



Bei der Arbeit mit Ultrakurzpulslasern ist die Dispersion eines Lasers ein wichtiges Thema.

## Spiegel für ultrakurze Pulse

Bei Ultrakurzpulsoptiken spielen der Reflexionsgrad sowie Dispersion eine wichtige Rolle.

Matthias Knobl

Ultrakurzpulslaser bewegen sich in Wissenschaft und Technik am Rande des Möglichen. Mit den kürzesten Pulsen im Bereich von Zehntelattosekunden lassen sich Stoffe im atomaren Maßstab beobachten und untersuchen. In den letzten Jahren kommen Ultrakurzpulslaserquellen aber nicht mehr nur in Laboren zum Einsatz, sondern auch in der hochauflösenden Mikroskopie, der Laufzeitabstandsmessung oder der Mikrobearbeitung.

Ultrakurze Pulse zeichnen sich durch breite Wellenlängenbereiche und hohe Spitzenleistungen aus. Aufgrund ihrer extremen Eigenschaften verhalten sie sich nicht wie Laserlicht bei niedrigen Leistungen.

Die Verwendung normaler Optiken für Ultrakurzpulse kann daher zu schwerwiegenden Problemen führen. Bei der Arbeit mit Pulsdauern von Pikosekunden ( $1 \times 10^{-12}$  s) oder kürzer sind speziell entwickelte Optiken erforderlich. Dazu zählen auch Ultrakurzpulsspiegel. Derartige Spiegel helfen oftmals bei der Ultrakurzpulserzeugung sowie der Strahllenkung.

Um die verschiedenen Ultrakurzpulsspiegel zu verstehen, gilt es zunächst, die Eigenschaften ultrakurzer Pulse zu erläutern. Die Pulsbandbreite steigt aufgrund der Energie-Zeit-Unschärferelation mit sinkender Pulsdauer (**Abb. 1**). Da die Lichtgeschwindigkeit in einem Medium von der Wellenlänge abhängt, kommt es zu Dispersionseffekten,

wenn breitbandige Pulse optische Komponenten durchlaufen. Die meisten optischen Materialien weisen eine positive Dispersion auf: Längere Wellenlängen breiten sich schneller aus als kürzere. Das Ausmaß der zeitlichen Dispersion eines Pulses durch eine bestimmte optische Komponente ist als Gruppenverzögerungsdispersion (Group Delay Dispersion, GDD) bekannt und als zweite Ableitung der Phase  $\varphi$  in Bezug auf die Winkelfrequenz  $\omega$  definiert.

$$\text{GDD} = \frac{\partial \text{GD}}{\partial \omega} = \frac{\partial^2 \varphi}{\partial \omega^2} \quad (1)$$

Die erste Ableitung der Phase ist die Gruppenverzögerung (Group Delay, GD). Sie gibt die auftretende Zeitverzögerung an, wenn sich ein

Puls durch ein Medium ausbreitet, und hängt von der Frequenz ab. Die Gruppenverzögerungsdispersion ist ein formales Maß für die chromatische Dispersion durch die eingesetzte Komponente. Bei einer positiven GDD werden kürzere Wellenlängen stärker verzögert als längere, was die Pulsdauer dehnt. Bei einer negativen GDD wird der Puls komprimiert (positiver bzw. negativer Chirp).

Neben der Verlängerung der Pulsdauer lässt ein positiver Chirp die Pulspitzenleistung abfallen (**Abb. 2**). Beide Effekte wirken sich direkt auf die qualitative Leistung eines Ultrakurzpulslasersystems aus. Daher sind spezielle Optiken erforderlich, welche die Dispersion minimieren und ggf. beseitigen.

### Spiegel mit niedriger GDD

Grundsätzlich besitzen Ultrakurzpulsspiegel einen extrem hohen Reflexionsgrad und einen GDD-Wert möglichst nah bei null. In dielektrischen Beschichtungsdesigns für klassische Laserspiegel wechseln sich Schichten mit hohem und niedrigem Brechungsindex ab. Die Dicken der Schichten sind auf bestimmte Bruchteile der Designwellenlänge abgestimmt, meist ein Viertel. Ziel dabei ist es, den Reflexionsgrad durch geschickte Nutzung konstruktiver Interferenz der reflektierten Teilstrahlen zu verbessern sowie die Laserzerstörschwelle anzuheben, indem die Punkte maximaler elektrischer Feldstärke auf die robustesten Stellen der Schichtkonstruktion treffen.

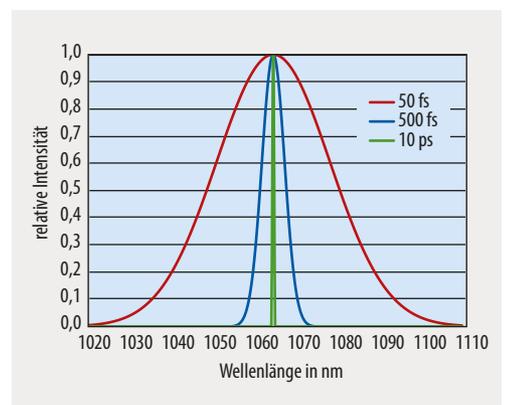
Spiegel mit kleiner Gruppenverzögerungsdispersion sind hingegen dielektrische Spiegel mit einer GDD nahe null: Sie lenken Ultrakurzpulslaserstrahlen ohne sie zu verbreitern. Ein hoher Reflexionsgrad kann bei Ultrakurzpulslasern maximalen Durchsatz gewährleisten und Beschädigungen vermeiden. Bei derart hohen Spitzenleistungen

kann jeder nicht reflektierte Teil des Pulses schwerwiegende Probleme verursachen: Das transmittierte Licht kann auf andere Elemente im System treffen, das absorbierte Licht kann die Optik in kurzer Zeit beschädigen, und Streulicht kann ein Sicherheitsrisiko darstellen.

Dielektrische Beschichtungen weisen meist eine schmale Bandbreite von wenigen Nanometern auf, sodass sie sich für ultrakurze Pulse eignen. Denn der Puls besitzt hier eine viel größere Bandbreite als die Beschichtung. Weitere Schichten und höhere Lagengenauigkeit erlauben jedoch Ultrakurzpulsbeschichtungen mit einem Reflexionsgrad von 99,8 bis 99,999 Prozent.

Spiegel, die mit Gold, Silber oder Aluminium beschichtet sind, haben von Natur aus eine geringe GDD (**Abb. 3**), sodass sie Ultrakurzpulsstrahlen kostengünstig umlenken können. Aufgrund ihres geringen Reflexionsvermögens und der niedrigen laserinduzierten Zerstörschwelle ist ihre Anwendung aber auf Ultrakurzpulslaser mit geringer bis mittlerer Leistung beschränkt.

Das Problem von Laserschäden bei dünnen Metallschichten lässt sich anhand eines Zwei-Temperatur-Modells veranschaulichen, bei dem Elektronen- und Gittersubsystem sowie ihre Kopplung untereinander und zum Laser betrachtet werden. Der zeitliche Verlauf des Energieinhalts beider Subsysteme



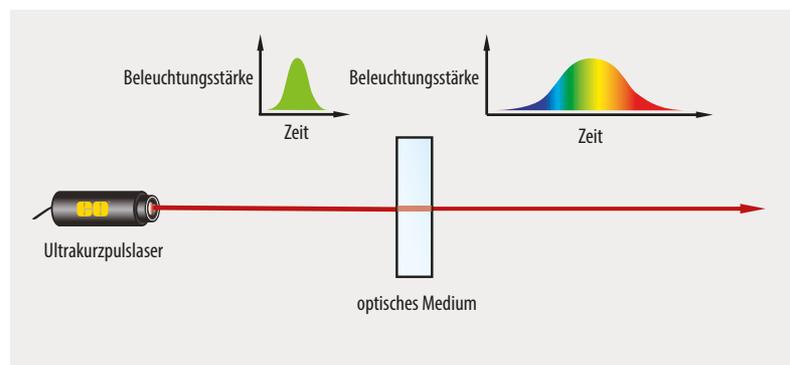
**Abb. 1** Die Bandbreite eines Pulses ist umgekehrt proportional zu seiner Dauer. Bei 50 fs ist die Bandbreite eine Größenordnung größer als bei 10 ps.

ist folgendermaßen zu beschreiben:

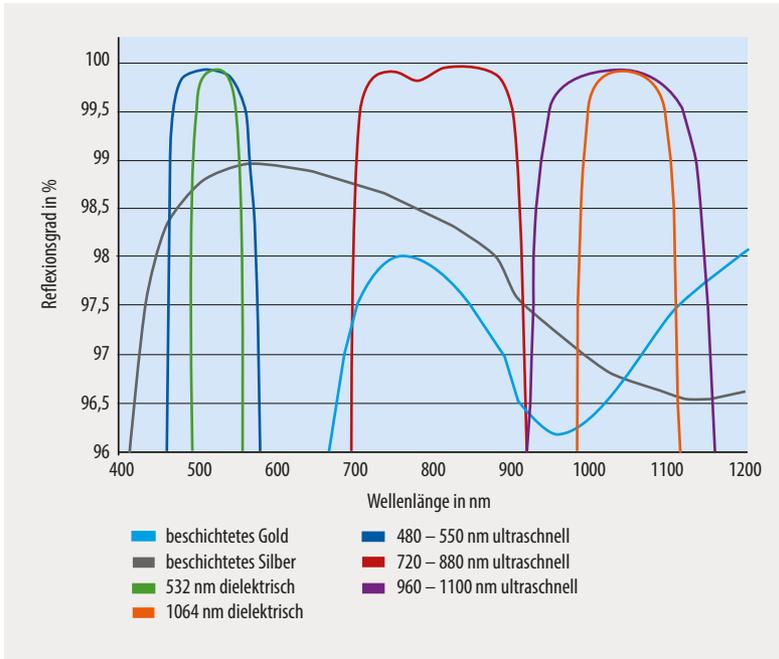
$$C_e(T_e) \frac{\partial T_e}{\partial t} = \nabla [k_e(T_e) \nabla T_e] - G(T_e - T_l) + S(z, t) \quad (2)$$

$$C_l(T_l) \frac{\partial T_l}{\partial t} = G(T_e - T_l) \quad (3)$$

Dabei sind  $C_l$  und  $C_e$  die Wärmekapazitäten der beiden Subsysteme und  $G$  der Kopplungsterm zwischen Elektronen und Rumpfgitter. Zunächst nehmen nur Elektronen die Energie des Lasers, dargestellt durch den Quellterm  $S$ , auf. Durch die Kopplung übertragen die Elektronen die Wärme an das Gitter und erhitzen dieses innerhalb weniger Pikosekunden. Der Gleichgewichtszustand stellt sich durch Wärmedissipation ein. Im Fall einer Goldbeschichtung mit einem ultrakurzen Laserpuls erreicht die Gitter-



**Abb. 2** Positive Dispersion sorgt dafür, dass die Pulsdauer gedehnt wird: Längere Wellenlängen breiten sich schneller aus als kürzere.

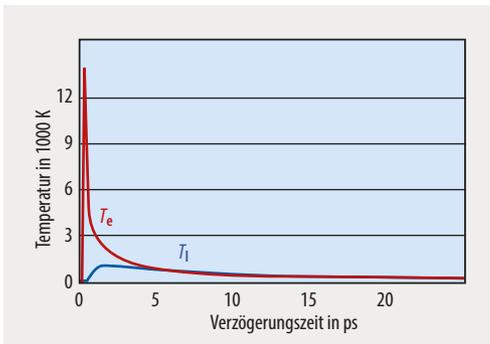


**Abb. 3** Standardmäßige dielektrische und metallische Beschichtungen besitzen einen geringeren Reflexionsgrad als die dielektrischen Ultrakurzpulsbeschichtungen.

temperatur  $T_1$  nach der Bestrahlung sofort nach der Anregung 1400 K (**Abb. 4**). Da der Schmelzpunkt von Gold 1337 K beträgt, reicht ein Puls mit einer relativ geringen Fluenz ( $0,2 \text{ J/cm}^2$ ) aus, um die metallische Beschichtung zu beschädigen.

**Pulskompressionsspiegel**

In den meisten energiereichen Ultrakurzpulssystemen sind Pulskompressionsoptiken für die sog.



**Abb. 4** Das Zwei-Temperatur-Modell veranschaulicht die Erhitzung eines 200 nm dicken Goldnanofilms nach einer Bestrahlung mit einem Puls ( $120 \text{ nm}$ ,  $0,2 \text{ J/cm}^2$ ,  $10 \text{ fs}$ ,  $800 \text{ nm}$ ). Die Elektronentemperatur  $T_e$  ist rot dargestellt, die Gittertemperatur  $T_l$  blau.

Chirped Pulse Amplification (CPA) erforderlich: Die absichtliche Verbreiterung eines ultrakurzen Pulses mit einem Pulsdehner reduziert die Spitzenleistung erheblich, sodass sich der Puls ohne nichtlineare Pulsverzerrung oder Beschädigung des Verstärkungsmediums bzw. der umgebenden optischen Elemente auf noch höhere Energiewerte verstärken lässt. Die verstärkten Laserpulse werden wieder komprimiert, sodass ultrakurze Pulse hoher Intensität entstehen.

Spiegel mit einer negativen GDD helfen auch bei der Komprimierung und Dispersionskompensation ultrakurzer Pulse. Gechirpte Spiegel mit einer negativen GDD sind beispielsweise dielektrische Spiegel, deren Lagendicken mit der Tiefe variieren (**Abb. 5**).

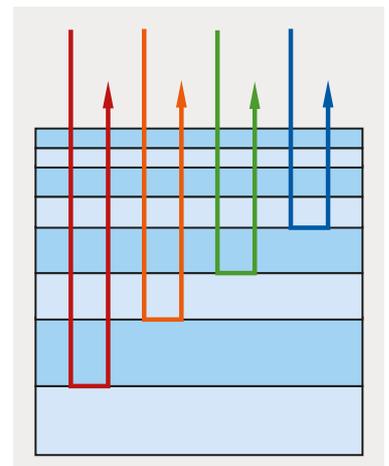
Das Beschichtungsdesign nutzt die wellenlängenabhängige Eindringtiefe von Licht, sodass die Gruppenverzögerung von der jeweiligen Wellenlänge abhängt. Das entstehende GDD-Spektrum ist jedoch stark wellig aufgrund der Fresnel-Reflexion an der Grenz-

schicht zwischen Spiegel und Luft sowie den abrupten Änderungen des Brechungsindex zwischen Lagen mit hohem und geringem Brechungsindex. Ein Paar komplementär gechirpter Spiegel kann helfen, diesen Effekt zu steuern: Die GDD-Schwingungen eines Spiegels müssen zum jeweils komplementären Spiegel gegenphasig sein, damit ein glatteres GDD-Spektrum entsteht.

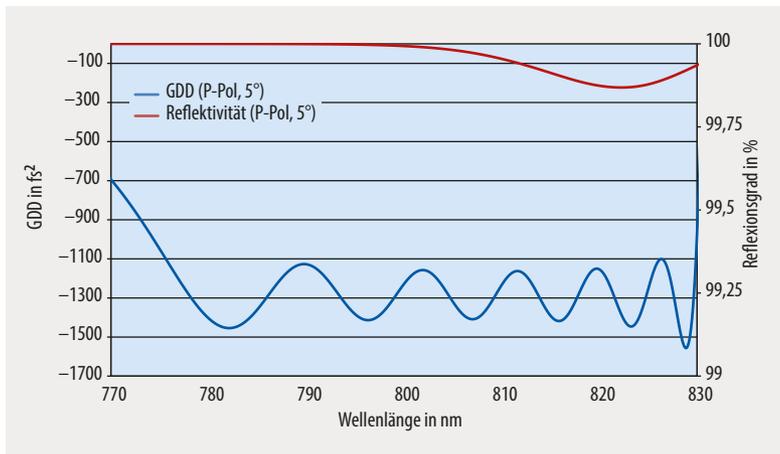
Sog. Gires-Tournois-Interferometer-Spiegel (GTI) nutzen Resonanzeffekte, um eine winkelabhängige negative GDD zur Steuerung der Dispersion im Resonator von Ultrakurzpulslasern zu erreichen. Ihre GDD ist jedoch nur in einer sehr begrenzten Bandbreite negativ. Zudem kommt es hierbei zu Dispersionseffekten höherer Ordnung.

**Hochdispersive Spiegel**

Es gibt verschiedene Pulskompressionsoptiken, um die Dispersion ultrakurzer Pulse zu kompensieren, z. B. Gitter und Prismen. Aufgrund der kompakten Größe, des geringen Verlusts und der hohen negativen Dispersion über eine große Bandbreite eignen sich hochdispersive Spiegel hervorragend für die Pulskompression in ausrichtungsunempfindlichen Pulskompressoren,



**Abb. 5** Bei einem gechirpten Spiegel dringen längere Wellenlängen tiefer ein als kürzere.



**Abb. 6** Theoretische Kurven für Reflexionsvermögen und GDD eines hochdispersiven Spiegels für Laser mit 800 nm.

welche die GDD sowie Dispersionseffekte dritter und höherer Ordnung kompensieren. Diese Spiegel erhalten in hochgenauen Sputtering-Prozessen ein Schichtdesign, welches das wellenlängenabhängige Eindringverhalten herkömmlicher gechirpter Spiegel mit mehreren Resonatorbereichen kombiniert (Multi-GTI). Dies führt zu höheren GDD-Werten sowie zu geringeren Verlusten über große Bandbreiten. Hochdispersive Spiegel eignen sich ideal für kompakte und sehr effiziente Pulscompressoren und Dispersionskompensationssysteme.

### Zusammenfassung

Ultrakurzpulslaser sind eine wichtige Technologie für die wissenschaftliche Forschung und eine wachsende Zahl industrieller Anwendungen. Aufgrund der einzigartigen Eigenschaften ultrakurzer Pulse sind speziell konzipierte optische Ultrakurzpuls-komponenten entscheidend für jedes Ultrakurzpuls-system. Standardkomponenten weisen in der Regel eine höhere Dispersion auf, sodass die Pulsdauer zunimmt und die Spitzenleistung sinkt, was sich direkt auf die qualitative Systemleistung auswirkt.

Um Pulsdispersion zu vermeiden und Laserschäden zu minimieren, müssen die Optiken speziell für Ultrakurzpulsanwendungen ausgelegt sein. Ultrakurzpuls-spiegel besitzen einen extrem hohen Reflexionsgrad von meist mehr als 99,8 Prozent, hohe Zerstörschwellen und minimale Dispersion über einen breiten Wellenlängenbereich.

Hochdispersive Spiegel ermöglichen sehr effektive Lösungen für Puls-kompression und Dispersions-kompensation. Neben einem hohen Reflexionsgrad weisen sie einen hohen negativen GDD-Wert auf (Abb. 6) und keine Dispersions-effekte höherer Ordnung in einem breiten Wellenlängenbereich. Bei der Arbeit mit Ultrakurzpuls-lasersystemen sind die richtigen optischen Komponenten entscheidend, um eine optimale Leistung zu gewährleisten. Das Verständnis für den Einfluss einer Optik auf das jeweilige System ist essenziell, um die richtige Optik auszuwählen.

### Der Autor

**Dipl. Phys. Matthias Knobl**, Edmund Optics Europe, Isaac-Fulda-Allee 5, 55124 Mainz, [www.edmundoptics.de](http://www.edmundoptics.de)

## Vakuumtechnik



Vakuumkammer-Familie zum Einsatz in einem Hochenergie-Speicherring eines Teilchenbeschleunigers.

**PiNK**®

**Innovativ und intelligent.  
Präzise und produktiv.  
Zuverlässig und zukunftsweisend.**

PiNK, der Weltmarktführer für vakuumtechnische Sonderanlagen, produziert seit rund 30 Jahren Anlagen und Systeme nach Kundenanforderung. Zum umfassenden Produktspektrum zählen u.a. UHV-Systeme für Linearbeschleuniger, Ionenstrahl-Therapieanlagen, Dichtheitsprüfanlagen sowie Hochvakuum-Lötöfen.

Führende internationale Technologieunternehmen, u.a. aus der Halbleiter- und Elektronikindustrie, der Medizintechnik, der Luft- und Raumfahrt sowie der Wissenschaft und Forschung vertrauen auf die innovativen Produkte des Familienunternehmens aus Wertheim.