimierung der Ätzprozesse sollen gegebenenfalls bereits im IOM entwickelte Ionenstrahl-Oberflächenglättungsverfahrensschritte auf deren Anwendbarkeit zur Verbesserung der Rauheit der im optischen Material erzeugten Strukturen untersucht werden.

Ein alternativer Ansatz zur 3D-Strukturierung sind computergesteuerte Konturmasken. Dabei sollen ätzresistente Si-Konturmasken zum Einsatz kommen (hier ist durch Auftragsvergabe an einen Dritten diese Maske zu beschaffen) die in Kombination mit einer computergesteuerten Bewegung in einer oder mehreren Achsenrichtungen während des Ätzens die erforderliche 3D-Struktur direkt im harten optischen Material erzeugen. Parallelbearbeitung auf großen Flächen wird angestrebt.

In dem Zeitraum nach dem Neustart des CoOp Projektes mit dem neuen Industriepartner OPTUN wurden im IOM die Untersuchungen zum Ätzen von Taperübergängen an den neuen Anforderungen des Materials  $\text{SiO}_x\text{N}_y$  und der Strukturdimensionen neu ausgerichtet. Neu aufgenommen wurden auch Untersuchungen zur Direkterzeugung von Mikrostrukturen mittels schreibender Ionenstrahl- und Plasmajetätzverfahren.

### **1.1.2 Planung und Ablauf des Vorhabens**

Das IOM leistet in enger arbeitsteiliger Kooperation mit der Universität Jena und Alcatel sowie später nach dem Projektneustart mit der Fa. OPTUN in Kooperation mit der Universität Dortmund als Hersteller von  $\text{SiO}_x\text{N}_y$ -Schichten folgende Beiträge zu den Fragen des Ätzens der Mikrostrukturen. Die AP (Arbeitspakete) betreffen den Arbeitsplan des Gesamtverbundvorhabens.

**1.1.2.1 Beiträge zu AP 2.2 und 3.1 Prozessentwicklung Strukturierung**

Optimierung des RIBE-Ätzverfahrens für Wellenleiter und Spiegel im Quervergleich mit den Projektpartnern Uni Jena und Alcatel mit dem Ziel der Einhaltung bzw. Erreichung der Geometrie und Rauheitsspezifikationen der diversen Strukturen (Taper, Wellenleiter, Spiegel)

Untersuchungen und Entwicklung zur Verbesserung der Seitenwandrauheit mittels Ionenstrahlätztechnik (Ionenstrahlglättung). Das Verfahren konnte auf Planflächen (Si, Quarzglas, Halbleitermaterialien) nachgewiesen werden. Hier soll die Anwendbarkeit ggf. insbesondere auf die Seitenwände der Wellenleiterstrukturen untersucht werden.

Aufwand: 7.5 Personenmonate

**1.1.2.2 Beiträge zu AP 2.3 Grautonstrukturierung mit HEBS, 3D-Taper mit Grautonstrukturierung**

Anpassung und Optimierung von RIE und/oder RIBE-Ätzverfahren zum Proportionaltransfer von mittels (Grauton)-Lithografie erzeugten (3D)-Haftmasken in das harte optische Material. Schwerpunkte sind die Einhaltung der Geometrietoleranzen durch empirische Ermittlung der Übertragungselektivitäten hauptsächlich durch Anpassung der Ätzgaschemie bei gleichzeitiger minimaler Oberflächenrauheit. Gegebenenfalls werden Ionenstrahlglättungsschritte zur nachträglichen Verbesserung der Rauheit einzubeziehen sein.

Aufwand: 3 Personenmonate

**1.1.2.3 Beiträge zu AP 2.3 Alternativtechnologien**

Arbeiten zur Entwicklung bzw. Applikationsanpassung von reaktiven Ionen-(strahl)ätzverfahren (RIE bzw. RIBE) mittels Konturmaskentechnik für die direkte (resistlose) Herstellung von 3D-Taperstrukturen in den relevanten harten optischen Materialien. Dabei sollen ätzresistente Konturmasken zum Einsatz kommen die in Kombination mit einer computergesteuerten Bewegung in einer oder mehreren Achsenrichtungen während des Ätzens die erforderliche Struktur direkt im harten optischen Material erzeugen.

In die Untersuchungen wurden zwei Verfahren mit schreibendem Strahlwerkzeug einbezogen:

- Ionenstrahlätzen mit Ar-Ionen und kleinem Strahlquerschnitt
- Plasmajetätzen ebenfalls mit kleinem Werkzeug mit reaktivem Ätzgas (CF<sub>4</sub>).

Ziel ist die Herstellung der 3D-Topologie für die verschiedenen Taperstrukturen ohne Resiste und ohne Lithografie. Ein wesentlicher Vorteil ergibt sich dabei durch die hohe Oberflächenqualität (minimaler Rauheit) der geätzten Oberflächen. D.h. es wird weder die Rauheit verschlechtert, noch werden durch den Ätzprozess selbst Überstrukturen erzeugt, die am Bauelement zu optischen Verlusten führen können.

Aufwand: 4.5 Personenmonate

Der Umfang dieser Aufgabe ist aufgrund der verfügbaren begrenzten Projektressourcen auf einen angestrebten Machbarkeitsnachweis der bereits im IOM erprobten Technik auf die speziellen Geometrie-Anforderungen der hier herzustellenden Strukturen beschränkt.

Der Arbeitsplan umfasst neben den direkten Arbeiten zur Entwicklung bzw. Applikationsanpassung von reaktiven Ionen-(strahl)ätzverfahren (RIE) bzw. RIBE und Plasmajetätzverfahren zum 3D-Proportionaltransfer von 3D-Resistmasken in die relevanten harten optischen Materialien bzw. zur resistlosen 3D-Strukturierung die profilometrische (Form und Rauheit) Charakterisierung der erzeugten Strukturen.

### **1.1.3 Wissenschaftlicher und technischer Stand**

Zur 3D-Strukturierung harter optischer Materialien werden bislang vorzugsweise Verfahren auf der Basis der Erzeugung von 3D-strukturierten Resist- oder Polymerhaftmasken auf dem Substratmaterial in Kombination mit einem RIE- oder RIBE-Prozess zum proportionalen Transfer eingesetzt. Die 3D-Maske ist dabei Opferschicht. 3D-Resist- bzw. Polymermasken werden durch Grauton-Photolithographie dosisabhängiges e-beam-writing oder durch Abformtechniken (imprint-Technologie) hergestellt. Die wesentlichen Probleme dieser Techniken liegen in der begrenzten thermischen Belastbarkeit der polymeren Masken beim Ätzübertrag, insbesondere aufgrund der geringen Wärmeleitfähigkeit des Resists bei Dicken (Strukturhöhen) von einigen 10  $\mu\text{m}$  und mehr und/oder bei dicken bzw. schlecht wärmeleitenden Substraten, bei denen eine effektive (Rückseiten)kühlung nicht möglich ist. Weiterhin sind Probleme mit der Oberflächenrauheit mit verschiedener Ursachengese in diesen Mehrschrittverfahren z. T. ungelöst.

Im IOM wurden im Rahmen von technologischen Entwicklungen zum 3D-Proportionaltransfer mittels RIBE Ätzrezepturen zur Übertragung von 3D-Photoresiststrukturen in Quarzglas untersucht. Dabei konnten im Falle holografisch-lithografisch hergestellter Blaze-Gitterstrukturen mit Resistprofilhöhen von 60 nm Gitterstrukturen im Quarz von ca. 700 nm Höhe hergestellt werden.

In Grundlagenuntersuchungen wurden am IOM Selbstordnungs- und Glättungseffekte an Halbleiteroberflächen und poliertem Quarzglas als Folge der Niederenergieionenstrahlbehandlung untersucht. Unter anderem wurde an optisch polierten Quarzglasoberflächen die Rauheit von 0,3 nm rms mittels Ar-Ionenstrahlätzen unter einem bestimmten Einfallswinkel auf 0,08 nm rms reduziert.

Im IOM wurde im Rahmen eines Projektes Untersuchungen zur Herstellung von 3D-Strukturen mittels RIBE und RIE unter Verwendung von computergesteuerten Konturenblenden untersucht. Die Strukturen waren sphärische und parabolische Hohlflächen mit lateralen Maßen im Millimeterbereich und Bearbeitungstiefen im Bereich einiger 10  $\mu\text{m}$ . Die Rauheit der bearbeiteten Si- und Quarzoberflächen liegt im Bereich unter 0,5 nm rms.

Für die durchzuführenden Arbeiten konnte zum Start des Projektes auf IOM eigene Grundlagenuntersuchungen und technisch-technologische Entwicklungen, sowie Geräte-Entwicklungen zur:

- Ionen- und Plasmastrahl-Präzisionsbearbeitung von optischen Oberflächen,
- Ionenstrahlglättung von Oberflächen,
- Erzeugung und Übertragung von 3D-Mikrostrukturen durch Proportionaltransfer von 3D Resiststrukturen in harte optische Materialien durch RIBE,
- Geräteentwicklung zu den genannten Verfahren (Pilotmaßstab),
- Ionenstrahl- und Plasmastrahl-Quellenentwicklung für den späteren Produktionseinsatz, zurückgegriffen werden.

#### Publikationen(Auswahl):

- G. Boehm, W. Frank, A. Schindler, A. Nickel, H.-J. Thomas, F. Bigl and M. Weiser  
Plasma Jet Chemical Etching - a Tool for the Figuring of Optical Precision Aspheres;  
Precision Science and Technology for Perfect Surfaces, eds. Y. Furukawa, Y. Mori & T. Kataoka ,  
The Japan Society for Precision Engineering, Tokyo (1999) 231-236 (Proc. of the 9th ICPE,  
Osaka/Japan, 29.08.-01.09.1999)
- R. Fechner, A. Schindler, Th. Haensel and F. Bigl  
Sub - Nanometer Polishing of Optical Surfaces by Ion Beam Planarization Technique,  
Precision Science and Technology for Perfect Surfaces, eds. Y. Furukawa,  
Y. Mori & T. Kataoka , The Japan Society for Precision Engineering, Tokyo (1999)  
249-254 (Proc. of the 9th ICPE, Osaka/Japan, 29.08.-01.09.1999)
- A. Schindler, Th. Haensel, D. Flamm, A. Nickel, H.- J. Thomas and F. Bigl  
Nanometer Precision (Reactive) Ion Beam Figuring of (Aspherical) Optical Surfaces  
Precision Science and Technology for Perfect Surfaces, eds. Y. Furukawa, Y. Mori & T. Kataoka ,  
The Japan Society for Precision Engineering, Tokyo (1999) 243-248 (Proc. of the 9th ICPE,  
Osaka/Japan, 29.08.-01.09.1999)
- D. Flamm, T. Hänsel, A. Schindler, A. Nickel, H.-J. Thomas  
Reactive ion beam etching - a fabrication process for the figuring of precision aspheric optical sur-  
faces in fused silica Proc. of the SPIE, vol 3739 (1999)
- F. Frost, A. Schindler, F. Bigl  
Ion beam smoothing of indium-containing III-V compound semiconductors Appl. Phys. A 66, 663-  
668 (1998)

#### 1.1.4 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Im Rahmen des Verbundes wurde mit den folgenden Einrichtungen kooperiert:

- Firmen Alcatel und später OPTUN zu den Planungen, Koordinierung und Auswertung der Arbeiten bzw. Ergebnisse,
- Universität Jena zum Vergleich der Strukturierungsmethoden RIE, RIBE, Plasmajet,
- Universität Dortmund zur Bearbeitung von SiOxNy-Material mit Ionenstrahl- und Plasmajetverfahren,
- Mit der Firma FOB zur Ionenstrahlbearbeitung und zur Materialcharakterisierung von Gelbglasproben.

## 1.2 Eingehende Darstellung

### 1.2.1 Ergebnisse

Die wesentlichen Ergebnisse mit technologischem Anwendungspotenzial betreffen folgende Schritte:

- Erzeugung von 3D-Strukturen in harten optischen Materialien mittels RIE und RIBE-Verfahren unter Verwendung von Konturmasken mit gesteuerter Bewegung
- Übertragung von 3D-Resisthaftmasken mittels RIBE-Proportionaltransfer in harte optische Substratmaterialien (Quarzglas, Si)
- Erzeugung von 3D-Strukturen in harten optischen Materialien mittels direktschreibender kleiner Werkzeuge (Ar-Ionenstrahl und Reaktivgas-Plasmajet).
- Glättung von optischen Oberflächen mittels Ionenstrahlätzen.

Diese Bearbeitungstechniken wurden an den für das Projekt CoOp relevanten Materialien experimentell untersucht und ihre Eignung für Strukturierungszwecke bzw. zur Oberflächenverbesserung (Ionenstrahlglättung) konnte nachgewiesen werden. Für den gezielten technologischen Einsatz in eine Fertigungskette bedarf es weiterer Optimierung um die erforderlichen Leistungsparameter bzgl. Struktur- und Oberflächenqualität als auch Fertigungsökonomie an den konkreten Bauelementestrukturen nachzuweisen.

#### 1.2.1.1 Erzeugung von 3D Topologien als mögliche Taperstrukturerzeugung

Bei der sog. Schrägschliffmethode werden zwei computergesteuerte Blenden zwischen dem Ionenstrahl und der zu ätzenden Oberfläche gefahren. Somit kann ein vorgegebenes Oberflächenprofil, in diesem Fall eine Keilstruktur, in die Oberfläche geätzt werden ohne eine Photoresistmaske (Abb. 1). Der Ionenstrahl muss größer sein im Durchmesser als die zu ätzende Gesamtfläche des Substrates und die Ionendichteverteilung muss homogen sein.

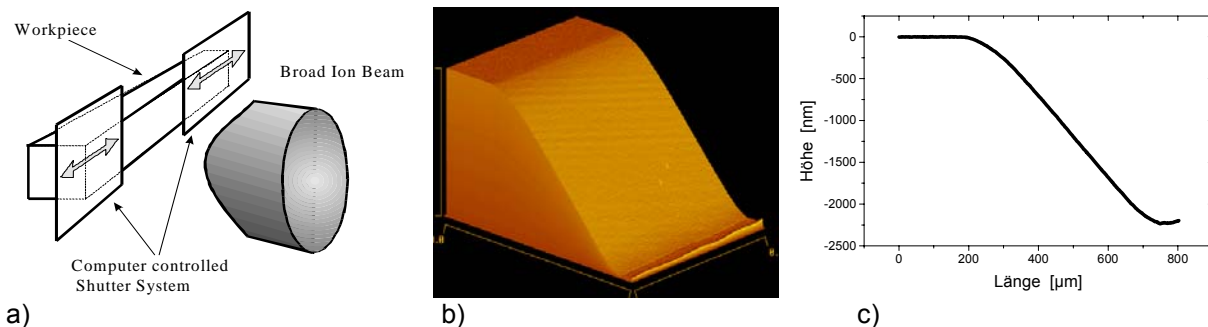


Abbildung 1: a) Schematische Darstellung der experimentellen Anordnung bei der Ionenstrahlschrägschliff-Methode, b) 3D-Bild einer Keilstruktur, geätzt in Silizium und c) Schnitt der Struktur, die Abmessungen sind ca. 500µm Länge und 2.1µm Tiefe

Die Keilstruktur wurde in einem Si-Wafer geätzt. Ätzgas war Argon und die Ätzrate betrug 15nm/min. In Abb. 1c und c sind das 3D-Bild der Keilstruktur, gemessen mit einem optischen Profiler, und ein Schnitt der Struktur dargestellt. Eine Erhöhung der Rauigkeit wurde nicht gemessen.

Nach dem Nachweis, dass mit dem Ionenstrahlschrägschliff Strukturen mit diesen Dimensionen hergestellt werden können, wurden im nächsten Schritt 3D-Taper auf von ALCATEL gestellten Wafern geätzt. Für die Reihenfolge der lateralen und vertikalen Strukturierung der Wellenleitern mit 3D-Taper gibt es zwei Möglichkeiten. Die erste Variante ist, in eine planare FHD-Glasschicht werden Taperwannen geätzt, die anschließend in einem vertikalen Ätzschritt zu Wellenleitern weiter strukturiert werden. Bei der zweiten Variante werden in die vorstrukturierte Schicht thermischen Oxids über bestimmte gerade Wellenleiter ebensolche Taperwannen geätzt. In den ersten Versuchen wurden Taperwannen mit einer Tiefe von ca. 2µm und einer Rampe von 500µm, 1000µm und 1500µm, was einem Rampenwinkel von 0.2grd, 0.1grd und 0.08grd entspricht, geätzt. Steilere Rampenwinkel von 0.8 bis 1grd könnten mit dem Ionenstrahlschrägschliff noch hergestellt werden. Noch steilere Winkel sind mit dieser Methode nicht möglich. Solche Strukturen müssten von einer entsprechend geformten Photoresistmaske in das Substrat übertragen werden. In Abb. 2 sind die 3D-Bilder, der drei in eine FHD-Glasschicht geätzten Taperwannen, und die entsprechenden Schnitte dargestellt. Ätzgas war Argon und die Ätzrate betrug 18nm/min. Eine Zunahme der Oberflächenrauigkeit konnte nicht gemessen werden.

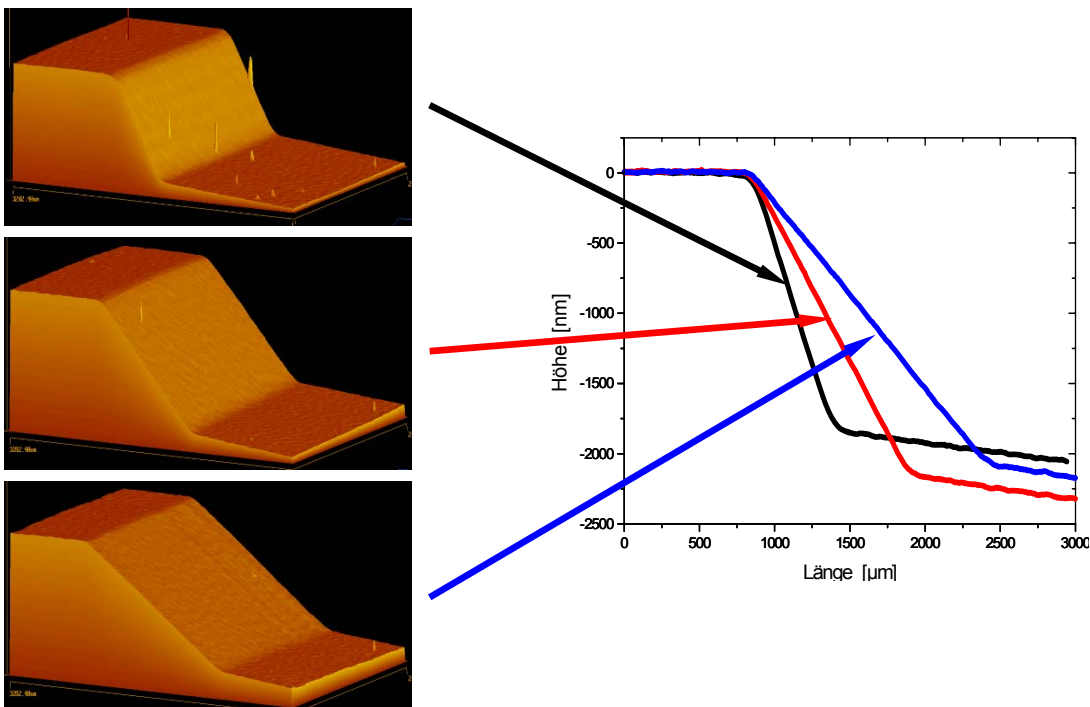


Abbildung 2: 3D-Bilder von Tapern geätzt in eine FHD-Glasschicht mit einer Rampenlänge von 500µm (oben), 1000µm (Mitte) und 1500µm (unten); im rechten Diagramm sind die entsprechenden Schnitte dargestellt

### 1.2.1.2 Untersuchungen zur Transmissionsvariation von Gelbglasproben der Fa. FOB mittels Ionenstrahlabtrag

Eine Grautonmaske sollte durch den kontrollierten Abtrag einer komplett geschwärzten Mask-Blank-Schicht hergestellt werden, d.h. durch Variation der Dicke der geschwärzten Schicht die optische Transmission gesteuert werden. Abb. 3 zeigt Ergebnisse der Transparenzänderungen einer Gelbglasprobe. Die größten Änderungen der optischen Transmission wurden in den ersten 2µm Abtragtiefe gemessen. Eine Zunahme der Oberflächenrauigkeit wurde bis zu einer untersuchten Abtragtiefe von 2µm nicht gemessen.

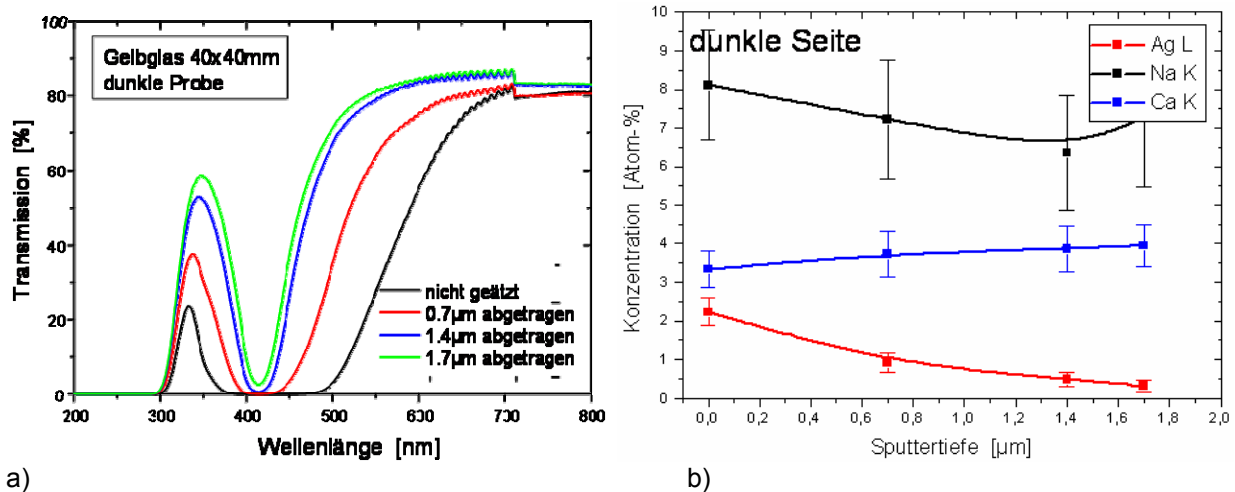


Abbildung 3: a) Variation der spektralen Transparenz von Gelbglasproben der Fa. FOB Halle nach Ionenstrahlätzabtrag verschiedener Materialdicken, b) mittels EDAX gemessene Variation der Ag-Konzentration mit der Sputtertiefe.

### 1.2.1.3 Untersuchungen zur Erzeugung von 3D-Strukturen mit schreibenden Strahlwerkzeug

In dem Zeitraum nach dem Neustart des CoOp Projektes wurden im IOM planmäßig Untersuchungen zum Ätzen von Taperübergängen, neu ausgerichtet an den neuen Anforderungen des hochbrechenden Materials  $\text{SiO}_x\text{N}_y$ , das als Schichtmaterial auf Plansubstraten von dem neu hinzugekommenen Projektpartner Universität Dortmund dem IOM zur Verfügung gestellt wurde, und der veränderten Strukturdimensionen, begonnen.

In die Untersuchungen wurden zwei Verfahren mit schreibenden Strahlwerkzeug einbezogen:

- Ionenstrahlätzen mit Ar-Ionen und kleinem Strahlquerschnitt
- Plasmajetätzen ebenfalls mit kleinem Werkzeug mit reaktivem Ätzgas ( $\text{CF}_4$ ).

Ziel ist die Herstellung der 3D-Topologie für die verschiedenen Taperstrukturen ohne Resiste und ohne Lithografie. Ein wesentlicher Vorteil ergibt sich dabei durch die hohe Oberflächenqualität (minimaler Rauheit) der geätzten Oberflächen. D.h. es wird weder die Rauheit verschlechtert, noch werden durch den Ätzprozess selbst Überstrukturen erzeugt, die am Bauelement zu optischen Verlusten führen können.

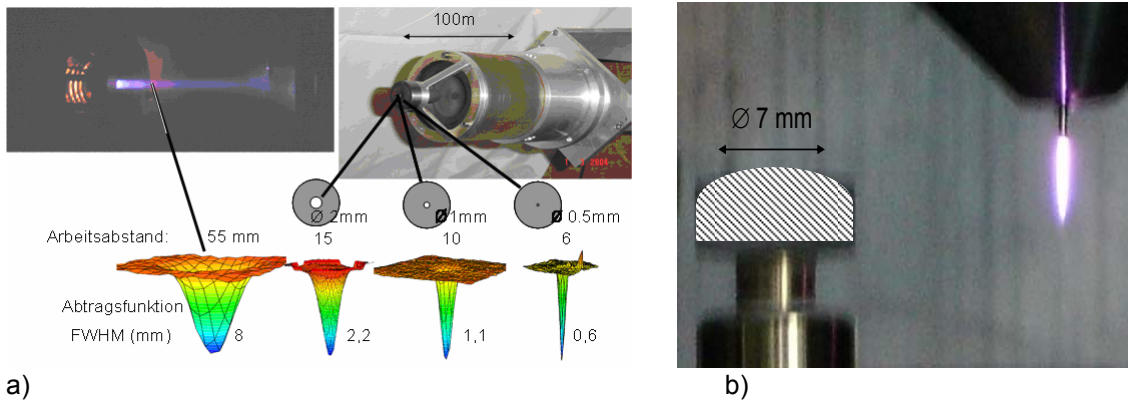


Abbildung 4: a) Entwicklung von variablen Ionenstrahlgrößen mittels Blenden und b) von miniaturisierten reaktiven atmosphärischen Plasmajets für die lokale Präzisionsbearbeitung von Oberflächenformen

Mittels angepasster Größen der Werkzeug-Abtragsfunktionen (Halbwertsbreite - HWB) lassen sich dreidimensionale Formen in Oberflächen einarbeiten. Die maximal erreichbaren Topologiegradienten werden durch die Kontur der Abtragsfunktion bestimmt.

In den Untersuchungen wurden sowohl der Ar-Ionenstrahl als auch der reaktive Plasmajet unter Verwendung F-haltiger Ätzgase einbezogen und mittels Blenden bzw. Düsendurchmesser in der Halbwertsbreite verändert. Mit den Werkzeugen minimaler HWB wurden Topologieformen erzeugt, die das Potential für eine Direktstrukturierung für Tapergradienten haben. Die Abbildungen 4 und 5 zeigen die Anpassung und die Vermessung der Abtragsfunktionen von Ionenstrahl und atmosphärischem Plasmajet. Die lokale Formbearbeitung erfolgt über verweilzeitgesteuerte Zeilenscanverfahren mittels computergesteuerter Präzisionsachsensysteme mit denen die Strahlquellen über die Probenoberflächen bewegt werden.

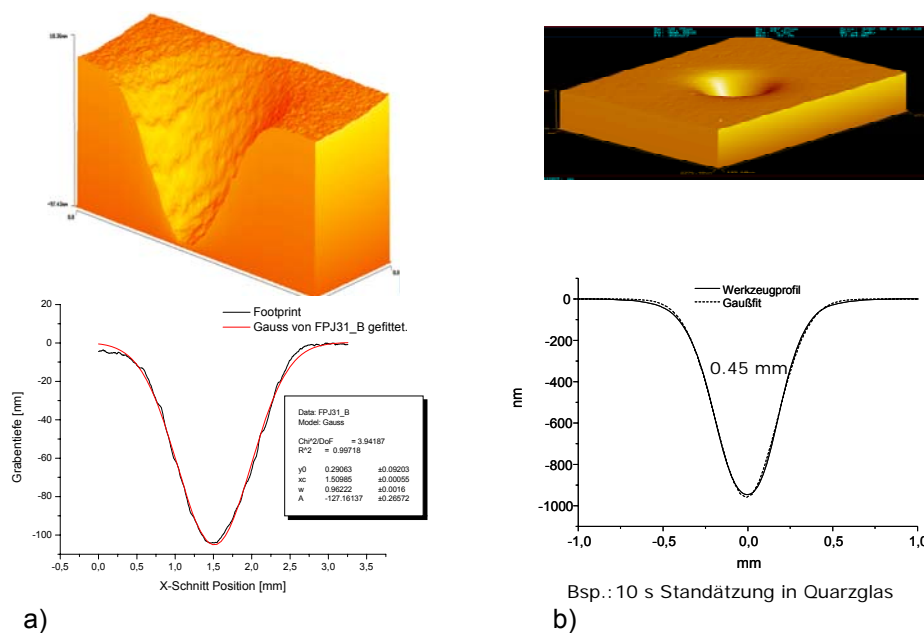


Abbildung 5: Bestimmung der Abtragsfunktionen von a) Ionenstrahl und b) Plasmajet mittels stationärer Ätzung und interferometrischer Vermessung der geätzten Strukturen.

Die Entwicklungen applikationsangepasster Strahlquellen und der Bearbeitungsalgorithmen erfolgt teilweise über haushaltfinanzierte Themen des IOM außerhalb dieses Projektes. Im Rahmen der Projektarbeiten erfolgten Optimierungen der Werkzeug- und Bearbeitungsparameter.

Die Abbildung 6 zeigt das Bearbeitungsergebnis einer  $\text{SiO}_x\text{N}_y$ -Schicht mit einem Ar-Ionenstrahl von 1,1 mm HWB, 1000 eV Ionenenergie und senkrechtem Ioneneinfall. Es wurde eine Fläche von  $5 \times 5 \text{ mm}^2$  mit einer Bearbeitungstiefe von  $1 \text{ }\mu\text{m}$  in einer Zeit von 208 Minuten bearbeitet.

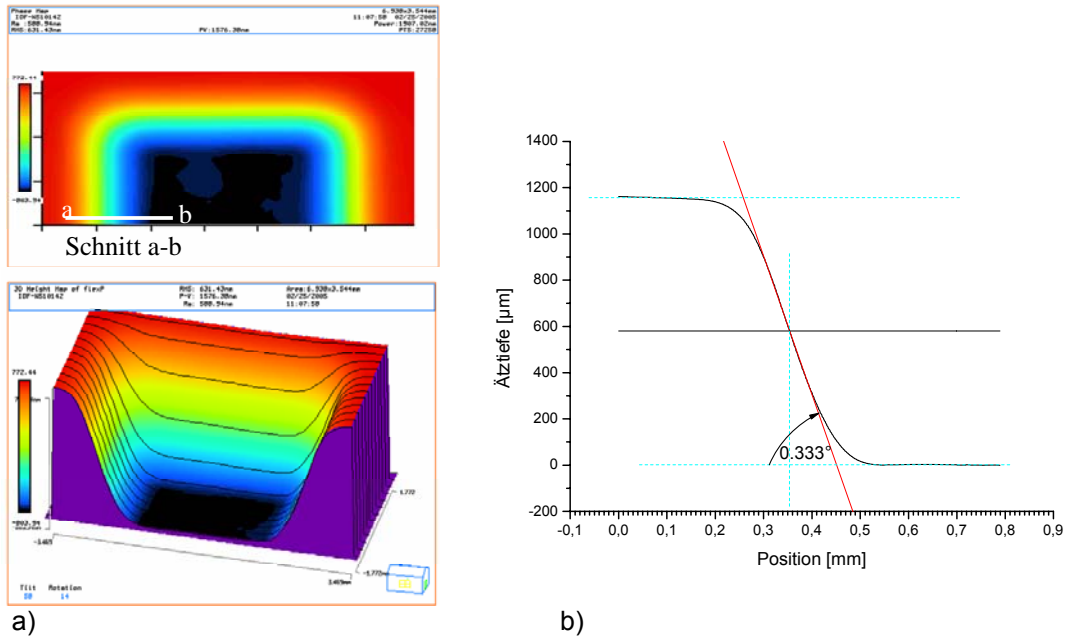


Abbildung 6: Flächenbearbeitung mit einem Ar-Ionenstrahl mit 1,1 mm HWB, a) mit dem optischen Profiler gemessene Topologie, b) Schnittprofil der Randgeometrie.

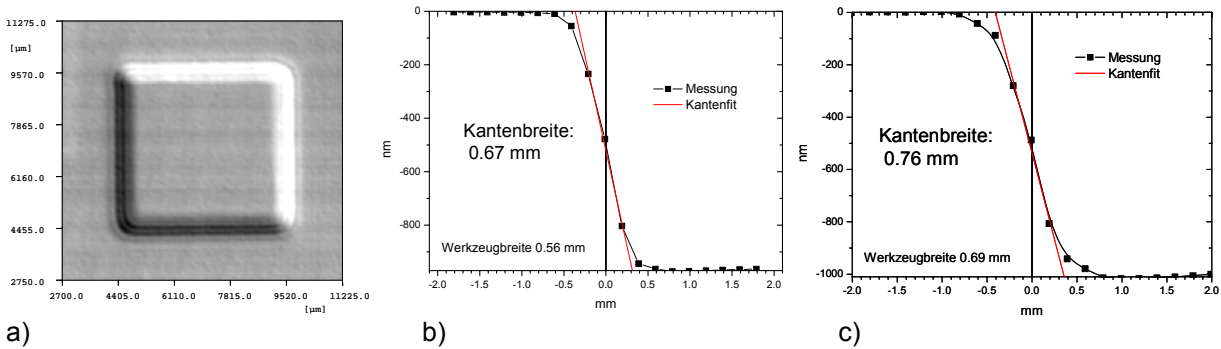


Abbildung 7: Flächenhafte Bearbeitungen einer  $\text{SiO}_x\text{N}_y$ -Schicht mit dem reaktiven Normaldruck-Plasmajet zur Erzeugung definierter Rampen (Höhendifferenz  $1...2 \text{ }\mu\text{m}$ , Breite  $0.5...1.5 \text{ mm}$ ). Die aktiven Ätzespezies sind im Plasma gebildete F-Radikale, a) geätzte Fläche, b) Randprofil der Fläche mit einem Jet vom  $0,56 \text{ mm}$  HWB und c) mit  $0,69 \text{ mm}$  HWB (Messung der Kantenprofile mit dem Schichtdickenmesssystem FTP500, vertikale Auflösung  $1 \text{ nm}$ ).

Abbildung 7 zeigt die flächenhafte Bearbeitung einer  $\text{SiO}_x\text{N}_y$ -Schicht mit einem reaktiven Normaldruck-Plasmajet zur Erzeugung definierter Rampen (Höhendifferenz 1...2  $\mu\text{m}$ , Breite 0.5...1.5 mm). Das Bearbeitungsfeld in Abb. 7a misst 5 x 5  $\text{mm}^2$  und wurde mit optischen Profilometer (vertikale Auflösung 25 nm) nach einer Goldbeschichtung vermessen. Die Bearbeitungszeit beträgt 8 min bei einer Bearbeitungstiefe von 1  $\mu\text{m}$  und einer Werkzeugbreite (HWB) von 0.56 mm. Die Abtragsrate beträgt im Maximum des Jets 170 nm/s. Die Abb. 7 b und c zeigen die Vermessungen der Kantengeometrien von bearbeiteten Flächen mit zwei unterschiedlichen Halbwertsbreiten des Plasmajets.

Ein wichtiger Parameter der Strukturierung für Wellenleiteranwendungen ist die Oberflächenrauheit. Abbildung 8 zeigt AFM-Messungen (Messfläche jeweils 1  $\mu\text{m}$  x 1  $\mu\text{m}$ ) der a) unbearbeiteten und b) der mit dem Plasmajet bearbeiteten  $\text{SiO}_x\text{N}_y$ -Oberfläche. Die Plasmaätzung bewirkt in dem Falle eine leichte Verbesserung der Rauheit.

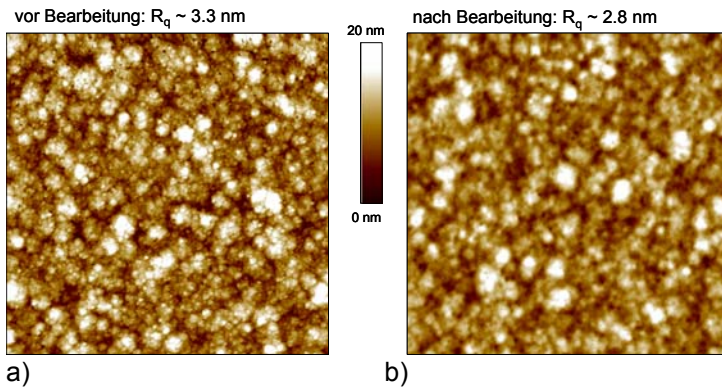


Abbildung 8: AFM-Messung der Oberflächenrauheit der  $\text{SiO}_x\text{N}_y$ -Schicht a) vor und b) nach der flächenhaften Bearbeitung mit dem Normaldruck-Plasmajet. Die Bearbeitungstiefe bei b) ist 1  $\mu\text{m}$ .

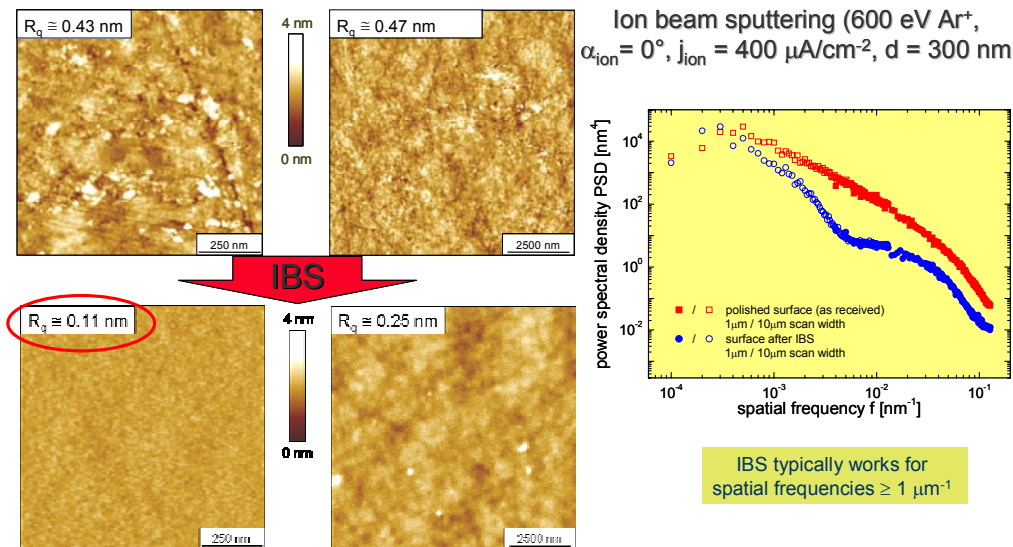


Abbildung 9: Beispiel der Oberflächenglättung von Quarzglas ( $\text{SiO}_2$ ) mit dem Ionenstrahl nach einem im IOM entwickelten Prozess.

Zur Verbesserung der Rauheit wurde im IOM ein sogenanntes Direktglättungsverfahren mittels Ionenstrahlätzen entwickelt. Abbildung 9 zeigt ein Glättungsbeispiel an optisch poliertem Quarzglas. Das Verfahren hat das Potential der Erzeugung von Sub-Nanometer-RMS-Werten der Oberflächenrauheit und könnte im Bedarfsfall zur Verbesserung der Rauheit der  $\text{SiO}_x\text{N}_y$ -Schicht oder der Strukturoberflächen eingesetzt werden.

### 1.2.2 Voraussichtlicher Nutzen und Verwertbarkeit der Ergebnisse

Die Untersuchungen zur Erzeugung von für Taper bzw. anderen 3D-Oberflächenformen zeigen das Potential zur Erzielung vielfältiger Geometrien mit dem Ionenstrahl und dem reaktiven Normaldruck-Plasmajet. Insofern ergeben sich sowohl zur Erzeugung von Strukturen als auch zur Herstellung von 3D Oberflächentopologien vielfältige Anwendungsmöglichkeiten in der Mikrosystemtechnik allgemein.

Für die direktschreibenden Verfahren erweist sich der Plasmajet mit seinen hohen Abtragraten als Favorit für die Integration in Fertigungsprozesse. Die Erzeugung von 3D-Strukturen mit direktschreibendem Strahlwerkzeug ist hinsichtlich der Erzeugung der lateralen Auflösung (sehr kleine 3D-Strukturen) bzw. der Erzielung sehr steiler Profile auf die Kontur des Strahles limitiert. Die kleinsten Werkzeuge mit stabil arbeitender Abtragsfunktion und für Fertigungszwecke hinreichender Abtragate liegen beim Ionenstrahl bei ca. 500  $\mu\text{m}$  HWB und beim Plasmajet bei ca. 300  $\mu\text{m}$  HWB.

Der Ionenstrahl als Breitstrahl mit reaktiven Gasen zum proportionalen Übertragen von 3D-Resiststrukturen ist insbesondere für Mikrostrukturen mit hinreichen kleinen lateralen Dimensionen geeignet. Er ist gegenüber dem RIE-Verfahren immer dann bevorzugt einsetzbar, wo das RIE-Verfahren scheitert. Das betrifft den Fall dicker Substrate dielektrischer Materialien als auch für nichtplanare, gekrümmte Oberflächen. Die Untersuchungen zum RIE-Einsatz wurden beim Projektpartner FSU Jena durchgeführt.

Da aufgrund der Schließung der OPTUN GmbH im September 2005 das Projekt vom Projektträger vorzeitig abgebrochen wurde, sind diese Arbeiten bei dem hier berichteten Stand beendet worden. Die erreichten technologischen Ergebnisse fließen in relevante FuE-Arbeiten des IOM zur ultrapräzisen Bearbeitung von Oberflächen ein und werden dort angewendet und erweitert. Damit stehen sie auch externen Interessenten, die anfragen oder relevante Projekte mit dem IOM bearbeiten zur Verfügung.

### 1.2.3 Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen

Zur Thematik der 3D-Strukturgenerierung und -übertragung im Falle von mittels Lithografiertechniken erzeugten 3D-Masken wurden im Rahmen dieses Verbundprojektes gegenüber dem Stand der Technik am Projektbeginn maßgebliche Fortschritte bei dem Projektpartner FSU Jena erreicht. Dort wurden vor allem Kombinationsverfahren mit Lithografie und Reflowtechniken zur Erzeugung von 3D-Strukturen untersucht und zur technologischen Reife entwickelt. Die Übertragung erfolgt dann mittels RIE oder RIBE-Verfahren, die sowohl bei der FSU Jena als auch im IOM (nur RIBE) entwickelt wurden und an die jeweiligen Applikationen angepasst werden.

#### **1.2.4 Veröffentlichungen der Ergebnisse**

Die Projektergebnisse sind aufgrund des vorzeitigen Abbruchs des Verbundprojektes nicht veröffentlicht worden. Sie stehen in Form von IOM-Berichten beim IOM für Interessenten zur Verfügung. Ergebnisse die in weitere innovative Arbeiten des IOM einfließen werden bei deren Veröffentlichung dort nicht veröffentlicht.