


Neue optische Beschichtungen

Adaptive Steuerung macht IBS-Beschichtung ökonomischer

•  Gegenwärtig gilt das Ionenstrahl-Zerstäuben (Ion Beam Sputtering, IBS) als das Beschichtungsverfahren der Wahl, wenn im Bereich der optischen Beschichtungen höchste Qualitätsansprüche erfüllt werden müssen. In jüngster Zeit konnte das IBS-Verfahren durch Kombination mit neuen Prozesskontrolltechniken und Materialmischtechniken für die Herstellung von Rugate-Filtern mit kontinuierlichen Brechungsindexverläufen in seiner Anwendungsbreite noch einmal deutlich gesteigert werden.

Einleitung

Historisch betrachtet war es der dringende Bedarf an optischen Beschichtungen mit geringsten Streuverlusten für den Einsatz in Laser-Gyroskopen, der die Entwicklung der Ionenstrahl-Zerstäubungsprozesse (Ion Beam Sputtering, IBS) initiierte. In Laserkreiseln werden Kursänderungen durch Auszählen der Frequenzdifferenz von zwei Lichtstrahlen bestimmt, die in einem Ringresonator entgegengesetzt umlaufen. Die Empfindlichkeit dieser Systeme ist dabei durch die Rückwärtsstreuung der Resonatorspiegel begrenzt, weil es durch sie zu einer Kopplung der beiden Richtungsmoden im Resonator kommt. Um geringe Drehraten im Bereich der Erdbewegung sicher nachweisen zu können, müssen typische Rückstreuraten unterhalb von 20 ppm für die entsprechenden Spiegelbeschichtungen erreicht werden. Derart geringe Streuwerte sind auch heute mit konventionellen Beschichtungsverfahren nicht realisierbar.

Im Zuge der Laserkreiselentwicklung musste folglich ein gänzlich neues Prozesskonzept für die Herstellung hochwertigster Schichtsysteme gefunden werden. Mit dem IBS-Verfahren gelang es erstmals in den 1970er Jahren, das geforderte Qualitätsniveau zu erreichen. Das entsprechende Patent wurde im Jahr 1978 einem Unternehmen (Litton Systems Inc., USA [1]) aus der Luftfahrtbranche erteilt. Im Verlauf der letzten zwei Jahrzehnte konnten mithilfe

DIE AUTOREN

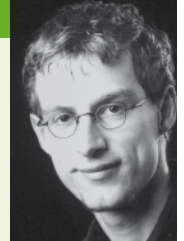
HENRIK EHLERS

Henrik Ehlers leitet seit 2001 innerhalb der Abteilung Laserkomponenten des Laser Zentrums Hannover die Gruppe Prozessentwicklung. Der Arbeitsschwerpunkt der Gruppe liegt in der Entwicklung und Optimierung neuartiger Prozesskonzepte für die optische Dünnschichttechnik. Zum Einsatz kommen hierbei neben dem konventionellen thermischen Verdampfen vor allem moderne Ionenprozesse, vom ionengestützten Beschichten (IAD) bis hin zum Ionenstrahl-Zerstäuben (IBS).



MARC LAPPSCHIES

Marc Lappschies arbeitet in der Gruppe Prozessentwicklung an der Weiterentwicklung der optisch breitbandigen in situ Schichtdickenmonitorierung und der Optimierung der Rugate-Filtertechnologie auf Basis des Ionenstrahl-Zerstäubens.



NILS BEERMANN

Nils Beermann bearbeitet innerhalb der Prozessentwicklung schwerpunktmäßig das Gebiet der Charakterisierung und Weiterentwicklung von Ionenquellen mit Blick auf Beschichtungsprozesse für die Herstellung hochqualitativer optischer Schichten. Der Fokus liegt sowohl auf dem ionenunterstützten Beschichten (IAD) als auch auf der Ionenstrahl-Zerstäubung (IBS).



DETLEV RISTAU

Detlev Ristau arbeitet seit 1982 im Bereich der optischen Dünnschichttechnologie. Er promovierte auf dem Fachgebiet an der Universität Hannover im Jahr 1988. Gegenwärtig leitet er die Abteilung Laserkomponenten am Laser Zentrum Hannover, die schwerpunktmäßig Beschichtungsprozesse und Charakterisierungsverfahren für optische Hochleistungskomponenten entwickelt. Für die Charakterisierung der hergestellten Beschichtungen kann auf normgerechte Apparaturen zur Messung der Übertragungseigenschaften, der optischen Verluste und der laserinduzierten Zerstörschwellen zurückgegriffen werden.



Henrik Ehlers
 Marc Lappschies
 Nils Beermann
 Detlev Ristau
 Laser Zentrum Hannover e. V.
 Hollerithallee 8
 30419 Hannover
 Tel.: +49 (0) 511/2788-245
 Fax: +49 (0) 511/2788-100
 E-Mail: h.ehlers@lzh.de
 E-Mail: m.lappschies@lzh.de
 E-Mail: n.beermann@lzh.de
 E-Mail: d.ristau@lzh.de

einer intensiven Weiterentwicklung von IBS-Technologien bemerkenswerte Erfolge bei der Herstellung von hochqualitativen Laseroptiken für den sichtbaren und nahen infraroten Spektralbereich erzielt werden. So können heutzutage beispielsweise hochreflektierende Spiegel für die Wellenlänge von 1064 nm des Nd:YAG-Lasers hergestellt werden, deren optische Gesamtverluste unter 1 ppm („parts per million“) liegen. Sie eröffnen damit ein breites Spektrum neuer Anwendungen in der optischen Präzisionsmesstechnik.

Auch wenn das hohe Qualitätsniveau der IBS-Beschichtungen inzwischen in einer Vielzahl von Anwendungen bestätigt wurde, konnte sich das Verfahren bisher nur in wenigen Bereichen der industriellen Produktion durchsetzen. Als wesentliche Hinderungsgründe für eine weitere Verbreitung des Prozesskonzepts gilt die im Vergleich zu konkurrierenden Prozessen geringe Produktivität des Verfahrens. Dies betrifft nicht nur die – teilweise um Größenordnungen – geringeren Beschichtungsraten, sondern auch die sehr begrenzten homogen beschichtbaren Flächen beim IBS-Verfahren. Beide Faktoren beschränken den Durchsatz und stellen damit deutliche ökonomische Nachteile dar, an deren Beseitigung derzeit intensiv gearbeitet wird.

Im vorliegenden Artikel werden zunächst Grundlagen und aktuelle Entwicklungen der IBS-Technologie dargestellt. Des Weiteren wird eine adaptierte Prozesskontrolltechnik vorgestellt, auf deren Basis ein „Rapid Manufacturing“ komplexer Schichtsysteme möglich wird. Den Abschluss bilden IBS-Anwendungen aus dem hochaktuellen Forschungsgebiet der Mischmaterialien und Rugate-Filter.

IBS: Grundlagen und aktuelle Entwicklungen

Das fundamentale Prinzip des IBS-Prozesses ist in Abbildung 1 illustriert. In einem Vakuumrezipienten wird das Schichtmaterial mit einem Ionenstrahl von einem Target abgestäubt („Sputtern“). Die Ionenquellen werden in der Regel mit Edelgasen oder angepassten Reaktivgasen betrieben. Typische Ionenenergien liegen dabei zwischen 0,5 keV und 2 keV. Bei Ionenenergien dieser Größenordnung erreichen die aus dem Target herausgeschlagenen Beschichtungsmoleküle/-atome typische kinetische Energien im Bereich von 10 bis 20 eV und kondensieren als Schicht auf den optischen Komponenten. Das Beschichtungsgut wird zusätzlich in der Anlage bewegt (beispielsweise auf einer Kreisbahn), um eine Flächenhomogenisierung der wachsenden Schicht zu

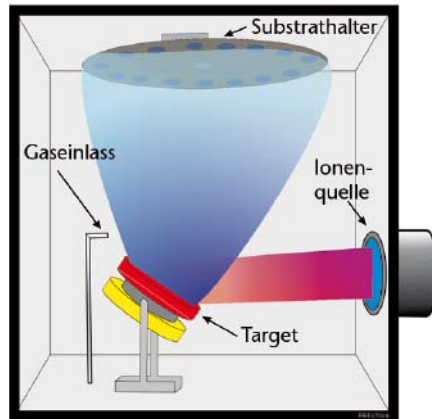


ABB. 1: Schematische Darstellung des IBS-Prozesses.

gewährleisten. Gegenüber konventionellen thermischen Verfahren besteht der wesentliche Unterschied des IBS-Konzepts in den deutlich höheren kinetischen Energien der schichtbildenden Atome. Während in den klassischen thermischen Verdampfungsprozessen Energien im Bereich einiger Zehntel Elektronenvolt vorherrschen und damit eine charakteristische poröse Mikrostruktur gebildet wird, entstehen bei den hohen Energien im IBS-Prozess kompakte glasartige Strukturen mit hoher Qualität und Stabilität. Weitere Vorteile des Verfahrens ergeben sich aus der Prozessführung, die aufgrund der wenigen Prozessparameter sehr reproduzierbar ist. Die einzelnen Prozessschritte Ionengenerierung, Zerstäubung und Schichtbildung sind gut separiert, und es können sehr geringe Restgasdrücke erreicht werden. Der Prozess ist damit äußerst kontaminationsarm und für die Herstellung

hochwertiger Präzisionsoptiken sehr gut geeignet.

Ein weiterer Vorteil des IBS-Konzeptes ergibt sich aus den niedrigen Prozesstemperaturen, die eine Beschichtung von temperaturempfindlichen Substraten und optischen Komponenten ermöglichen. Während die zu beschichtenden Optiken in konventionellen Verdampfungsprozessen im Allgemeinen auf ca. 300°C aufgeheizt werden, bleiben die Temperaturen im IBS-Prozess deutlich unter 100°C. Beispielsweise können mittels der IBS-Technologie Antireflexbeschichtungen mit sehr geringen Restreflektivitäten unter 10^{-4} direkt auf Laserdiodenfacetten oder auf die Endflächen von voll konfektionierten optischen Fasern aufgebracht werden [2]. Ein Anwendungsbeispiel aus dem Bereich der nichtlinearen Optik sind temperaturempfindliche Kristalle unterschiedlichster Materialien, die in der Frequenzkonversion zunehmend Anwendung finden [3]. Und nicht zuletzt ist in diesem Zusammenhang der stark wachsende Markt der Kunststoffoptiken zu nennen, der nach hochwertigen Beschichtungen auf kleinen, empfindlichen Optiken verlangt.

Förderprojekt für industrietaugliches IBS-Konzept

Den benannten Vorteilen des IBS-Konzeptes stehen die bereits erwähnten ökonomischen Nachteile gegenüber. An dieser Stelle setzte ein Forschungsprojekt unter Beteiligung des Laser Zentrums Hannover (LZH) an, das kürzlich erfolgreich abgeschlossen werden konnte [4]. Die Zielstellung des Projektes lag in der Erstellung eines

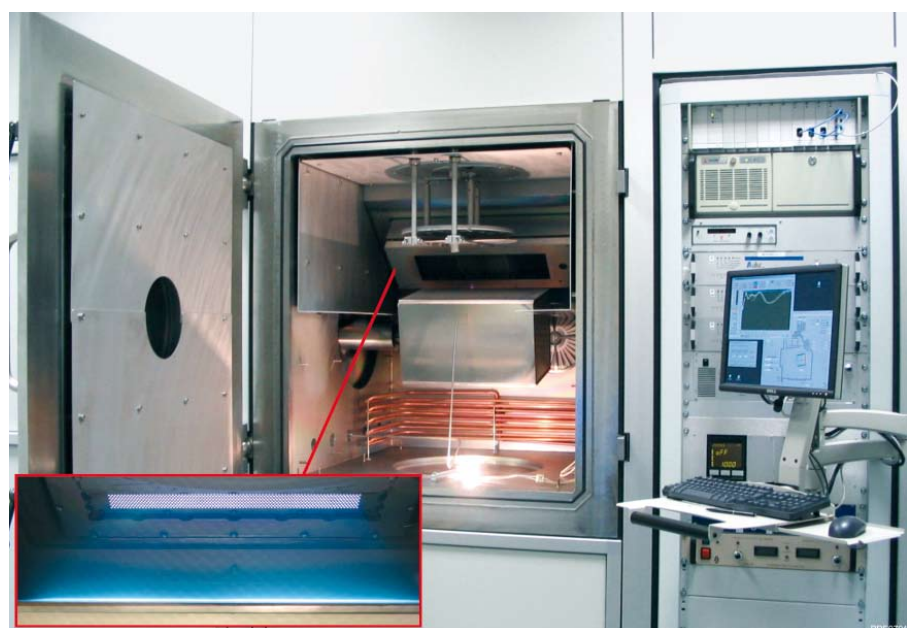


ABB. 2: IBS-Anlagenprototyp mit einer induktiv angeregten linearen Ionenquelle, der am LZH im Rahmen eines Forschungsprojektes realisiert wurde. Das eingebettete Bild zeigt die Ionenquelle im Betrieb.

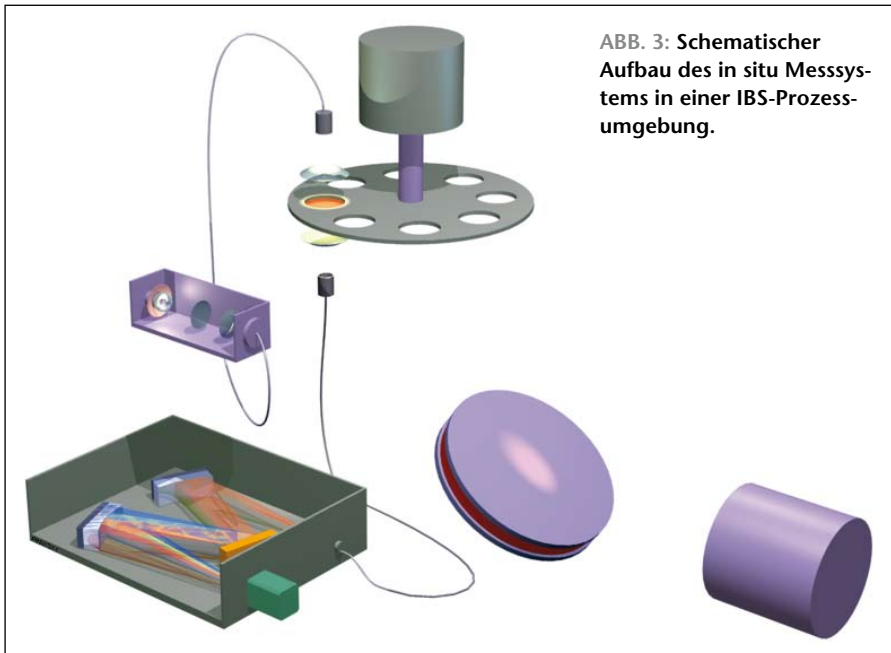


ABB. 3: Schematischer Aufbau des in situ Messsystems in einer IBS-Prozessumgebung.

auf typische oxidische Schichtmaterialien für den sichtbaren und nahen infraroten Spektralbereich, wie beispielsweise SiO_2 , TiO_2 oder Ta_2O_5 . In der gewählten Prozessform werden die Oxide in einem reaktiven Prozess auf die Trägermaterialien aufgebracht, indem das Beschichtungsmaterial von einem metallischen Target abgestäubt und während der Schichtbildung in einer entsprechend eingestellten Reaktivgasumgebung oxidiert wird. Aktuelle Arbeiten im Bereich der Ionenquellentechnologie, die eine weitere Verdoppelung der Produktivität erwarten lassen, stehen kurz vor dem Abschluss. Hintergrund dieser angestrebten Steigerung ist die Modifikation eines Gittersystems mit dem gegenwärtig Ströme bis zu 500 mA bei 2 keV Ionenenergie extrahiert werden können. Den Voruntersuchungen und Berechnungen folgend soll ein angepasstes Gittersystem, das sich momentan in der Umsetzungsphase befindet, eine Verdopplung des extrahierten Ionenstroms ermöglichen.

flexiblen, effizienten Anlagenkonzeptes mit dem die wirtschaftliche Einsetzbarkeit des IBS-Verfahrens im industriellen Umfeld der allgemeinen Optikindustrie demonstriert werden sollte. Auch wenn die Effizienz eines Beschichtungsprozesses eine Vielzahl einzelner Aspekte beinhaltet, ist als Hauptziel eine kurze Gesamtprozessdauer zu nennen, woraus die Forderung nach einer hohen Flächenbeschichtungsrate bei einer großen Flächenhomogenität folgt. Dabei ist die Beschichtungsrate zwar fast direkt proportional zum Ionenstrom der Quelle. Homogene Schichtdickenverteilungen erfordern aber auch relativ große Abstände zwischen Substrat und Target, die wiederum zu geringen Beschichtungsraten führen.

Am LZH wurden diese Aspekte in einem IBS-Anlagenprototyp zur Aufnahme verschiedener, insbesondere linearer, Ionenquellenkonzepte ausbalanciert. Das gewählte Konzept zeichnet sich durch eine

hohe Variabilität aus, so dass die Anlagengeometrie den Anforderungen in weiten Bereichen angepasst werden kann. Um die Pumpzeiten zu reduzieren, kommt in dem System ein leistungsfähiges, ölfreies Pumpsystem mit Meissnerfalle zum Einsatz. Bisher konnten in dem Aufbau drei unterschiedliche lineare Ionenquellentypen qualifiziert werden, wobei die Technologien einer induktiven HF-Plasmaerzeugung, einer induktiven HF-Anregung mit zusätzlicher kapazitiver Kopplung sowie einer Mikrowellenanregung untersucht wurden. Abbildung 2 zeigt den am LZH aufgebauten Anlagenprototyp mit einer induktiv angeregten Linearionenquelle.

In der gegenwärtigen Ausbaustufe des IBS-Anlagenprototyps konnte die homogene Beschichtung einer kreisförmigen Fläche von 330 mm Durchmesser bei einer Rate von durchschnittlich 0,1 nm/s demonstriert werden. Diese Angaben beziehen sich

Innovative Prozesskontrolle

Moderne IBS-Prozesse weisen eine unübertroffene Prozessstabilität auf, die selbst bei der Herstellung komplexer Mehrschichtsysteme eine Schichtdickenbestimmung nach Zeit erlaubt. Für höchste Abschaltgenauigkeiten im Bereich der Nanometerskala wurde zusätzlich ein in situ Messverfahren entwickelt, das auf einer optisch breitbandigen Transmissionsmessung direkt an dem zu beschichtenden Produkt beruht. In dieser Kombination aus fortschrittlicher in situ Prozesskontrolle und hochstabilem IBS-Prozess kann ein äußerst hoher Automatisierungsgrad erzielt werden, der eine kontinuierliche Prozessüberwachung durch einen Anlagenbediener verzichtbar macht. Abbildung 3 zeigt einen vereinfachten schematischen Aufbau des in situ Messsystems für eine IBS-Prozessumgebung. Neben den grundlegenden Prozesskomponenten Ionenquelle, Target und Substrathalter mit Antrieb ist eine optische Messstrecke für die Transmissionsmessungen zu erkennen. Hierbei besteht das spektralphotometrische System aus einer Lichtquelle mit einer Faseroptik und einem fasergekoppelten Monochromator mit einem CCD-Array. Die Strahlung der Lichtquelle passiert zunächst Ordnungsfilter und angepasste Gain-Flattening-Filter bevor sie in die Faser ein- und am Messort auf einem definierten Radius des Substrathalters wieder zu einem kollimierten Messstrahl ausgekoppelt wird. Eine zweite Faser führt die von dem Produkt transmittierte Strahlung zu dem Spektrometer, das einen Spektralbereich von

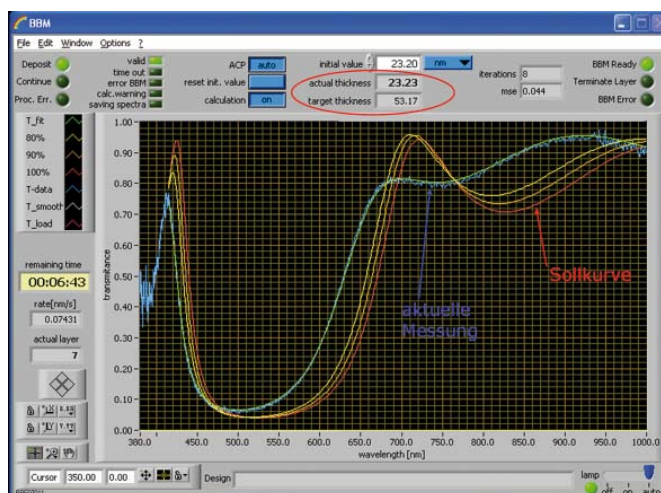


ABB. 4: Benutzeroberfläche der auf dem in situ Messsystem basierenden Prozesssteuerung.

ca. 400–1000 nm mit einer Wellenlängenauflösung von ~1 nm abdeckt. Die computerbasierte Messwertaufnahme steuert eine am LZH entwickelte Software, die die Messdaten weiterverarbeitet und darüber hinaus die Prozesssteuerung übernimmt. Mittels einer programmierbaren Triggereinrichtung können die Messzyklen mit der Rotation des Substrathalters synchronisiert und so individuelle Messpositionen ausgewählt werden. Um eine kalibrierte Messung der Transmission zu ermöglichen, besteht ein Messzyklus aus drei Einzelmessungen, die alle während einer Umdrehung des Substrathalters durchgeführt werden: Neben der eigentlichen Messung der Probe werden eine 100%-Referenzmessung an einer freien Position sowie eine 0%-Messung an einer opaken Position des Halters zur Bestimmung der Transmission herangezogen.

Im Betriebsmodus der vollautomatischen Prozesskontrolle bestimmt der Prozessverfolgungsalgorithmus auf der Basis der gemessenen Spektren und der Methode der kleinsten Fehlerquadrate die bis zur Zielschichtdicke der aktuellen Schicht verbleibende Beschichtungszeit. Wenn das berechnete Zeitintervall einen definierten Schwellwert unterschreitet, wird das Schichtende unter Beachtung der numerisch bestimmten Restzeit initiiert. Abbildung 4 zeigt die Benutzeroberfläche der Prozesssteuerung. Neben der aktuellen Transmissionsmessung (blaue Kurve) sind der numerische Fit (grüne Kurve) sowie das der Zielschichtdicke entsprechende Spektrum (rote Kurve) zu erkennen. Für die aktuelle physikalische Schichtdicke der hier gezeigten siebten Schicht des Mehrschichtsystems wird ein Wert von 23,2 nm errechnet, die Zielschichtdicke beträgt in diesem Fall 53,2 nm. Wird die Prozesskontrolle mit den Designdaten eines Schichtsystems sowie den optischen Materialeigenschaften der dünnen Schichten initialisiert, so läuft die gesamte Beschichtung ohne Benutzer eingriff ab, wobei im Falle von hochkomplexen optischen Filtern diese Produktionszeiten mehrere Tage betragen können.

Beschichtungssystem mit in situ Kontrolle im Praxistest

Die beschriebene in situ Prozesskontrolle wurde in der IBS-Umgebung an einer Vielzahl von Dünnschichtdesigns getestet. So konnten beispielsweise polarisierende und nicht-polarisierende Strahlteiler, unterschiedlichste steiflankige Filter und Chirped Mirrors für Femtosekunden-Laseranwendungen erfolgreich hergestellt werden. Im Normalfall konnten die Schichtsysteme ohne Prozessunterbrechungen oder vorhergehende Testbeschichtungen mit

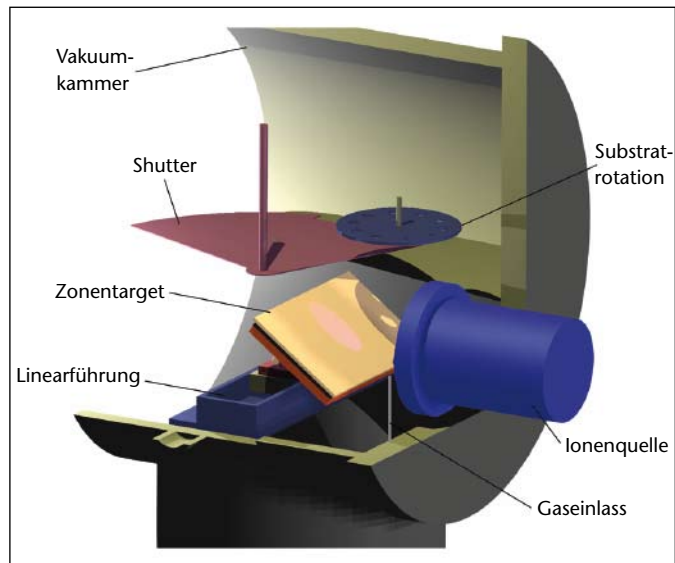


ABB. 5: Für die Herstellung von Rugate-Filtern adaptierte IBS-Anlage. Das Zonentarget wird durch eine Linearführung positioniert

einer Schichtdickengenauigkeit der Einzelschichten deutlich besser als 0,5 % realisiert werden [5]. Das vorgestellte in situ Messsystem wird mittlerweile nicht nur in IBS-Prozessen sondern auch in ionengestützten Beschichtungsprozessen (Ion Assisted Deposition, IAD) mit Erfolg eingesetzt und ist inzwischen als kommerzielles Produkt verfügbar [5]. Neben der präzisen Schichtdickenkontrolle direkt am Produkt liefern die in situ Messungen zudem eine umfangreiche Datenbasis für die Prozessanalyse, z.B. hinsichtlich des Aufwachsverhaltens, von Schichtinhomogenitäten oder von Temperatur- und Vakuum-/Luft-Shift-Effekten. Darüber hinaus ermöglicht das System ein modernes Qualitätsmanagement, indem eine umfassende prozessbegleitende elektronische Dokumentation jeder Beschichtung analysiert und archiviert werden kann.

Mischmaterialien und Rugate-Filter

Im Gegensatz zu konventionellen optischen Schichtsystemen bestehen Rugate-Filter nicht aus diskreten Einzelschichten mit wenigen definierten Brechungsindizes sondern weisen eine kontinuierliche Variation des Brechungsindex über die Schichtdicke des Filters auf. Ein Hauptvorteil des Rugate-Konzeptes liegt in der Möglichkeit, mit relativ einfachen Designs unerwünschte höhere Ordnungen oder Stoppbänder in den Spektren zu unterdrücken und breite Spektralbereiche mit sehr geringen Variationen der Transmission bzw. Reflexion zu realisieren. Des Weiteren deuten aktuelle Untersuchungen darauf hin, dass Rugate-Filter eine erhöhte Leistungsfestigkeit aufweisen [6], die einerseits dem Fehlen von internen Grenzflächen und dem damit einhergehenden

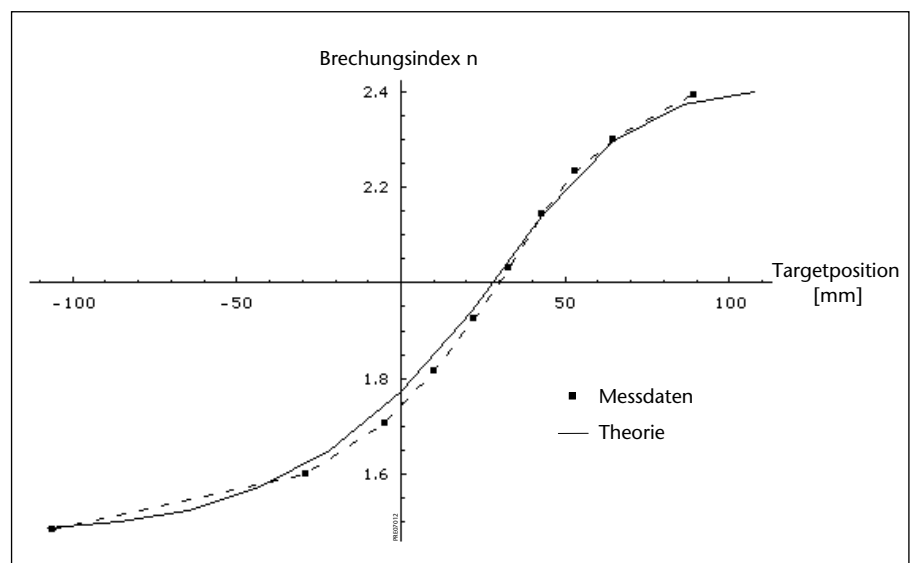


ABB. 6: Kalibrationsfunktion (Abhängigkeit des Brechungsindex von der Targetposition) für ein Titan-Silizium-Zonentarget.

DAS INSTITUT

Laser Zentrum Hannover e. V. Hannover

Die Hauptaufgaben des Laser Zentrums Hannover e. V. (LZH) sind Forschung, Entwicklung und Beratung. Seit der Gründung im Jahr 1986 liegt eine besondere Stärke des LZH in der fachlichen Verknüpfung zwischen physikalischen und ingenieurtechnischen Bereichen. Aus der engen Zusammenarbeit von Fertigungstechnikern, Werkstoffkundlern und Physikern ergeben sich fachübergreifende Lösungen von Problemen aus allen Bereichen der Lasertechnologie, ihrer Anwendungen und verwandten Technologiefeldern.

kontinuierlichen Beschichtungsprozess ohne Schichtwechsel zugeschrieben wird. Andererseits haben Experimente gezeigt, dass die Zusammensetzung der Materialgemische einen starken Einfluss auf Schichteigenschaften wie z. B. die Temperaturbeständigkeit oder das Absorptionsverhalten hat.

Für die Herstellung von dünnen Schichten mit einer definierten Variation des Brechungsindex können unterschiedliche Verfahren eingesetzt werden [7–11]. Im IBS-Prozess bietet sich der Einsatz so genannter Zonentargets an, die aus mindestens zwei Materialien aufgebaut sind. Wird die Auftrefffläche eines Ionenstrahls über ein aus zwei Materialzonen bestehendes Target bewegt, so können neben den reinen Materialien Materialgemische abgestäubt werden, deren Zusammensetzung von der aktuellen

Targetposition abhängt. Dieser technologische Ansatz erlaubt es, die Kontrolle der Materialzusammensetzung relativ einfach über eine Positionskalibrierung umzusetzen und dabei den maximalen Dynamikbereich der Brechungsindizes zu nutzen. Demgegenüber müssen jedoch die geometrischen Randbedingungen der Beschichtungsanlage und die Bewegung des Substrathalters intensiv optimiert werden, um am Substrathalter eine homogene Durchmischung der von den beiden Zonen ausgehenden Teilchenflüsse zu erreichen.

Ein entsprechendes Prozesskonzept mit Zonentarget kommt am LZH in einer adaptierten IBS-Anlage zum Einsatz, deren Geometrie in Abbildung 5 skizziert ist. In Abbildung 6 ist beispielhaft eine Kalibrationsfunktion für ein Titan-Silizium-Zonentarget dargestellt, die jeder Targetposition reproduzierbar einen Brechungsindex zuordnet. Der durch die experimentell erhaltene Kalibrationsfunktion beschriebene Verlauf des Brechungsindex weist eine gute Übereinstimmung mit einer auf dem Lorentz-Lorenz-Modell und einer \cos^n -Verteilung der abgestäubten Partikel basierenden theoretischen Beschreibung auf (durchgezogene Linie). Mit diesem IBS-System konnten in Verbindung mit dem im vorhergehenden Abschnitt vorgestellten in situ Monitorsystem bereits eine Vielzahl von Rugate-Filtern erfolgreich produziert werden [12]. Ein abschließendes Beispiel eines mit den Materialien TiO_2 und SiO_2 im IBS-Prozess hergestellten Rugate-Filters zeigt Abbildung 7. Zu erkennen ist einerseits das Transmissionsspektrum des Notch-Filters mit einem bei der Wellenlänge von

532 nm zentrierten Stopp-Band. Andererseits gibt der eingebettete Graph das zugrundeliegende Design wieder: Bei einer Gesamtdicke von über 10 μm verläuft der Brechungsindex sinusartig mit einer überlagerten Apodisation.

Zusammenfassung

Das Ionenstrahlzerstäuben kann als eines der aussichtsreichsten Verfahren angesehen werden, um den zukünftigen Herausforderungen in der Herstellung optischer Funktionsschichten gerecht zu werden. In vielen Fällen war es bereits die herausragende optische Qualität und Stabilität von IBS-Beschichtungen, die entscheidende Fortschritte in den Bereichen der Lasertechnologie, der Präzisionsmesstechnik, der Telekommunikationstechnik oder der Halbleiterlithographie ermöglichte. Als Konsequenz der intensiven Bemühungen, den Durchsatz und die ökonomische Effizienz des Prozesskonzeptes zu erhöhen, steht der IBS-Prozess gegenwärtig an der Schwelle zu einem regulären Einsatz in der industriellen Optikfertigung. In Kombination mit der adaptierten in situ Prozesskontrolle eröffnet sich die Möglichkeit eines flexiblen Rapid Manufacturing Systems, das vollautomatisiert hochwertige und komplexe optische Schichtsysteme produzieren kann. Einen signifikanten Fortschritt in Richtung optischer Beschichtungen mit einer gesteigerten Leistungsfestigkeit und Stabilität ermöglichen zudem im IBS-Prozess realisierte Rugate-Filter. Insgesamt belegen die dargestellten Aspekte das hohe Potential des IBS-Verfahrens als strategisch wichtiges Prozesskonzept in der optischen Fabrik der Zukunft.

Danksagung

Die Autoren danken dem BMWi, vertreten durch den Projektträger VDI/VDE Innovation + Technik GmbH, für die Förderung des Teilvorhabens „Brechwertmodulation in optischen Funktionsschichten“ innerhalb des Verbundvorhabens „Rugate-Filter: Innovative Technologien für optische Filter der nächsten Generation“ im Rahmen des InnoNet-Programms (FKZ 16IN0166). Dem BMBF, vertreten durch den Projektträger Forschungszentrum Karlsruhe – Bereich Produktion und Fertigungstechnologien (PTKA-PFT), wird für die Förderung des Teilvorhabens „Erprobung von Ionenstrahlzerstäubungsprozessen für die industrielle Anwendung“ im Verbundprojekt „Effiziente Ionenstrahl-Zerstäubungskonzepte für die flexible Optikfertigung (EIKON)“ gedankt (FKZ: 02PD2561).

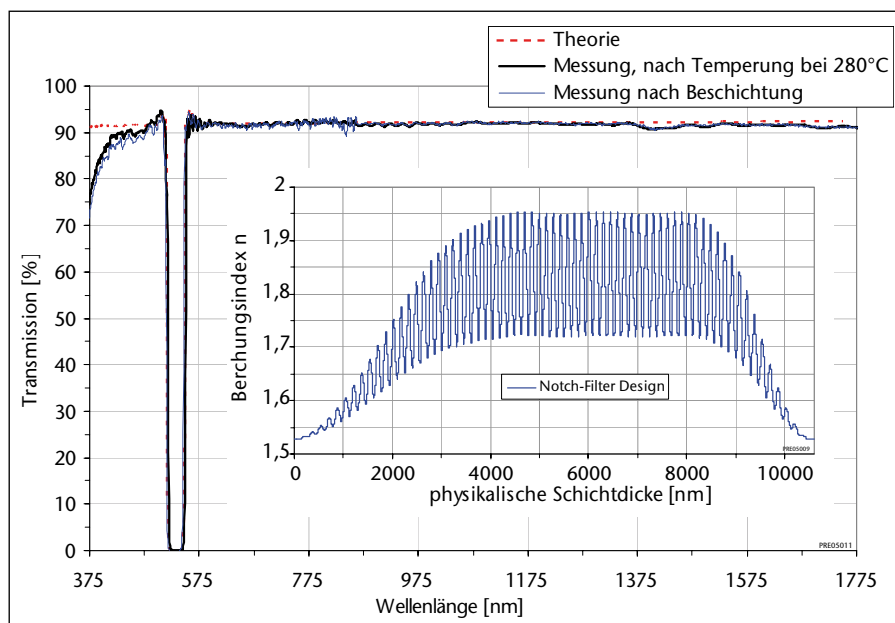


ABB. 7: Gemessenes Spektrum und Design eines IBS-Rugate-Filters: Notch-Filter für die Wellenlänge 532 nm, Materialien TiO_2 und SiO_2 .

Literatur

[1] D. T. Wei, A. W. Louderback, US 4, 142, 958: Method for fabricating multi-layer optical films, 04, (1978)

[2] D. Wandt et al., External cavity laser diode with 40 nm continuous tuning range around 825 nm. Optics Communications Vol. **183**, p.81 (1996)

[3] R. Paschotta et al., 82% efficient continuous-frequency doubling of 1.06 μm using a monolithic MgO:LiNbO3 resonator. Optics Letters Vol. **19**, Nr. 17 (1994)

[4] Verbundprojekt: „Effiziente Ionenstrahl-Zerstäubungskonzepte für die flexible Optikfertigung (EIKON)“, Teilvorhaben des LZH: „Erprobung von Ionenstrahl-Zerstäubungsprozessen für die industrielle Anwendung“, gefördert im BMBF-Rahmenkonzept „Forschung für die Produktion von morgen“, FKZ: 02PD2561, 01.01.2003 bis 31.03.2007

[5] D. Ristau, H. Ehlers, T. Gross, M. Lappschies, Optical broadband monitoring of conventional and ion processes, Appl. Opt. Vol. **45**, No. 7: pp. 1495–1501 (2006)

[6] M. Jupé, M. Lappschies, L. Jensen, K. Starke, D. Ristau, Improvement in laser irradiation resistance of fs-dielectric optics using silica mixtures. Proc. SPIE Vol. **6403** (2006)

[7] Y. Katagiri, H. Ukita, Ion beam sputtered $(\text{SiO}_2)_x(\text{Si}_3\text{N}_4)_{1-x}$ antireflection coatings on laser facets produced using $\text{O}_2\text{-N}_2$ discharges, Appl. Opt. Vol. **29**, No. 34, pp.5074–5079 (1990)

[8] D. Ristau et al., Laser induced damage of dielectric systems with gradual interfaces at 1.064 μm . NIST Spec. Publ. No. 775, pp.414–426 (1988)

[9] A. Starke, Herstellung und Analyse von Siliziumoxinitridschichten für Laseranwendungen, Dissertation Universität Berlin (1994)

[10] B. J. Pond et al., Stress reduction in ion beam sputtered mixed oxide coatings. Appl. Opt. Vol. **28**, No. 14, pp.2800–2805 (1989)

[11] C.-C. Lee et al., Rugate filters made with composite thin film by ion beam sputtering. Proceedings of the Conference on Optical Interference Coatings, OSA Technical Digest p.TH10 (2004)

[12] M. Lappschies, B. Görtz, D. Ristau, Application of optical broadband monitoring to quasi-rugate filters by ion beam sputtering. Proceedings of the Conference on Optical Interference Coatings, OSA Technical Digest p.TuE4 (2004)

SciTec Career

... the ultimate global JobMachine
for scientists and engineers.

www.scitec-career.com

Online vacancies worldwide in physics,
chemistry, materials science and life sciences.

WILEY-VCH