Abdruck aus Laser Magazin 03/09



# Binäre Beugungsgitter zur Strahlformung von Hochleistungslasern

**Diffraktive optische Elemente (DOE) werden standardmäßig in Anwendungen wie der Holographie und der Lithographie eingesetzt. Darüber hinaus finden sie auch als Schnittstellenelemente zwischen Optik und Elektronik, sowie bei der Herstellung photonischer Kristalle Anwendung. Dennoch weisen kommerziell erhältliche diffraktive Strahlteiler relativ geringe Beugungseffizienzen von typischerweise weniger als 80% Gesamttransmission auf, was sie wenig attraktiv für Hochleistungslaseranwendungen erscheinen lässt. Aufgrund der aktuellen Fortschritte in den Bearbeitungsprozessen zur Herstellung von Submikrometerstrukturen hoher Aspektverhältnisse ist es jedoch nun auch möglich hochfrequente und besonders tiefe binäre Beugungsgitter herzustellen. Diese werden z. B. bei der Herstellung von Faser-Bragg-Gittern (FBG) als Phasenmasken und als Pulskompressorgitter in Hochleistungslasersystemen eingesetzt, wie vom IAP der Friedrich-Schiller Universität Jena demonstriert wurde.**

Ziel unserer Forschung war es, einen 1:2 Strahlteiler hoher Transmissionseffizienz, durch den Einsatz solch binärer Gitter in Quarzglas unter senkrechter Bestrahlung, zu realisieren. Diese Absicht begründet sich in dem Bestreben, diese Elemente in Systemen zur Laserstrukturierung von amorphem Silizium (a:Si) zu integrieren, wie sie typischerweise von der Photovoltaikindustrie verwendet werden. Die untersuchte Gitterstruktur ist in Abb. 1 dargestellt und wird durch die Gitterperiode das Tastverhältnis L und die Strukturtiefe charakterisiert. Die Periode wurde entsprechend der Laserwellenlänge von =532nm so gewählt, dass nur zwei gebeugte Laserstrahlen vom Gitter transmittiert werden. Somit ergeben sich eine Gitterperiode von 946nm und ein Beugungswinkel von ca. 34°. Das Tastverhältnis und die Strukturtiefe des Gitters wurden mittels eines Algorithmuses berechnet, der auf einer Rigorous Coupled-Wave Analysis (RCWA) basiert. Die Parameter wurden optimiert für TE-Polarisation – elektrisches Feld ist parallel zu den Gitterlinien – um eine maximale Beugungseffizienz in der ±1. Beugungsordnung zu erzielen und gleichzeitig die Transmission in 0. Ordnung zu unterdrücken. In Abb. 2 ist die Beugungseffizienz für die ±1. Beugungsordnung in Abhängigkeit von Tastverhältnis und Strukturtiefe dargestellt. Es zeigt sich, dass die höchste Beugungseffizienz in der ±1. Ordnung ( =46%) bei einer Strukturtiefe von 700 nm und einem Tastverhältnis von 30% erreicht werden kann. Zusätzlich ist die Beugungseffizienz für die 0. Ordnung wie erwartet auf unter 2% beschränkt. Somit weist das Gitter eine Gesamttransmissionseffizienz von etwa 94% auf. Obwohl die Gitterparameter mit einem aufwendigen numerischen Verfahren bestimmt wurden, kann die erzielte hohe Transmissionseffizienz auch mittels der intuitiveren modalen Methode, als Interferenzphänomen in der Gitterstruktur, erklärt werden. Tatsächlich stellt eine tiefe Gitterstruktur einen Wellenleiter dar, der in z-Richtung propagierende Moden führen kann, welche durch ihre individuellen Propagationskonstanten (oder effektiven Brechungsindices) beschrieben werden. Diese effektiven Brechungsindices werden durch Lösen der Dispersionsgleichung ermittelt. Die Gittermoden können durch einen einfallenden Strahl entsprechend dem Anregungskoeefizienten, der sich aus dem Überlappintegral des elektromagnetischen Feldes des auftreffenden Strahles und jenem der Gittermoden ergibt, induziert werden. Trifft der einfallende TE-polarisierte Strahl senkrecht auf das Gitter, werden aufgrund der Symmetrie des Problems nur symmetrische Moden (in diesem Fall $TE_0$ and $TE_2$) angeregt. Die eingekoppelte Energie wird dann auf alle vom Gitter gebeugten Strahlen verteilt. Um die 0. Ordnung zu unterdrücken und somit die Energie allein in die ±1. Beugungsordnung zu transferieren, ist die Strukturtiefe des Gitters = $/(2n_{eff}^{TE0}-2n_{eff}^{TE2})$ genau so gewählt, dass eine Phasenverschiebung von zwischen den beiden angeregten Gittermoden auftritt. Wobei $n_{eff}^{TE0}$ und $n_{eff}^{TE2}$ die effektiven Brechungsindices der Gittermoden $TE_0$ und $TE_2$ bezeich-

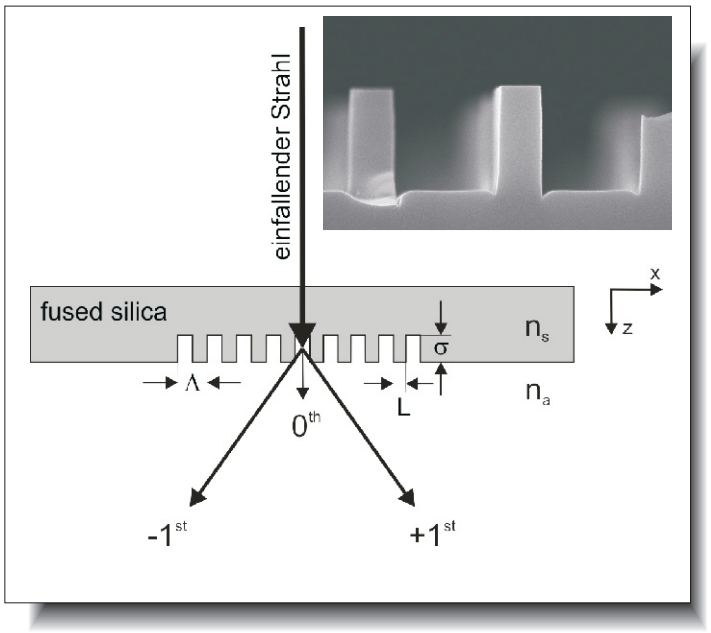


*Abb. 1: Schematische Darstellung eines 1:2 Gitterstrahlteilers und SEM-Bild des hergestellten Gitters*

nen. Daraus ergibt sich eine Strukturtiefe nahe der mittels rigorosem Algorithmus berechneten 700 nm. Für die experimentellen Untersuchungen wurden drei Gitter mit den angegebenen Parametern hergestellt. Diese wurden durch das IMS-Chips durch direkt schreibende Elektronenstrahllithographie gefolgt von reaktivem Ionenätzen hergestellt. In Abb. 2 ist ein SEM-Bild einer der so hergestellten Quarzglasgitter dargestellt. Die Profilcharakterisierung ergab eine sehr gute Übereinstimmung zwischen den entworfenen und den tatsächlich vermessenen Strukturen. Die Abweichungen betrugen weniger als 0,5% für die Strukturtiefe und weniger als 1% für das Tastverhältnis. Zur Bestimmung der Beugungseffizienzen wurden die Gitter in einen Messaufbau integriert, dem als Quelle ein „Explorer" Laser der Firma Spectra-Physics mit einem $M^2<1.3$, einer Pulsdauer von 8 ns, einer Repetitionsrate von ca. 30 kHz und einer maximalen Pulsenergie von 39 µJ zur Verfügung stand. Die experimentell ermittelten Beugungseffizienzen der einzelnen Ordnungen der drei Gitter wichen absolut um maximal 1.2% vom berechneten Wert ab und auch die Intensitätsverteilungen der gebeugten Strahlen entsprachen den Erwartungen. Nach der Verifizierung des korrekten Teilverhältnisses des Gitters wurde dieses in ein Bearbeitungssystem der Firma MANZ-Automation integriert, bei dem ein TRUMPF TruMark 6230 ($M^2<1.2$, 10 ns bei 30 kHz, 255 µJ) zur Strukturierung von a:Si genutzt wird. Ein erstes und vorläufiges Ergebnis dieser Bearbeitung mit Hilfe des strahlteilenden Gitters ist in Abb. 2 zu sehen. Es wurden leicht elliptische Löcher mit einer Elliptizität von ca. 86% erzielt, die durch den Beugungswinkel hervorgerufen wird. Zur Kompensation dieser Elliptizität wurden die 3 hergestellten Gitter entsprechend Abb. 3 kombiniert. Dabei werden die gebeugten Strahlen der ±1. Ordnung des ersten Elements jeweils nochmals durch ein um 90 Grad gedrehtes Gitter aufgespalten. Mit dieser Anordnung konnte ein 1:4 teilendes System umgesetzt werden, das perfekt runde Strahlen erzielt. Die Abweichung zwischen den Beugungseffizienzen der Strahlen wurde zu weniger als 1% bestimmt. Das Ziel der aktuellen Arbeiten ist es ein monolithisches und dadurch robustes und hocheffizientes 1:6 Strahlteilungssystem auf

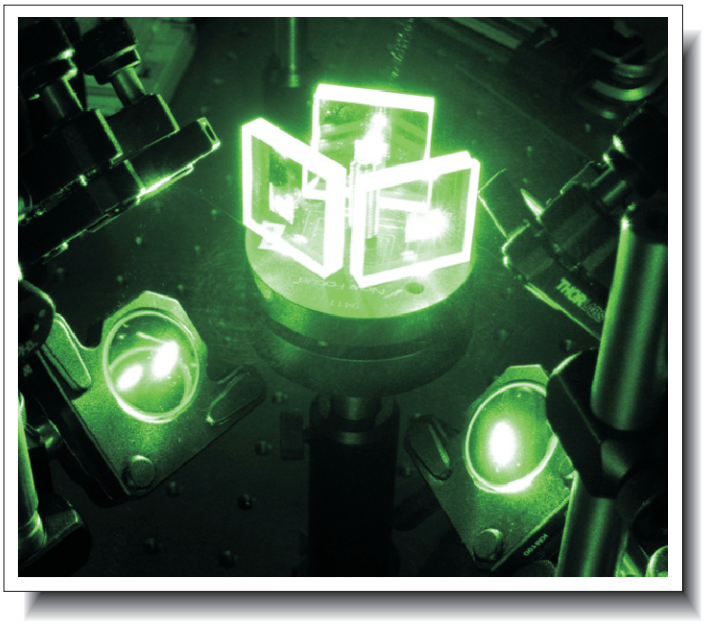

*Abb. 3: Experimenteller Aufbau zur 1:4 Strahlteilung*

Basis der hier dargestellten Ergebnisse und Erkenntnisse zu entwickeln, um einen qualitativ hochwertigen und leistungsfähigen parallelen Strukturierungsprozess von a:Si zu realisieren. Die Forschungsarbeiten am IFSW zeigen, dass einfache binäre Quarzglasgitter großer Strukturtiefe sehr hohe Gesamtbeugungseffizienzen (hier ca. 94%), durch die Anregung von Wellenleitermoden innerhalb der lamellaren Gitterstruktur, aufweisen können. Daher eignen sich diese hervorragend als robuste und kosteneffiziente Umsetzung zur sehr effizienten Strahlteilung hoher Qualität nicht nur für die Photovoltaikindustrie, sondern ebenso für vielfältige Applikationen auf dem Gebiet der Optik, Laserphysik und der Laserbearbeitung.

Die Forschungsergebnisse entstanden in Kooperation mit der Firma MANZ-Automation im Rahmen der Diplomarbeit von Nicolas Graf Strachwitz.

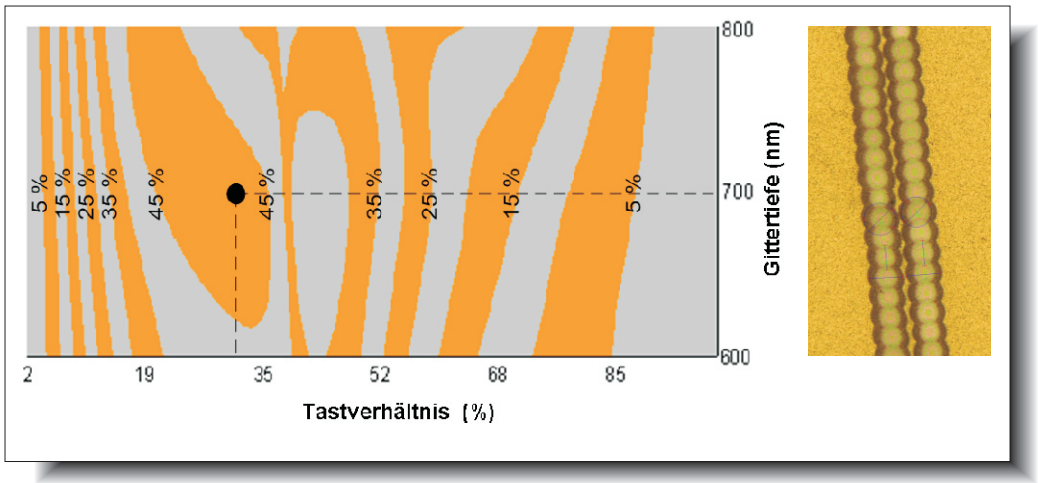


*Abb. 2: links: Berechnete Beugungseffizienz der ±1. Beugungsordnung*
*rechts: Bearbeitungsergebnis der Strukturierung von a:Si mit dem 1:2 Gitterstrahlteiler*

*Institutsadresse:*
Institut für Strahlwerkzeuge
Pfaffenwaldring 43
70569 Stuttgart
Tel.: +49 (0)711 685 66840
Fax: +49 (0)711 685 66842
**www.ifsw.uni-stuttgart.de**

*Autoren:*
Dr. Marwan Abdou-Ahmed
*abdou.ahmed@ifsw.uni-stuttgart.de*

Dipl.-Ing. Christoph Neugebauer
**www.manz-automation.com**

*Kontakt / Redaktion:*
Dipl.-Phys. Thomas Liebig
IFSW
Tel.: +49 (0)711 685 67882
Fax: +49 (0)711 685 66842
E-Mail: *thomas.liebig@ifsw.uni-stuttgart.de*