

Projektplan

Quant-UV: Quantisierende Nanolamine für brechwertoptimierte UV-Interferenzfilter (21364 N)

Forschungsziel

Lassen sich die Anforderungen an die Beschichtung mit klassischen Materialien nicht mehr erfüllen, so können sie durch die Ausnutzung einer Struktur aus quantisierenden Schichtstapeln, den sogenannten Quantisierenden Nanolaminen (QNL), erreicht werden.

Die Projektziele können in zwei grundlegende Bereiche eingeteilt werden. Im ersten Bereich werden die bereits vorhandenen Kenntnisse über die Herstellung und Eigenschaften der QNL vertieft und vervollständigt, um eine geschlossene Betrachtung des Potentials der QNL zu ermöglichen. Dafür werden Modellstrukturen unterschiedlicher Materialkombinationen hergestellt und charakterisiert. Die maßgeblichen Eigenschaften umfassen vor allem die Absorption im UV-Bereich, den Brechungsindex im Vergleich mit etablierten Beschichtungsmaterialien und die Laserzerstörschwelle vor allem im sub-Pikosekundenbereich. Zusätzlich wird der realisierbare geometrische Aufbau der Modellstrukturen mithilfe TEM-Mikroskopie aufgelöst. Die so erhaltenen Ergebnisse werden mit dem vorhandenen quantenmechanischen Modell abgeglichen um die Eigenschaften der QNL, abhängig von Materialkombination und Schichtstruktur präzise vorhersagen zu können.

Nachdem die neue Materialklasse umfassend charakterisiert ist, wird gemäß dem zweiten Teil der Projektziele auf die praktische Anwendbarkeit hingearbeitet. Dazu werden die QNL-Materialien in etablierte Designprozesse für optische Schichtsysteme eingebunden und optische Komponenten verschiedener Komplexitätsgrade realisiert. Im Projekt sind einige Modellsysteme vorgesehen, die das Anwendungsspektrum optischer Hochleistungskomponenten komplett abdecken. Vorgesehen sind dabei sowohl hochreflektierende und antireflektierende Komponenten mit geringen Verlusten, sowie spektrale Filter in klassischer und in Rugate-Ausführung. Dadurch können die Eigenschaften und die theoretisch vorhergesagte Flexibilität der QNL verifiziert und mit etablierten Materialien, sowie ternären Mischungen verglichen werden.

Durch diese Kombination grundlegender Materialstudien und Überprüfung in anwendungsnahen Szenarios wird die neue Materialklasse umfassend charakterisiert und auf spätere, industriennahe Verwendung vorbereitet.

Arbeitsplan

Arbeitspaket	PM/ HIWI	2020												2021												2022												2023		
		O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	J	F	M									
AP1: Theorie	12/0	[Blue bars]																																						
THEO 1: Optische Bandkante		[Blue bars]																																						
THEO 2: Brechwertberechnung		[Blue bars]																																						
THEO 3: Untersuchungen Bandkante zu Brechwert		[Blue bars]																																						
THEO 4: Modellbildung Strukturabweichung		[Blue bars]																																						
M1: Software für Bandkante-Brechwert-Optimierung		[Blue bars]																																						
AP2: Anpassung des Beschichtungsprozesses	3/6	[Orange bars]																																						
AnOp 1: Anpassung der Mechanik		[Orange bars]																																						
AnOp 2: Optimierung der Steuerung		[Orange bars]																																						
M2: Reproduzierbare Herstellung von QW-Strukturen		[Orange bars]																																						
AP3: Herstellung von QNL-Modellstrukturen	7/6	[Green bars]																																						
MOD 1: Ta ₂ O ₃ /SiO ₂		[Green bars]																																						
MOD 2: HfO ₂ /SiO ₂		[Green bars]																																						
MOD 3: Nb ₂ O ₅ /SiO ₂		[Green bars]																																						
MOD 4: Materialkombinationen PA		[Green bars]																																						
AP4: Herstellung komplexer Beschichtungen mit QNL	5/6	[Pink bars]																																						
HER 1: Low-Loss Komponenten		[Pink bars]																																						
HER 2: Komplexe Komponenten		[Pink bars]																																						
M3: Demonstration HR266 und AR266		[Pink bars]																																						
AP5: Charakterisierung der QNL	1/12	[Yellow bars]																																						
CHA 1: Allgemeine Qualitätsmerkmale		[Yellow bars]																																						
CHA 2: Verluste		[Yellow bars]																																						
AP6: Projektleitung und Übertragung in die Wirtschaft	2/0	[Dark Blue bars]																																						
EK: Erfolgskontrolle und Verwertung		[Dark Blue bars]																																						
PK: Produktkonzepte		[Dark Blue bars]																																						
Projektberichte und Dokumentation		[Red bars]																																						
Zwischenbericht 2020		[Red bars]																																						
Zwischenbericht 2021		[Red bars]																																						
Zwischenbericht 2022		[Red bars]																																						
Projektabschlussbericht		[Red bars]																																						
Summe MM	30/30																																							

Lösungsweg zur Erreichung des Forschungsziels

Die Arbeiten Am Laser Zentrum Hannover e.V. konzentrieren sich zunächst auf die theoretischen Beschreibungen der QNL und bereiten damit die Materialstudien vor. Entscheidende Fragen sind: Welche Brechwert- und Transmissionsbereiche lassen sich mit den verfügbaren Materialien realisieren, wenn man von realistischen Minimalschichtdicken ausgeht? Welchen Einfluss haben die Kenngrößen wie Bandkante und Dicke der Barrieren auf die Blauverschiebung? Welche Auswirkungen haben abgerundete Potentialverläufe und Mischphasen auf die Quantisierungen und damit auf Funktionalität der QNLs? Wie wirken sich Beschichtungsfehler, also zu dünne oder zu dicke Schichten auf die beabsichtigten Eigenschaften aus?

Anschließend werden experimentelle Studien durchgeführt, um die Vorhersagen an ausgewählten Modellsystemen, sprich unterschiedliche Materialien, zu verifizieren. Für die Herstellung der QNL verwendet das Laser Zentrum Hannover e.V. das Ionenstrahlzerstäubungsverfahren (Ion Beam Sputtering, IBS). Grundlage für die experimentellen Untersuchungen sind QNL, die als Gesamtheit eine optische Einzelschicht bilden. Das heißt, da die Schichtdicken in den QNL nur maximal wenige Atomlagen betragen, wirkt die Beschichtung optisch wie eine Einzelschicht. Dies ermöglicht, dass die standardisierten Charakterisierungsmethoden, die für optische Komponenten entwickelt wurden, eingesetzt werden können und damit auch ein direkter Vergleich zu konventionellen Beschichtungen gegeben ist. Die Absorptionskanten werden mit dem Tauc-Plot bestimmt und die Brechwerte mit einer etablierten Dünnschichtsoftware aus den spektralen Reflexions- und Transmissionsmessungen bestimmt. Für die optischen Designs kann eine Schicht auf QNL als einfache optische Schicht betrachtet werden.

Dies gilt auch für die Schichtdesigns, die im Anschluss an die Einzelschichtstudien hergestellt werden sollen. Dabei werden zunächst AR-V-Coatings mit Zweischichtsystemen beschichtet. Dabei ist nur eine

QNL-Schicht erforderlich und der Aufwand für die Beschichtungen ist vergleichsweise gering. Da die Beschichtungen nur über die Beschichtungszeit gesteuert werden, ist bei der Vielzahl von Schichtwechseln mit einem Fehler für die Gesamtschichtdicke zu rechnen. Aus diesen Beschichtungen kann der Toolingfaktor bestimmt werden. Die Charakterisierung der V-Coatings gibt bereits Aufschluss über die Verluste der Beschichtungen. Das heißt nicht nur die Absorptionskante, sondern auch die Verluste im transparenten Bereich müssen bestimmt werden. In traditionellen Beschichtungsprozessen, wie dem Elektronenstrahlverdampfen aber auch in ionengestützten Prozessen wurde im Bereich der Grenzflächen zwischen zwei Materialien immer wieder erhöhte Absorptionen gemessen. Für die QNL würden selbst geringfügig höhere Verluste zu sehr großen Gesamtverlusten führen, da sich die Verluste jeder einzelnen Grenzfläche aufaddieren. Deshalb wurde hier für das Projekt ein entsprechender Meilenstein definiert.

Sollten diese Beschichtungen in der vorhergesagten Weise hergestellt werden können, ist der nächste Schritt die Herstellung von hochreflektierenden Spiegeln. Diese bestehen aus sogenannten optischen „Quaterwavestacks“, das heißt jede optische Schicht hat eine Schichtdicke von einem Viertel der Wellenlänge. Dies führt zu einer konstruktiven Überlagerung aller im optischen Schichtsystem reflektierten Wellen und damit zu einer hohen Reflektivität der Gesamtkomponente. Im Gegensatz zu den V-Coatings sind hier in der Regel über zwanzig optische Schichten notwendig, um eine hohe Reflektivität zu erreichen. Der Aufwand für die Beschichtungen ist somit ungleich höher. Nachfolgend soll dieses Design variiert werden, sodass Spiegel aus Kombinationen von Schichten klassischer Oxiden und QNL hergestellt werden. Diese Komponenten sind vor Allem für die Anwendungen im Wellenlängenbereich interessant, in dem die klassischen Materialien auch transparent sind. In diesem Falle können, die QNL zu einer Erhöhung der Zerstörschwelle führen, da auch die Leistungsbeständigkeit von dielektrischen Materialien mit der Absorptionskante der Materialien korreliert ist.

Abschließend soll noch untersucht werden, ob Schichten aus QNL auch in komplexe Designs integriert werden können. Da die QNL aus binären Oxiden und nicht aus Mischungen bestehen, wurde prognostiziert, dass die Variation der Brechwerte über längere Beschichtungszeiten deutlich geringer ist als bei Mischoxiden. Diese Eigenschaft sollte sich für die Herstellung von Präzisionsbeschichtungen nutzen lassen. Beispiele hierfür sind gechirpte Spiegel, Phasenretarder oder Notchfilter. Derartige Komponenten sollten insbesondere gegen Ende der Projektlaufzeit herstellbar sein und exemplarisch die Leistungsfähigkeit von QNL demonstrieren.

Nutzen und wirtschaftliche Bedeutung des Forschungsthemas

Die technologische Innovation wird vor allem von Unternehmen der optischen Hochtechnologie genutzt werden können. Gemäß der derzeitigen Marktsituation sind dies vor allem Hersteller und Nutzer von Präzisionsoptiken für Laseranwendungen, Filter zur Spektralanalyse, für Polarisationsoptiken und phasensensitive Optiken zur zeitlichen Pulsformung. Wie die Marktstudie [Optical Coatings Market Size, Share & Trends Analysis Report 2019 – 2025, Grand View Research] darstellt, wird die Branche in den nächsten Jahren mit einem CAGR von erwarteten 9,1 % stark wachsen. Darin enthalten ist das Wachstum für entspiegelnde und hochreflektierende Beschichtungen sowie für Interferenzfilter. Entsprechend ist zu erwarten, dass sich die erfolgreiche Umsetzung des Konzeptes auch auf die Hersteller der Beschichtungsanlagen positiv auswirkt, da hier gezielte technologische Weiterentwicklungen angeregt werden. Durch die einfache Möglichkeit, ultrakurze Pulse in kürzere Wellenlängenbereiche zu konvertieren, ist insbesondere der Spektralbereich von 200 - 300 nm ins Interesse der Anwender gerückt. Da die Absorptionskanten der

meisten optischen Materialien aber in diesem Bereich liegen, lassen sich nur pulskomprimierende Komponenten mit vergleichsweise hohen Verlusten oder mit geringer Bandbreite und Gruppengeschwindigkeitsdispersion herstellen, die sich somit bisher nicht am Markt etablieren konnten. Die QNL erlauben hier eine gezielte Verschiebung der Absorptionskante und somit eine deutliche Verbesserung gegenüber der aktuellen Technologie. Neben Ultrakurzpulsoptiken lassen sich äquivalente Beispiele für andere Anwendungen aufzeigen, wodurch sich der Kreis der Nutzer auf den größten Teil der im Bereich der Präzisionsoptik tätigen KMUs und einige größere Unternehmen erweitert. Zur effektiven Nutzung der Technologie und der damit verbundenen spezifischen, vorwettbewerblichen Produktentwicklung, benötigen die Unternehmen jedoch einen Bezug zwischen geometrischen und quantenmechanischen sowie optischen Kenngrößen und fundierte Kenntnis der Toleranzen für unterschiedliche Systeme. Dieses Wissen wird im Rahmen des Projektes für unterschiedliche Beschichtungsplattformen der im PA vertretenen Anlagenbauer und Anwender erarbeitet. Dies wiederum wird die Nutzung des Konzeptes mit etablierten Sputtertechnologien erlauben. Hieraus ergibt sich ein Wettbewerbsvorteil insbesondere für KMU, die mehr als große Unternehmen darauf angewiesen sind die bestehenden Beschichtungsanlagen auch für die Umsetzung neuer Anwendung zu nutzen. Der potentielle Nutzerkreis erstreckt sich folglich auf alle jene Unternehmen, die innerhalb der Photonik mit Ihrer Wertschöpfung an den beschichteten Komponenten als Anwender, Hersteller oder Zulieferer beteiligt sind. Vor allem die Hersteller von Hochleistungslasersystemen profitieren von den optimierten Eigenschaften und erweiterten Möglichkeiten dieser neuen Technologie. Darüber hinaus offeriert der technische Ansatz die notwendige Flexibilität und wird sich im Erfolgsfall in zusätzliche Märkte entwickeln können.

Projektbegleitender Ausschuss

Unternehmen
Carl Zeiss SMT GmbH
Cutting Edge Coatings GmbH ^{KMU}
Evatec AG
HÜBNER GmbH & Co. KG
InnoLas Laser GmbH ^{KMU}
LASER COMPONENTS Germany GmbH ^{KMU}
LASEROPTIK GmbH ^{KMU}
Optics Balzers Jena GmbH ^{KMU}
robeko GmbH ^{KMU}
UltraFast Innovations GmbH ^{KMU}

Das IGF-Vorhaben Nr. 21364 N der Forschungsvereinigung Feinmechanik, Optik und Medizintechnik wird über die AiF im Rahmen des Programms zur Förderung der Industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert.