

# Rugatefilter für den nahen infraroten und visuellen Spektralbereich

Olaf Stenzel, Dieter Gäbler, Norbert Kaiser



Olaf Stenzel

---

## Einleitung

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

---

## Die Idee

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

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

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

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

# Rugate filters for the near infrared and visible spectral regions

Olaf Stenzel, Dieter Gäbler, Norbert Kaiser

## Introduction

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

## General idea

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

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

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



Dieter Gäbler



Norbert Kaiser

## Erste Ergebnisse

In unseren Experimenten streben wir derzeit an, Rugatefilter auf oxidischer Basis herzustellen. Der sinusförmige Brechzahlverlauf soll dabei durch Mischung hoch- und niedrigbrechender Schichtmaterialien mit nahezu sinusförmig variiertem Mischverhältnis realisiert werden. Als niedrigbrechende Substanz kommt dabei Siliziumdioxid ( $\text{SiO}_2$ ) zum Einsatz, wogegen als hochbrechende Substanz das Niobiumpentoxid ( $\text{Nb}_2\text{O}_5$ ) Verwendung findet. Beide Materialien werden gleichzeitig aus Elektronenstrahlverdampfern bei laufender Plasmastützung verdampft. Durch gezielte Variation der Verdampfungsraten scheidet sich auf dem Substrat eine Mischung mit dem durch das Mischverhältnis (und damit letztlich das Ratenverhältnis) gesteuerten Brechungsindex ab.

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

Das ist in Abb. 1 gezeigt, wo die experimentell ermittelten Brechungsindizes einiger Mischungen zusammen mit denen von  $\text{SiO}_2$  und  $\text{Nb}_2\text{O}_5$  aufgetragen sind.

Mit der beschriebenen Methode ist es nun möglich, komplexe Schichtsysteme mit nahezu sinusförmigem Brechzahlprofil herzustellen. Abb. 2 zeigt das Reflexionsspektrum eines derartigen Rugatefilters mit 20 Perioden. Zum Vergleich ist ein herkömmlicher so genannter Quarterwave-Stack gezeigt, der aus alternierenden  $\text{SiO}_2$ - und  $\text{Nb}_2\text{O}_5$ -Schichten besteht. Beide Spektren sind unter senkrechtem Lichteinfall aufgenommen. Die Bandbreite des Reflexionspeaks wird durch den maximalen Brechzahlkontrast bestimmt. Da bei der Herstellung des Rugatefilters nicht zwingend der gesamte dynamische Bereich der in Abb. 1 dargestellten Brechungsindizes genutzt wurde, erhalten wir einen deutlich schmaleren Reflexionspeak als bei dem aus den Reinsubstanzen hergestellten Quarterwave-Stack.

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

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

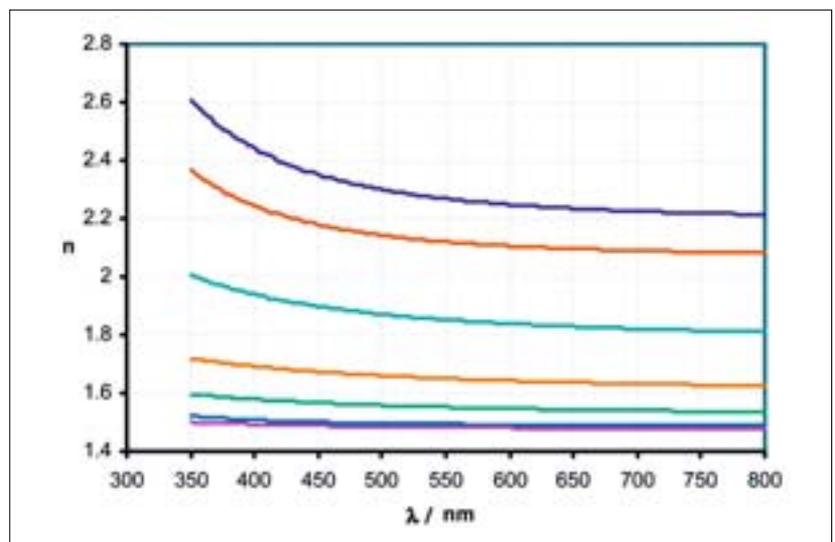
## Ausblick

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

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

Abb. 1: Brechungsindizes  $n$  von Mischschichten und Ausgangssubstanzen als Funktion der Wellenlänge  $\lambda$ . Die oberste Kurve zeigt den Brechungsindex von  $\text{Nb}_2\text{O}_5$ , die unterste den von  $\text{SiO}_2$ . Die dazwischenliegenden Kurven verdeutlichen den Brechungsindex von Mischschichten mit (von oben nach unten) sinkendem Anteil von  $\text{Nb}_2\text{O}_5$ .

Fig. 1: Refractive indices  $n$  of mixture films and the pure substances as a function of the wavelength  $\lambda$ . The top curve corresponds to  $\text{Nb}_2\text{O}_5$ , and the bottom curve to  $\text{SiO}_2$ . The intermediate curves correspond to mixtures with decreasing (from top to bottom) content of  $\text{Nb}_2\text{O}_5$ .



## First results

At present, we perform rugate filter deposition experiments utilizing oxide materials. The sinusoidal refractive index profile is prepared intermingling high- and low-refractive index materials with a variable (nearly sinusoidal) mixing ratio. We used silicon dioxide ( $\text{SiO}_2$ ) as the low refractive index material, and niobium pentoxide ( $\text{Nb}_2\text{O}_5$ ) as the high index material. Both materials are electron beam evaporated in high vacuum conditions with instantaneous plasma assistance. The desired refractive index profile can be achieved by precisely varying the evaporation rates of the high- and low-index materials.

It is experimentally established that the material mixtures produced by such co-evaporation processes have refractive indices that fall between those of the pure materials. This is demonstrated in Fig. 1, which shows the wavelength-dependent refractive indices of  $\text{SiO}_2$  and  $\text{Nb}_2\text{O}_5$  together with those of their mixtures.

By means of the technology described above it is possible to manufacture more complex optical coatings with a nearly sinusoidal refractive index profile. Fig. 2 shows the measured reflectance of such a rugate-filter that is built from 20 periods. For comparison, the figure also shows the reflectance of a conventional quarterwave-stack that consists of alternating  $\text{SiO}_2$ - and  $\text{Nb}_2\text{O}_5$ -films. Both spectra have been recorded at normal light incidence. The bandwidth of the reflection band is determined by the refractive index contrast. When producing rugate filters with a small modulation depth of the refractive index, the reflection band may be considerably narrower than in the case of a quarterwave stack built from the pure materials. This is also shown by Fig. 2.

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

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

## Outlook

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

### References:

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

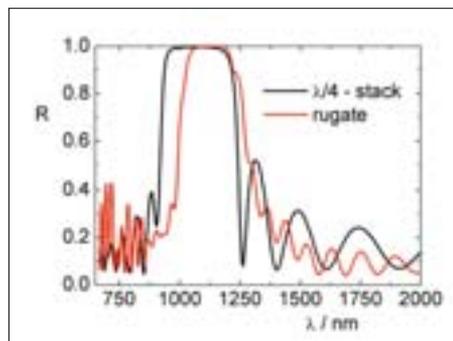


Abb. 2: Reflexionsvermögen eines Quarterwave-Stacks ( $\lambda/4$ -Stack, schwarz) und eines Rugatefilters (rot) als Funktion der Wellenlänge.

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



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

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