Rugate Filter und Mischschichten für optische Hochleistungskomponenten

Von der Fakultät für Mathematik und Physik
der Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover

zur Erlangung des Grades

Doktor der Naturwissenschaften
Dr. rer. nat.

genehmigte Dissertation

von

Dipl.-Phys. Marc Lappschies

geboren am 26.03.1971 in Hannover

2009

Kurzzusammenfassung

Marc Lappschies

Rugate Filter und Mischschichten für optische Hochleistungskomponenten

Die Entwicklungen der optischen Technologien stellen immer schärfere Anforderungen an die zum Einsatz kommenden Interferenzfilter. Neben den gesteigerten spektralen Spezifikationen sind auch nichtoptische Eigenschaften wie eine hohe Leistungsverträglichkeit für Laseranwendungen von wachsendem Interesse. Dabei ist absehbar, dass die konventionellen Verfahren der Dünnschichttechnolgie an ihre Grenzen stoßen und andere bzw. neuartige Konzepte erforderlich werden. Als in dieser Hinsicht weiteren Entwicklungsschritt wird die Rugate Technologie angesehen. Dieses alternative Verfahren zur Modifikation der spektralen Eigenschaften basiert auf der Modulation des Brechungsindexes entlang der Lichtausbreitungsrichtung ohne abrupte Materialwechsel. Hiervon werden insbesondere nicht-optische Verbesserungen erwartet. Einen möglichen weiteren Vorteil bietet diese Methode bei dem Auffinden von Design-Lösungen zur Darstellung spezifizierter spektraler Übertragungsfunktionen. Während sich die theoretischen Arbeiten zu dem Thema auf die 80er Jahre konzentrierten konnte bislang kein Beschichtungsverfahren die wesentlichen Vorteile dieses Konzepts vereinigen. Die Hauptprobleme lagen hierbei in der geeigneten Kontrollmöglichkeit des Beschichtungsprozesses sowie der Stabilität der Beschichtungsparameter. Mit der vorliegenden Arbeit wird eine Lösung dieser Problematik mittels des Ionenstrahlzerstäubungs-Verfahrens demonstriert. Es konnte gezeigt werden, dass aus simultanem Sputtern zweier Materialien Mischschichten hervorgehenden, die bereits verbesserte Eigenschaften aufweisen. Unter Verwendung eines Zonentargets ließen sich oxidische Materialien mit einer höheren Temperaturbeständigkeit und einem in den UV-Bereich erweiterten transparenten Bereich herstellen. Die durch unterschiedliche Positionierung des Targets reproduzierbar darstellbaren Brechungsindizes ermöglichten zusammen mit der optisch breitbandigen Schichtdickenmonitorierung eine Realisierung von nahezu beliebigen Brechwertprofilen. Nach dem Darlegen der Theorie zur Berechnung solcher Gradientenschichtsysteme konnten Beispiele für verlässlich hergestellte Rugate Filter vorgestellt werden, die aus mehreren hundert Schichten nur weniger Nanometer Dicke bestehen aber dennoch die gewünschte spektrale Charakteristik erfüllen. Die Anwendung normgerechter Charakterisierungsverfahren ergab bei den Standardwellenlängen für das Streu- und Absorptionsverhalten keine wesentliche Verbesserung, wohl aber bei der laserinduzierten Zerstörschwelle. Hier konnte bei hochreflektierenden Optiken die LIDT um einen Faktor 10 gegenüber den konventionell hergestellten Beschichtungen erreicht werden. Es wird das enorme Potenzial dieser Beschichtungsvariante verdeutlicht, dass hier erstmals als kontrollierbares Konzept vorgestellt wird.

Schlagworte: *Rugate Filter, Mischschichten, Dünnschichttechnolgie, Ionenstrahlsputtern, optisches Breitbandmonitorieren, Dünnschicht-Designsynthese*

Abstract

Marc Lappschies

Rugate filters and mixtures for optical high performance components

Developments in optical technologies demand for ever increasing requirements upon employed interference filters. The spectral specifications to fulfil become harder and also improvements in non-optical properties particularly the laser power handling capability are of growing interest. In this connection conventional processes of thin film technology tend to reach a limit. Thus new or alternative deposition processes need to be established. The rugate technology seems to be a promising concept which is based on the alternative method to modify the spectral properties of a thin film device by altering the refractive indices gradually along the direction of propagation of light. Because of the lack of abrupt material changes especially non-optical properties should be improvable. Also advantages concerning design synthesis to meet spectral requirements are expected. While theoretical work is concentrated in the eighties no deposition process has been able to combine these expected improvements until now. General problems have been both the ability to control the deposition process and the stability of the process itself. The presented thesis demonstrates a solution to these problems by introducing the ion beam sputter process. It could be shown that mixtures produced by simultaneous sputtering of two materials already reveal improved properties. Utilizing a zone target oxide materials could be manufactured which exhibit a higher temperature resistance and an extended transparency into the UV spectral region. By moving the target to prescribed positions, defined refractive indices can be reliable adjusted. In combination with an optical broadband monitoring device the approach has been able to realize almost arbitrary refractive index profiles. After presenting theoretical aspects to describe the underlying model of gradual layer systems examples of reproducible fabricated rugate filters are given. These structures consisted of hundreds of layers of a few nanometre thickness but still fulfilled the spectral requirement. The application of standardized measurement procedures showed no general improvement in scattering and absorption losses. But the laser induced damage threshold could be significantly increased. The measurement applied to rugate high reflecting components revealed a dramatic increase by a factor of ten compared to conventionally deposited mirrors. The enormous potential of this deposition method is illustrated while the rugate concept is presented the first time as fully controllable process.

Keywords: *Rugate filters, mixtures, thin film technology, ion beam sputtering, optical broadband monitoring, thin film design synthesis*

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung 1

2 Mathematische Methoden zur Beschreibung der optischen Wirkung von Gradienten-Schichtsystemen 4

2.1 Grundlagen zur Berechnung der Reflexion an inhomogenen Schichten 4

2.2 Folgerungen aus der inhomogenen charakteristischen Matrix 7

2.3 Darstellung mittels der Methode der Fouriertransformation 8

2.3.1 Entwicklung des Fouriertransformationsansatzes 9

2.3.2 Folgerungen aus dem Fouriertransformationsformalismus 12

2.4 Beispielrechnungen für den Spezialfall sinusartiger Modulation 14

2.4.1 Rein periodische Sinusstruktur 14

2.4.2 Anwenden der Fensterung 19

2.5 Direkte Fourier-Synthese: Beispiel Chirped Mirror 22

2.6 Softwarelösung zur Design-Generierung 25

2.6.1 Rugate-Modul des „SPEKTRUM“-Programms 25

2.6.2 Approximation von Mischsystemen mittels zweier Materialien 26

3 Herstellung und Qualifizierung ionenstrahlgesputterter dielektrischer Schichten 29

3.1 Prinzip der Ionenstrahlzerstäubung 29

3.2 Verwendeter Anlagentyp 31

3.3 Optisch breitbandiges Monitorieren von dielektrischen Schichtsystemen 32

3.3.1 Dickenbestimmung der wachsenden Schicht 33

3.3.2 Schichtdickenkontrolle sehr dünner Schichten 36

3.3.3 Untersuchung von Fehlerquellen und der Fehlerpropagation 37

3.3.4 Optisches Monitorieren von Rugate Filtern 43

3.4 Charakterisierung an Hochleistungsoptiken 45

3.4.1 Absorptionsbestimmung mittels Laserkalorimetrie 46

3.4.2 Die LIDT-Messprozedur 46

4 Entwicklung des Kodepositionsverfahrens 48

4.1 Aufstellen eines geeigneten Mischmodells der Dielektrika 48

4.2 Technische Umsetzung des Kosputter-Prozesses 52

4.2.1 Vorexperiment zur Mischbarkeit 52
4.2.2 Das positionierbare Zonentarget 53
4.3 Beschreibung der optische Eigenschaften kodeponierter Mischschichten 54
4.4 Vergleich der Zwei-Materialienapproximation mit dem Kodepositionverfahren 58
4.4.1 Homogene Mischschicht 58
4.4.2 Schmalbandfilter-Approximation mit zwei Materialien 60
4.5 Anwendung des „blue shifts“ 61
5 Kontrollierte Herstellung von Rugate Filtern 64
5.1 Konzept zur Herstellung 65
5.2 Infrarot-Reflektor 67
5.3 Winkeltolerante AR 69
5.4 Schmalbandige Reflexionsfilter 72
6 Ergebnisse der Charakterisierung an Mischschichten und Rugate Filtern 79
6.1 Beschreibung der Proben 79
6.2 Messergebnisse der Absorption mittels Laserkalorimetrie 81
6.3 Streuung 84
6.4 Temperaturbeständigkeit 85
6.5 Messergebnisse der laserinduzierten Zerstörschwelle 86
7 Zusammenfassung und Fazit 94
Literatur 97

1 Einleitung

Die Fertigung dielektrischer Schichten mittels PVD-Verfahren (PVD = Physical Vapour Deposition) zählt zu den Schlüsseltechnologien für eine Vielzahl von optischen Anwendungen aus unterschiedlichsten Industriezweigen. Als Beispiele seien hochreflektierende Spiegel für die Lasertechnologie und, am geläufigsten, Vergütungsschichten zur Reflexionsminderung genannt. Derartig beschichtete Komponenten werden in sämtlichen Sparten der Fein- und Präzisionsoptik benötigt.

In den Bereichen der Laserentwicklung oder der Grundlagenforschung werden beschichtete optische Komponenten oftmals extremen Strahlungsbelastungen ausgesetzt. Bestehende Limitierungen auf Grund der begrenzten Leistungsverträglichkeit der Funktionsbeschichtung selbst können hierbei oftmals als Hinderungsgrund für weitere Entwicklungsschritte angesehen werden. Gleichzeitig steigt der Bedarf an Komponenten mit immer komplexer werdenden Funktionalitäten. Diese ergeben sich z.B. zwangsläufig aus der Miniaturisierung im Gerätebau, um immer günstigere und kompaktere Bauformen realisieren zu können.

Als gängige PVD-Beschichtungsverfahren haben sich inzwischen das thermische Elektronenstrahl- und Schiffchenverdampfen, oft mit Ionenunterstützung (IAD - Ion Assisted Deposition) und das Magnetronsputtern, hauptsächlich für großflächige Komponenten, durchgesetzt. Speziell für Beschichtungen im nahen UV-, sichtbaren und Nah-Infrarotbereich liefert das Ionenstrahlzerstäubungsverfahren (IBS - Ion Beam Sputtering), wenn auch auf kleinerer Fläche, die kompaktesten und qualitativ hochwertigsten Schichten mit geringsten optischen Verlusten. Im Allgemeinen bestehen die Schichtsysteme aus zwei, selten mehr, dielektrischen Materialien mit unterschiedlichen Brechungsindizes. Werden diese abwechselnd auf die zu beschichtende Komponente aufgebracht, führen interne Reflexionen an den Grenzflächen zur Interferenz des einfallenden Lichts. Dessen spektral reflektierte und transmittierte (und auch absorbierte) Intensitätsanteile können durch geeignete Wahl der Schichtdicken gezielt beeinflusst werden. Eine komplexe Funktionalität, wie sie z.B. dichroitische Spiegel oder Polarisationskoppler aufweisen sollen, erfordert oft mehrere zehn bis über einhundert Schichten. Deren Umsetzung hängt dabei sowohl vom Einhalten der spezifizierten Schichtdicken innerhalb gewisser Toleranzgrenzen, als auch von einer stabilen und reproduzierbaren Schichtqualität ab.

Inzwischen sind die Beschichtungsprozesse technisch soweit ausgereift, dass nur andere bzw. neuartige Konzepte wesentliche Impulse zu einer weiteren Verbesserung liefern können.

In dieser Arbeit wird daher auf eine weitere Methode zur Modifizierung der Übertragungsfunktion durch dielektrische Filter zurückgegriffen, nämlich der Modulation des Brechwertes mit der Schichtdicke. Hierbei wird auf diskrete Wechsel vom hoch- zum niedrigbrechenden Material verzichtet und stattdessen ein kontinuierliches Brechwertprofil aufgebracht. Derartige Filtersysteme werden auch oft Rugate Filter (engl: **corrugated,** gewellt) genannt. Diese Bezeichnung bezieht sich ursprünglicher Weise auf rein periodische Strukturen, soll aber in dieser Arbeit auch generell für Mischschichtsysteme verwendet werden. Die von diesem Verfahren erhofften Vorteile entsprechen den Lösungsansätzen für die beiden genannten Schlüsselprobleme: der Erhöhung der Strahlungsresistenz und der gesteigerten Flexibilität in der Designfindung.
Bis dato konnte allerdings kein Beschichtungsverfahren die Vereinigung dieser beiden Aspekte demonstrieren. Die hauptsächliche Problematik lag dabei in der mangelnden Beherrschbarkeit des Prozesses, um bestimmte Brechzahlprofile in ausreichender Präzision abscheiden zu können.

Mit der vorliegenden Arbeit wird die Qualifizierung des IBS-Beschichtungsverfahrens für die Herstellung von Misch- und Gradientenschichtsystemen, bzw. Rugate Filtern, analysiert. Dies geschieht mit besonderem Augenmerk auf Anwendungen für die Lasertechnologie.
Dabei wird untersucht, ob und in welcher Weise die beiden genannten Kategorien von erwarteten Vorteilen - gesteigerte Schichtqualität und verfeinerte Designsynthese – zutreffen können. Hierzu werden in Kapitel 2 zunächst die fundamentalen mathematischen Modelle zur Beschreibung von graduellen Dünnschichtsystemen erläutert. Es zeigt sich, dass die Theorie der Rugate Filter eng mit der historischen Entwicklung der Dünnschichttechnologie verknüpft ist. Der dabei entwickelte Fouriertransformationsansatz wird als alternatives Designkonzept diskutiert. Es ergibt sich die Möglichkeit, den Brechwertverlauf durch funktionale Zusammenhänge zu beschreiben und auf diese Weise mittels einfacher Bausteine das spektrale Verhalten zu beeinflussen. Eine Rückrechnung mittels der inversen Fouriertransformation von einem spektralen Verlauf zu einem Brechwertprofil als Möglichkeit der direkten Designsynthese ist ebenfalls zu prüfen. Hier würden sich als Lösungen kontinuierliche Brechwertprofile ergeben. Die dabei gewonnenen Erkenntnisse fließen schließlich in die Anpassung der existierenden Designsoftware ein.
Nach einer kurzen Erläuterung des IBS-Beschichtungsverfahrens und der technischen Anlagenausführung in Kapitel 3 wird die Methode der breitbandigen Transmissionsmessung zur In-situ Schichtdickenkontrolle beschrieben. Das entwickelte Gerät wird als wesentlicher Bestandteil für eine technische Umsetzung neuartiger Beschichtungsvarianten beschrieben.
Während mittels dieses Breitbandmonitors bereits die „rapidprototyping“-Fähigkeit für die Herstellung von Dünnschichtfiltern demonstriert werden konnte, muss die Anwendbarkeit dieses Verfahrens zur kontrollierten Abscheidung von vielen sehr dünnen Schichten mit Dicken von wenigen oder sogar weniger als einem Nanometer erst gezeigt werden. Hierfür

ist eine geeignet adaptierte Prozesskontrolle essentiell. Dies gilt insbesondere, wenn der Beschichtungsprozess zu keinem Zeitpunkt unterbrochen werden soll.
Da es unabdingbar ist, die neuartigen Beschichtungen im Vergleich zu den konventionell hergestellten zu qualifizieren, werden die verwendeten normgerechten Charakterisierungsmethoden für Laseroptiken dargelegt, bevor im folgenden Kapitel 4 das Kodepositionsverfahren zur Herstellung von dielektrischen Mischschichten vorgestellt wird. Hierzu muss zunächst ein geeignetes Mischmodell formuliert werden, mit dem sich die herstellbaren Schichten beschreiben lassen. Nach dem Feststellen der optischen Eigenschaften der Einzelschichten können erste Mischsysteme hergestellt werden.
In Kapitel 5 wird schließlich das Konzept zur Herstellung von Rugate Filtern vorgestellt. Es soll aufgezeigt werden, dass der stabile IBS-Prozess in Verbindung mit der breitbandigen optischen Monitorierung geeignet ist, nahezu beliebige Brechwertprofile mit ausreichender Präzision zu realisieren. Dabei wird anhand von Beschichtungsbeispielen die Entwicklung zu immer feineren Diskretisierungsschritten und dünneren Schichten aufgezeigt. In diesem Zusammenhang wird der Einfluss von Prozessschwankungen untersucht, wobei die Möglichkeit der Monitorierungssimulation als Analysewerkzeug hinzugezogen wird.
Im letzten Kapitel 6 werden diese Rugate Filter mit herkömmlichen Schichtsystemen bezüglich ihrer opto-mechanischen Eigenschaften verglichen. Hierbei kommen die Charakterisierungsverfahren zum Bestimmen der Absorption, Streuung und der laser-induzierten Zerstörschwelle zum Einsatz. Besonders die Ergebnisse des letztgenannten Prüfverfahrens sind von Interesse. Hier soll sich zeigen, ob die hergestellten Rugate Filter tatsächlich eine gesteigerte Leistungsverträglichkeit aufweisen.