Superkontinuum Cavity Ring Down Messungen

- Hochgenaue Verlustmessungen für optische Schichten und Materialien -

Die Herstellung verlustarmer Schichtsysteme ist eine Basistechnologie zur Produktion optischer Komponenten. Der zentrale Parameter für die Klassifikation einer hochreflektierenden Schicht ist der spektrale Reflexionsfaktor $R(\lambda)$ bzw. der entsprechende Transmissionsverlust eines transparenten Bauteils oder einer Antireflexschicht. Ein an der Westsächsischen Hochschule entwickeltes breitbandiges Messverfahren zur hochgenauen Bestimmung optischer Verluste (besser 10⁻⁵) nutzt ein homogenes Superkontinuum (500 nm – 1650 nm) erzeugt mit Hilfe einer Photonischen Kristallfaser, welche mit Nanosekundenpulsen eines passiv gütegeschalteten Nd:YAG-Mikrochiplaser gepumpt wird.

Spektralphotometrie contra Cavity Ring Down

Insbesondere für sehr hohe Reflexionsfaktoren R>99,99x bzw. sehr geringe Transmissionsverluste ist die Anwendung herkömmlicher Reflexions- bzw. Transmissionsmessungen nicht mehr möglich. Sowohl die rauschbegrenzte Nachweisempfindlichkeit der entsprechenden Detektoren als auch die Intensitätsstabilität der eingesetzten Laserquellen verursachen in diesem Fall signifikante Messfehler, deutlich größer als die zu messenden Intensitätsunterschiede. Eine Alternative zur direkten Intensitätsmessung ist die Analyse des Zeitverhaltens eines optischen Aufbaus. Im Zentrum steht die aus der Cavity-Ring-Down-Spektroscopy [A. ÓKeefe, D.A.G. Deacon, Rev. Sci. Instrum. 59, 2544 (1988)] bekannten Messanordnung, bei welcher die zu messende Schicht Bestandteil eines stabilen optischen Resonators hoher Güte (cavity) ist. Die Messung des zeitlichen Abfalls der transmittierten Intensität eines Laserpulses (ring down) ermöglicht die Bestimmung der Verluste des optischen Resonators und damit der Reflektivität der Spiegel oder des Verlustes eingebrachter optischer Schichten bzw. Medien (Abb. 1).



Abb. 1: Grundprinzip der Cavity Ring Down Technik (CRD). Cavity Ring Down mit Weißlichtpulsen?

Ein wesentlicher Nachteil der etablierten CRD-Techniken ist der eingeschränkte Wellenlängenbereich der typischerweise eingesetzten abstimmbaren Laserquellen. Der Einsatz einer Weißlichtquelle hingegen ermöglicht die Ausdehnung der Arbeitswellenlänge vom sichtbaren Spektralbereich bis in den nahen Infrarotbereich. Entscheidend für die Messgenauigkeit und die Dynamik des Messverfahrens sind die Brillanz und das Zeitverhalten der Weißlichtquelle. Für stabile, reproduzierbare Einkopplung der Lichtpulse in den optischen Resonator ist der Einsatz einer Faserkopplung zwischen Weißlichtquelle und cavity praktisch unabdingbar. Die Flankensteilheit der Anregungspulse limitiert die maximal messbaren Verluste. Die Rückflanke der Messpulse sollte sehr stabil und kürzer als $t_f \leq 1\mu s$ sein. Mechano-optisch modulierte Weißlichtquellen (thermische Lichtquellen, cw-Laser) aber auch Blitzlampen sind damit ungeeignet. Optimal für breitbandige CRD-Verlustmessungen ist der Einsatz einer sogenannten Superkontinuumquelle Unter dem erstmals von Alfano und Shapiro [R. R. Alfano, and S. L. Shapiro, "Emission in the region 4000 to 7000 Å via four-photon coupling in glass", Physical Review Letters 24, 584 (1970).] beschriebenem Superkontinuum versteht man extrem breitbandige Strahlung erzeugt durch die spektrale Verbreiterung eines monochromatischen Laserpulses hoher Intensität in einem stark nichtlinearen Medium.



Abb.2: Spektral zerlegtes Superkontinuum (500nm bis 1650nm, typische spektrale Leistungsdichte 0,9µW/nm, Intensitätsschwankungen kleiner 7 dB) erzeugt in einer Photonischen Kristallfaser (Nulldispersionswellenlänge 1040nm) gepumpt mit einem passiv gütegeschalteten Nanosekunden Nd:YAG-Mikrochiplaser (IMPEX HighTech GmbH).

Für die CRD-Messungen kommt eine Superkontinuum

quelle bestehend aus einer 20m langen Photonischen Kristallfaser (Nulldispersionswellenlänge 1040nm) gepumpt mit einem passiv gütegeschalteten Nd:YAG-Mikrochiplaser (IMPEX HighTech GmBH, Pulslänge t_w = 2ns, E_P = 12µJ, Wiederholrate 15 kHz) zum Einsatz. Das hoch brillante Superkontinuum besitzt im Bereich 500 nm bis 1650 nm eine flache Leistungskurve (typische spektrale Leistungsdichte 0,9µW/nm, Intensitätsschwankungen kleiner 7 dB) und eine Flankensteilheit der Weißlichtpulse von t_f ≤ 1ns.

Reinraum oder Flowbox?

Die Abbildung 3 zeigt den prinzipiellen Aufbau des Verlustmessplatzes. Ein PC (lab view-Programm) steuert über den Controller des Mikrochiplasers und einen zusätzlichen Modulator die Erzeugung der Superkontinuumpulse synchron zur Datenaufnahme. Die vorgefilterten Weißlichtpulse werden durch ein Linsensystem an den optischen Resonator angepasst. Die Probe ist Bestandteil des optischen Resonators, entweder direkt im Modenvolumen (Antireflexbeschichtungen, hochtransparente Materialien unter dem Brewsterwinkel) oder als einer der Resonatorspiegel (hochreflektierende Beschichtungen). Der Signalnachweis erfolgt mit Hilfe eines Arrays von Lawinendioden bzw. einen schnellen sequenziell arbeitenden CCD-Sensor.



Abb. 3: Prinzipieller Aufbau des Weißlicht-CRD-Verlustmessplatzes

Zur Messung extrem geringer Verluste im ppm-Bereich muss das aktive Messvolumen gegen Umgebungseinflüsse abgeschirmt werden. Die Abbildung 4 zeigt den kompakten transportablen Messaufbau integriert in eine Miniflowbox (elektronische Komponenten und der Controller im Gehäuseunterteil). Im Messvolumen wird ca. zwei Minuten nach dem Probenwechsel eine Partikelkonzentration (0,5 µm Partikel) von kleiner 1000 Partikel pro Quadratzoll erreicht.



Abb. 4: Kompakter Messaufbau integriert in eine Miniflowbox. Die elektronischen Komponenten sowie der Kontroller sind im Gehäuseunterteil untergebracht.

Anwendungsbeispiel hochreflektierender Laserspiegel

Die Abbildung 5 zeigt eine typische Ring-Down-Kurve eines 3,5 ns Pulses, welcher in einen 15cm langen Zweispiegelresonator geringer Güte eingekoppelt wurde. Das Messsignal zeigt die typischen periodischen Intensitätsmaxima, verursacht durch die Auskopplung des im Resonator umlaufenden optischen Pulses. Die Einhüllende der Intensitätsmaxima kann mit einer Expotentialfunktion angepasst werden (lab view Routine). Aus der Abfallzeitkonstante wird die Reflektivität bzw. der optische Verlust bei der entsprechenden Wellenlänge berechnet. Beispielhaft zeigt die Abbildung 5b den Verlauf der Reflektivität eines hochreflektierenden HeNe-Laserspiegels über einen Bereich von 100nm aufgenommen mit einer Genauigkeit von $2 \cdot 10^{-6}$!



Grenzen und Möglichkeiten

Der Einsatz einer Superkontinuumquelle auf Basis einer mikrochiplasergepumpten photonischen Kristallfaser ermöglicht hochgenaue Cavity Ring Down Verlustmessungen über einen extrem großen Spektralbereich von mehr als 1000 nm (VIS bis NIR). Bedingt durch die optimale Form und Länge der Superkontinuum-Weißlichtpulse wird dabei eine Dynamik von mehr als 50000 ppm erreicht. So können Reflektivitäten im Bereich von R = 0,95 bis R = 0,99995 oder Transmissionsverluste im Bereich von τ = 0.05 bis τ = 0.00005 mit einer Genauigkeit besser 2 · 10⁻⁶ gemessen werden.

Die Arbeiten werden gefördert durch das FH³-Programm des Bundesministeriums für Bildung und Forschung.