

Ultraeffiziente Pulskompressionsgitter

Entwicklung von Gitterspiegeln für höchste Ansprüche am IFSW

Am Institut für Strahlwerkzeuge (IFSW) der Universität Stuttgart konnten in Kollaboration mit der AMO GmbH, basierend auf dem "leaky-mode resonance"-Prinzip, erstmals reflektive Gitterspiegel reproduzierbar hergestellt werden mit einer Beugungseffizienz von 99,7% bei 1060 nm. Hiermit wurde experimentell bei viermaliger Reflektion an den Elementen eine Pulskompressionseffizienz von über 96% bei 1030 nm demonstriert. Dies ist ein bedeutender Fortschritt gegenüber bisherigen Pulskompressionstechniken, welche für die Chirped Pulse Amplification eingesetzt werden und große Verluste (typischerweise 80-90% Kompressionseffizienz) aufweisen. Durch den Einsatz der Gitterspiegel kann damit die Gesamteffizienz von UKP-Lasersystemen signifikant gesteigert werden.

Mitte der 1980er Jahre entwickelten Gérard Mourou und Donna Strickland die sogenannte „Chirped Pulse Amplification“ (CPA) – eine Technik zur Leistungsskalierung für gepulste Laser. Damit können enorme Pulsspitzenleistungen bis in den Petawattbereich (10^{15} W) bei wenigen Femtosekunden Pulsdauer realisiert werden. Derartige Pulsspitzenleistungen können nicht direkt in einem Laseroszillator erreicht werden, da bedingt durch die hohen Intensitäten im laseraktiven Medium nichtlineare Effekte auftreten, welche neben einer ungünstigen Beeinflussung der Pulse auch zu einer Zerstörung des laseraktiven Mediums oder anderer optischer Komponenten führen können. Die Grundidee der CPA-Technik ist es daher, die Pulsspitzenintensität im laseraktiven Medium gering zu halten. Dies ist gleichbedeutend mit einer Verlängerung der Pulsdauer. Der klassische Aufbau eines CPA-Systems besteht daher aus einer gepulsten Laserstrahlquelle mit der gewünschten Pulsdauer. Ein nachgeschalteter Pulsstreckverlängert die Pulsdauer, z.B. von einigen 100 fs auf wenige ns oder hunderte ps. In einem darauffolgenden Verstärker werden die in ihrer Dauer verlängerten Pulse nun verstärkt. Anschließend wird im Pulskompressor idealerweise wieder

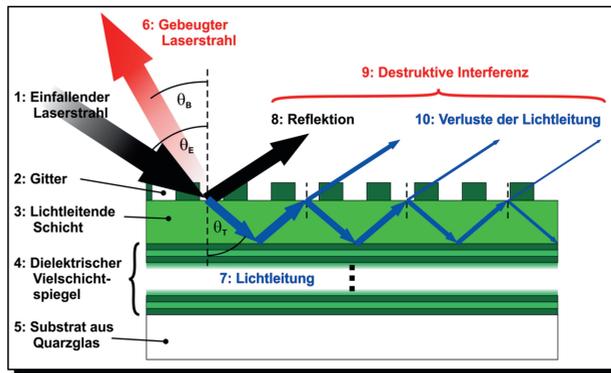


Abb. 1: Schematische Darstellung der Funktion der LMR. Die Struktur besteht aus einem Quarzglassubstrat (5), auf welchem sich ein dielektrischer Vielschichtspiegel befindet (4). Ein einfallender Laserstrahl (1) wird dann zum Teil vom Spiegel reflektiert (8) und zum Teil in die lichtleitende Schicht (3) eingekoppelt. Die Verluste der Lichtleitung (10) können durch das Gitter (2) zur destruktiven Interferenz (9) mit der Reflektion gebracht werden. Damit wird die gesamte einfallende Lichtstrahlung gebeugt (6).

die ursprüngliche Pulsdauer erreicht. Streckung und Komprimierung von Laserpulsen erfolgt durch dispersive Elemente wie z.B. Prismen, spezielle Beschichtungen (sogenannte „chirped mirror“) oder Beugungsgitter. Generell sind die Möglichkeiten um Laserpulse in ihrer Dauer zu beeinflussen sehr vielfältig. Für eine effektive und damit wirtschaftliche Anwendung der CPA sind die Effizienzen der dispersiven Komponenten eine wesentliche Schlüsselkomponente.

Intensive Forschungsbemühungen bestehen am IFSW schon seit mehreren Jahren im Bereich der Beugungsgitter. Sie eignen sich besonders gut für das Strecken und Komprimieren von Laserpulsen, da sie eine sehr große Dispersion erzeugen können und einen kompakten und einfachen Pulsstreck- bzw. Pulskompressor aufbau ermöglichen. Bis vor wenigen Jahren jedoch galten Beugungsgitter oft als Kompromiss, da transmissive, dielektrisch beschichtete Gitter bestenfalls mit 95% Beugungseffizienz industriell hergestellt werden

konnten; Kompressionseffizienzen von 80-90% und weniger waren und sind teilweise noch die Normalität. In einem Pulskompressor aufbau, welcher vollständig mit metallisch reflektiven Beugungsgittern realisiert wird, werden meist ca. 90% Beugungseffizienz erreicht und es finden 4 Gitterübergänge statt. Dies entspricht dann einem Verlust von fast 35% der Laserleistung. Ebenso sind die Zerstörungsschwellen solcher Gitter relativ gering im Vergleich zu transmissiven, dielektrischen Ausführungen. Daher behilft man sich oft durch die Wahl eines möglichst großen Laserstrahls auf den Gittern um die Leistungsdichte zu reduzieren.

Etwa zur gleichen Zeit als die CPA-Technik entwickelt wurde, haben Vladimir A. Sychugov und Aleksandr V. Tishchenko zum ersten Mal eine theoretische Struktur beschrieben, welche 100% Beugungseffizienz ermöglichen kann. Dabei handelt es sich um die sogenannte „leaky-mode resonance“ (LMR) in einem planaren Wellenleiter. Deren Struk-

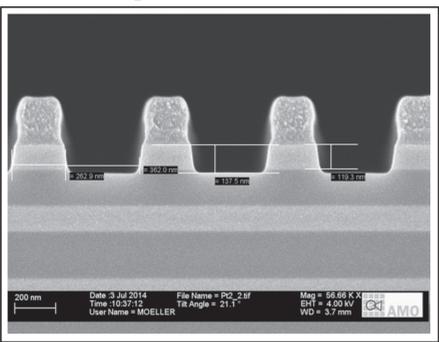


Abb. 2: SEM-Aufnahme der Gitterstruktur.

atur und Funktionsweise ist in Abbildung 1 dargestellt (weitere Informationen finden sich in [1]). Solche Strukturen haben ein enormes Potential. Das Prinzip lässt sich auf nahezu beliebige Wellenlängen und damit Laserklassen übertragen. Jedoch wurden hocheffiziente Beugungsgitter dieses Typs erst Anfang der 2000er Jahre experimentell weiter untersucht. Mittlerweile gibt es mehrere Forschergruppen aus Frankreich, den USA und China, die an Beugungsgitter, basierend auf der LMR, weiter forschen.

Die in diesem Experiment verwendeten Gitter wurden in Kollaboration mit der AMO GmbH hergestellt. Dort wurde ein Laserinterferenzlithografieverfahren verwendet und eine anschließende reaktive Ionenstrahlätzung vorgenommen um die gewünschten Parameter hinsichtlich der Gitterstruktur zu realisieren. Eine SEM-Aufnahme einer solchen Struktur ist in Abbildung 2 zu sehen und ein Foto der Gitterspiegel ist in Abbildung 3 dargestellt. Die Herausforderung in der praktischen Realisierung einer solchen Struktur liegt in mehreren Punkten. So ist es theoretisch zwar nahezu immer möglich, für eine beliebige Kombination aus Einfallswinkel, Wellenlänge und Polarisation der Laserstrahlung die Resonanz zu finden. Im praktischen Einsatz jedoch werden all diese Parameter durch die Anwendung vorgegeben. Da es sich bei der LMR um die Einkopplung von Lichtmoden in einen Wellenleiter handelt, spielen schon kleinste Veränderung der sogenannten opto-geometrischen Eigenschaften der Struktur eine entscheidende Rolle, da diese den effektiven Brechungsindex der Mode bestimmen. Zu den opto-geometrischen Parametern werden die Schichtdicken und Brechungsindizes der dielektrischen

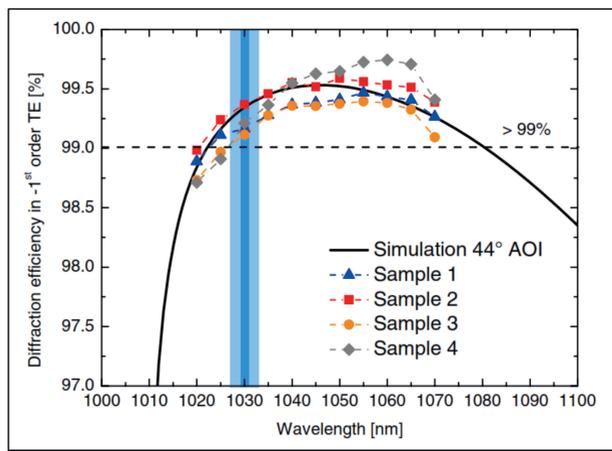


Abb. 4: Messung der Beugungseffizienz über der Wellenlänge. Die simulierte Kurve ist in schwarz dargestellt. Die Messkurven der vier Proben sind annähernd gleich, wodurch die gute Reproduzierbarkeit belegt wird.

Schichten, Gitterperiode, -astgrad und -kontur (z.B. rechteckig oder trapezförmig) gezählt. Die opto-geometrischen Eigenschaften bestimmen, bei welcher Wellenlänge oder unter welchem Einfallswinkel der Resonanzeffekt zustande kommt und sind unter realen Bedingungen immer gewissen Herstellungsstoleranzen unterworfen. Um diesen Herausforderungen zu begegnen, wurden am IFSW über die Jahre verschiedene Aufbauten zur umfangreichen Charakterisierung dünner Schichten, zur hochgenauen Messung von Gitterperioden, Reflexion, Absorption und Beugungseffizienz, sowie Simulationstools entwickelt. Dies erfolgte unter anderem in mehreren Kooperationsprojekten zusammen mit industriellen Partnern und anderen Instituten. Ebenfalls steht ein umfangreiches Sortiment an Scheibenlasern zur Verfügung, mit welchen die Gitter in unterschiedlichsten Leistungsklassen getestet werden können. Damit war es möglich, Gitter mit rekordträchtigen Beugungseffizienzen von bis zu 99.7% bei 1060 nm Wellenlänge reproduzierbar herzustellen (siehe Abbildung 4). Ebenso konnte in Zusammenarbeit mit einem industriellen Partner experimentell eine Pulskompression mit sensationeller Kompressionseffizienz von über 96% demonstriert werden. Dabei ist der gepulste Laserstrahl vier Mal über die Beugungsgitter gelenkt worden. Da hier die Wellenlänge 1030 nm und die entsprechende Beugungseffizienz knapp über 99% betrug, war die Kompressionseffizienz etwas geringer als bei der idealen Wellenlänge

von 1060 nm zu erwarten gewesen wäre. Daraus folgt, dass bei Verschiebung der Designwellenlänge zu 1030 nm noch höhere Pulskompressionseffizienzen möglich sind. Für praktische Zwecke bedeutet dies, dass durch simples Austauschen der Beugungsgitter im Strecker und Kompressor die Laserleistung drastisch erhöht, und oftmals auch der Bauraum des Lasers deutlich verkleinert wird.

Die aktuellen Entwicklungen konzentrieren sich in einem kürzlich angelaufenen Kooperationsprojekt vor allem auf eine Steigerung der laserinduzierten Zerstörschwelle, sowie die Herstellung größerer Gitterflächen. Zur Steigerung der Zerstörschwelle gibt es mehrere Ansätze, wie beispielsweise die Verwendung von Hafniumdioxid anstelle von Tantalpentoxid als hochbrechende Schicht im dielektrischen Schichtstapel. Um größere Gitter herstellen zu können, wird an neuen Herstellungstechnologien geforscht.

[1] M. Rumpel et al., "Broadband pulse compression gratings with measured 99.7% diffraction efficiency," Opt. Lett. 39, 323-326 (2014)

Autoren / Kontakt:

Dr. Marwan Abdou Ahmed und
Dipl.-Ing. Martin Rumpel
Institut für Strahlwerkzeuge, Universität Stuttgart
Pfaffenwaldring 43
70569 Stuttgart
Tel.: +49 (0)711 685 69755
Fax: +49 (0)711 685 66842
E-Mail: abdou-ahmed@ifsw.uni-stuttgart.de
rumpel@ifsw.uni-stuttgart.de

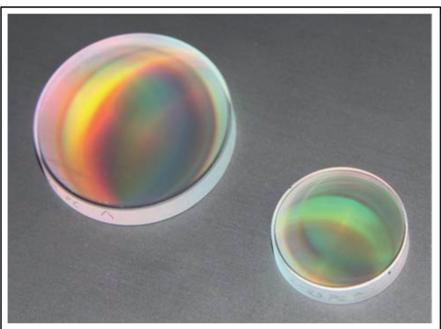


Abb. 3: Foto von zwei Gitterspiegeln mit 1,5" (links) und 1" Durchmesser (rechts).