



# PATENT SCHRIFT

(12)

(21) Anmeldenummer: A 2066/99  
(22) Anmeldetag: 09.12.1999  
(42) Beginn der Patentdauer: 15.04.2002  
(45) Ausgabetag: 27.12.2002

(51) Int. Cl.<sup>7</sup>: **H01S 3/08**  
G02B 5/08, 5/28

(56) Entgegenhaltungen:

- F.X. KÄRNTNER ET AL., "DESIGN AND FABRICATION OF DOUBLE- CHIRPED MIRRORS", OPTICS LETTERS 1997, VOL. 22, NR. 11, S. 831-833
- G. TEMPEA ET AL., "DISPERSION CONTROL OVER 150 THZ WITH CHIRPED DIELECTRIC MIRRORS", IEEE JSTQE 1998, VOL. 4, NR. 2, S. 193-196
- N. MATUSCHEK ET AL., "THEORY OF DOUBLE-CHIRPED MIRRORS", IEEE JSTQE 1998, VOL. 4, NR. 2, S. 197-208
- SZIPÖCS ET AL., "CHIRPED MULTILAYER COATINGS FOR BROADBAND DISPERSION CONTROL IN FEMTOSECOND LASERS", OPTICS LETTERS, 1. FEBRUAR 1994, VOL. 19, NR. 3, S. 201-203
- STINGL ET AL., "GENERATION OF 11-FS PULSES FROM A TI:SAPPHIRE LASER WITHOUT THE USE OF PRISMS", OPTICS LETTERS, 1. FEBRUAR 1994, VOL. 19, NR. 3, S. 204-206
- US 5734503A

(73) Patentinhaber:

FEMTOLASERS PRODUKTIONS GMBH  
A-2100 KORNEUBURG, NIEDERÖSTERREICH  
(AT).

(72) Erfinder:

KRAUSZ FERENC DR.  
VÖSENDORF, NIEDERÖSTERREICH (AT).  
TEMPEA GABRIEL FLORIN DIPL.ING.  
WIEN (AT).

(54) MEHRSCICHTIGER SPIEGEL ZUR HERBEIFÜHRUNG EINER VORGEGEBENEN GRUPPENVERZÖGERUNGSDISPERSION

AT 409 905 B

- (57) Mehrschichtiger Spiegel (1) zur Herbeiführung einer vorgegebenen Gruppenverzögerungsdispersion, z.B. für eine Laservorrichtung, insbesondere eine Kurzpuls-Laservorrichtung, mit mehreren, auf einem Träger angebrachten, über zueinander parallele, ebene Grenzflächen (6) aneinander anschließenden, verschiedene Brechungsindizes und verschiedene Dicken aufweisenden Einzelschichten (2, 3) und mit einer ebenen, strahlauftreffseitigen Vorderfläche (5; 5'), wobei die Vorderfläche (5; 5') relativ zu den Grenzflächen (6) zwischen den Einzelschichten (2, 3) geneigt ist.

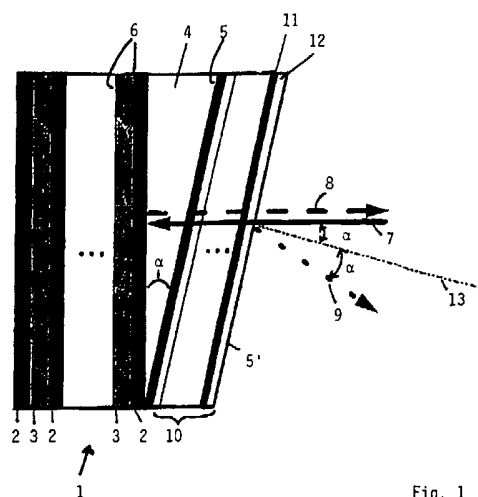


Fig. 1

Die Erfindung betrifft einen mehrschichtigen Spiegel zur Herbeiführung einer vorgegebenen Gruppenverzögerungsdispersion, z.B. für eine Laservorrichtung, insbesondere eine Kurzplus-Laservorrichtung, mit mehreren, auf einem Träger angebrachten, über zueinander parallele, eben Grenzflächen aneinander anschließenden, verschiedene Brechungsindizes und verschiedene Dicken aufweisenden Einzelschichten und mit einer ebenen, strahlauftreffseitigen Vorderfläche.

In der Lasertechnik werden zunehmend kürzere Laserimpulse, mit Impulsdauern im Pikosekunden- und Femtosekunden-Bereich (bis unter 10 Femtosekunden), angewandt. Abgesehen von der Anwendung in wissenschaftlichen Bereichen werden derartige Kurzpuls-Laservorrichtungen immer häufiger auch z.B. für Materialbearbeitungen höchster Präzision, in der ultraschnellen Spektroskopie, in der optischen Breitband-Nachrichtenübertragung und in der Femtochemie (zeitaufgelöste Untersuchung chemischer Reaktionen auf einer Femtosekunden-Zeitskala) eingesetzt. Die bei solchen Kurzpuls-Laservorrichtungen, vgl. beispielsweise WO 98/10494 A, eingesetzten Laserkristalle haben ausgezeichnete thermische Eigenschaften sowie breite Fluoreszenzbänder, um die Erzeugung von Laserimpulsen mit Impulsdauern unter 10 oder sogar unter 5 Femtosekunden zu ermöglichen. Insbesondere werden hier Laserkristalle eingesetzt, die mit Übergangsmetallen dotiert sind, wie v.a. der Titan-Saphir(Ti:S)-Laserkristall.

Ein Problem bei der Erzeugung derartiger ultrakurzer Laserimpulse liegt in den übrigen optischen Komponenten des jeweiligen Lasersystems, wobei es insbesondere von Bedeutung wäre, breitbandige dispersive Komponenten zur Verfügung zu haben. Als "dispersiv" werden Komponenten bezeichnet, die für unterschiedliche Wellenlängen der einfallenden Strahlung unterschiedliche Gruppenverzögerungen einführen.

Es ist bereits vorgeschlagen worden, solche "dispersiven" Spiegel für Laservorrichtungen in Dünnschicht-Technik auszuführen, vgl. z.B. die US 5 734 503 A. Dabei werden die Spiegel aus einer Vielzahl (typischerweise zwischen 40 und 70) von Einzelschichten aufgebaut, die unterschiedliche Eigenschaften aufweisen, nämlich abwechselnd einen höheren bzw. einen niedrigeren Brechungsindex besitzen, und die bei der Reflexion eines ultrakurzen Laserimpulses - der eine entsprechend große Bandbreite im Frequenzbereich aufweist - ihre Funktion ausüben: Die verschiedenen Wellenlängenkomponenten des Laserstrahls dringen unterschiedlich tief in die Einzelschichten des Spiegels ein, bevor sie reflektiert werden. Dadurch werden die verschiedenen Frequenzkomponenten verschieden lang, entsprechend der jeweiligen Eindringtiefe, verzögert; wenn eine negative Gruppenverzögerungsdispersion erzielt werden muss, werden die kurzwelligen Wellenpakete weiter außen reflektiert; die langwelligen Anteile dringen hingegen tiefer in den Spiegel ein, bevor sie reflektiert werden. Dies bedeutet, dass die langwelligen Frequenzkomponenten gegenüber den kurzwelligen Komponenten zeitlich verzögert werden. Auf diese Weise kann bei einer Laservorrichtung eine Dispersionskompensation für einen Kurzpuls-Laserstrahl erhalten werden. Im Zeitbereich besonders kurze Impulse besitzen nämlich ein breites Frequenzspektrum, wobei aber die verschiedenen Frequenzkomponenten des Laserstrahls beim Durchlaufen eines dichten Mediums (wie z.B. Laserkristall) bzw. beim Durchlaufen einer Luftstrecke einen unterschiedlichen Brechungsindex "sehen" (d.h. die optische Dicke des Mediums ist für die verschiedenen Frequenzkomponenten der Laserimpulse verschieden groß); die verschiedenen Frequenzkomponenten des Laserimpulses werden daher beim Durchlaufen des Mediums verschieden verzögert. Diesem Effekt soll durch die genannte Dispersionskompensation an den bekannten dispersiven Dünnschicht-Laserspiegeln begegnet werden, an denen eine negative Gruppenverzögerungsdispersion (GDD - group delay dispersion) bewirkt wird, vgl. z.B. R. Szipöcs et al., Optics Letters, Vol. 19, Nr. 3, S. 201-203 (1994); und US-A-5734503. Diese bekannten Spiegel werden auch als "gechirpte" Spiegel (Chirped Mirrors - CM) bezeichnet und stellen einen wesentlichen Fortschritt im Vergleich zu davor eingesetzten Verzögerungselementen mit Prismen dar. Es konnten erstmals Laserimpulse mit Impulsdauern von 10 Femtosekunden und darunter direkt von einem Laseroszillator erhalten werden, und die Lasersysteme wurden kompakter und verlässlicher. Die CM-Spiegel steuern die Wellenlängen-Abhängigkeit der Gruppenverzögerung wie erwähnt durch die Eindringtiefe der verschiedenen spektralen Komponenten in der Vielschichtstruktur.

Ein Problem bei diesen CM-Spiegeln und ganz allgemein bei vergleichbaren Mehrschicht-Spiegeln besteht darin, dass an der Grenzfläche der obersten Schicht zur Umgebung, also an der Vorderfläche, wo die Strahlung auftrifft, eine weitgehend von der Wellenlänge unabhängige Reflexion (z.B. in der Größenordnung von 3%) auftritt. In der Folge kommt es zu Interferenzen zwischen

Strahlen, die an dieser Vorderfläche reflektiert werden, und Strahlen, die tiefer in der Mehrschichtstruktur des Spiegels reflektiert werden, wobei diese Interferenzeffekte zu einer starken Verzerrung des Reflexionsvermögens und der Phasencharakteristik des Spiegels führen können. Um diesem Effekt zumindest teilweise entgegenzuwirken, wurde bereits vorgeschlagen (vgl. F.X. Kärntner et al., "Design and fabrication of double-chirped mirrors" 1997 Optics Letters Vol. 22, Nr. 11, S. 831-833; G. Tempea et al., "Dispersion control over 150 THz with chirped dielectric mirrors," IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 1998, Vol. 4, Nr. 1, S. 193-196; bzw. N. Matuschek et al., "Theory of Double-Chirped Mirrors" IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 1998, Vol. 4, Nr. 2, S. 197-208), eine antireflektierende Beschichtung oder ein schmalbandiges Sperrfilter an der Vorderfläche, d.h. der Grenzfläche zur Umgebung, anzubringen. Um Störresonanzen wirksam zu unterdrücken, sollte die Reflexion an der Vorderfläche in der Größenordnung von bloß  $10^{-4}\%$  liegen. Antireflexionsschichten und Sperrfilter können eine solche Eigenschaft jedoch nur über eine sehr begrenzte Bandbreite annähern. Demzufolge konnten dispersive Spiegel in der Vergangenheit bei 800 nm-Strahlung nur über Bandbreiten von 150-160 THz betrieben werden. Weiters ist eine totale Unterdrückung der Resonanz-Interferenzeffekte nicht einmal über eine solche schmale Bandbreite möglich, und die Dispersionskurve zeigt oft starke Schwankungen.

Es ist daher Ziel der Erfindung, hier Abhilfe zu schaffen und einen mehrschichtigen Spiegel der eingangs angeführten Art vorzusehen, bei dem die genannten, auf Grund von an der Vorderfläche des Spiegels reflektierter Strahlung auftretenden Interferenzeffekte auf einfache Weise vermieden werden.

Der erfindungsgemäße mehrschichtige Spiegel der eingangs angeführten Art ist dadurch gekennzeichnet, dass die Vorderfläche relativ zu den Grenzflächen zwischen den Einzelschichten geneigt ist. Durch diese Schrägstellung der Vorderfläche der Mehrschichtstruktur des Spiegels, also z.B. der vordersten Grenzfläche des Spiegels, beispielsweise zwischen Dielektrikum (Spiegel) und Luft (Umgebung), wird erreicht, dass der an dieser Vorderfläche reflektierte Strahl nicht-kollinear mit den an den übrigen Grenzschichten der Spiegel-Mehrschichtstruktur reflektierten Strahlkomponenten ist, d.h. seine Achse verläuft unter einem entsprechenden Winkel zur Achse der übrigen Strahlkomponenten; dadurch kommt es (in einem entsprechenden Abstand vom Spiegel, abhängig auch vom Strahldurchmesser) zu keiner Strahlüberlappung bzw. zu keiner Interferenz mehr, so dass die vorbeschriebenen störenden Interferenzeffekte vermieden werden und z.B. eine breitbandige Dispersionskompensation möglich ist.

Der Winkel, um den die Vorderfläche relativ zu den übrigen Grenzflächen der Spiegel Mehrschichtstruktur "gekippt" wird, ist an sich innerhalb relativ weiter Grenzen wählbar, wird jedoch in der Regel möglichst klein gehalten und z.B. im Bereich von  $1^\circ$  oder einiger weniger Grad liegen. Derartige kleine Winkel sind einerseits bei der Spiegelherstellung leicht realisierbar, und bei einem Durchmesser des einfallenden Strahls von z.B. 2 mm ist andererseits der reflektierte Nutz-Bündelstrahl, der von den inneren Grenzschichten der Mehrschichtstruktur reflektiert wird, vom an der schrägen Vorderfläche schräg reflektierten Strahl nach einer Propagationslänge von knapp 6 cm bereits völlig getrennt, d.h. phasenstörende Interferenzeffekte (die hier die Untergrenze für den Winkel definieren) können ab dieser Distanz nicht mehr auftreten. Kleine Winkel (im Bereich von  $1^\circ$  oder einiger weniger Grad) haben überdies den Vorteil, dass die Dicke der ersten, äußersten Schicht des Spiegels - deren Außenfläche die schräge Vorderfläche bildet - auch gering gehalten werden kann, was deshalb vorteilhaft ist, weil dann die von der keilförmigen ersten, äußeren Schicht eingeführte positive Dispersion 2. Ordnung minimiert werden kann (um gegebenenfalls eine negative Gesamtdispersion des Spiegels zu erzielen).

Es kann aber in bestimmten Fällen durchaus erwünscht sein, einen größeren "Keil"winkel für die äußere Schicht vorzusehen, etwa um eine zusätzliche negative Dispersion - ähnlich wie in einer Anordnung mit einem Prismenpaar - einzuführen.

Der Aufbau des mehrschichtigen Spiegels kann je nach Anwendung mit einem bestimmten Substrat und den darauf niedergeschlagenen Dünnschichten in der entsprechenden Anzahl und aus den jeweiligen Materialien vorgesehen werden. Dabei ist es vielfach möglich und für eine einfache Erzielung der Keilform der äußersten Schicht des Spiegels vorteilhaft, wenn die geneigte Vorderfläche durch die Außenfläche eines als Träger vorgesehenen dünnen keilförmigen transparenten Substrates gebildet ist, auf dessen Rückseite die Einzelschichten angebracht sind. Bei

dieser Ausführungsform wird somit ein vorgefertigtes dünnes transparentes keilförmiges Glassubstrat eingesetzt, auf dessen von der Vorderfläche abgewandten Rückseite die gewünschten Dünnschichten - in an sich üblicher Weise - angebracht werden; beispielsweise werden abwechselnd Einzelschichten mit relativ niedrigem Brechungsindex und solche mit relativ hohem Brechungsindex angebracht. Im Betrieb trifft der einfallende Strahl zuerst auf das keilförmige Glassubstrat, wobei der an der schrägen Vorderfläche reflektierte Strahl schräg zurückreflektiert wird, und es kommt ferner zu den erwünschten beschriebenen Reflexionen im Inneren des Spiegels, je nach Wellenlänge der Strahlkomponenten, wobei die reflektierten Strahlkomponenten mit dem außen an der Vorderfläche schräg reflektierten Strahl nicht interferieren.

Eine andere, vielfach vorteilhafte Möglichkeit für die Erzielung der schrägen Vorderfläche oder Außenfläche des Mehrschicht-Spiegels besteht darin, dass die geneigte Vorderfläche durch die Außenfläche einer äußeren keilförmigen Schicht vorgesehen ist, die zusammen mit den Einzelschichten auf einem von der Strahlaufftreffseite abgewandten, als Träger vorgesehenen Trägersubstrat angebracht ist. Bei diesem Spiegel-Aufbau bildet somit das Trägersubstrat die Rückseite des Spiegels, und auf diesem Trägersubstrat werden in an sich herkömmlicher Weise die einzelnen Schichten aufgebracht. Um bei der äußersten oder vordersten Schicht die Keilform zu erzielen, d.h. die sich linear ändernde Dicke der Schicht vorzusehen, kann bei der Herstellung das Trägersubstrat in der Beschichtungskammer etwas schräggestellt werden, oder es kann eine entsprechend in der Durchlässigkeit linear variierende Maske bei der Aufbringung des Materials für die äußerste Schicht verwendet werden. In beiden Fällen wird die bereits zuvor erhaltene Struktur für die Herstellung der äußersten Schicht einem inhomogenen Dampfstrom ausgesetzt, wobei die Dicke der äußersten (obersten) Schicht monoton mit wachsendem Abstand von der Dampfquelle abnehmen wird. Auf diese Weise kann auch beispielsweise ein herkömmlicher Standard-Bragg-Reflektor als Substrat eingesetzt werden, was für viele Anwendungen bei der Dispersionskontrolle erwünscht ist, vgl. z.B. auch die nicht vorveröffentlichte ältere AT-Anmeldung A 1160/99.

Der an der Vorderfläche der Mehrschichtstruktur des Spiegels schräg reflektierte Strahl ist wie bereits angedeutet an sich ein Strahl relativ niedriger Intensität, nichtsdestoweniger führt er einen Verlust ein, der zu den Verlusten des Spiegels beiträgt. Um eine Minimierung der Spiegel-Verluste zu erzielen, ist es daher von Vorteil, wenn auf der geneigten Vorderfläche eine an sich bekannte antireflektierende Beschichtung mit entsprechend geneigter Vorderfläche aufgebracht ist. Antireflektierende, insbesondere mehrschichtige Beschichtungen sind an sich bekannt, wobei auch antireflektierende Überzüge bekannt sind, die keine Phasenverzerrungen einführen. Untersuchungen haben gezeigt, dass das Reflexionsvermögen an der schrägen Vorderfläche auf diese Weise auf unter 0,2% im Wellenlängenbereich von 500 bis 1000 nm reduziert werden kann. Der Vollständigkeit halber sei erwähnt, dass diese AR (= Antireflexion)-Beschichtung aus zu den übrigen Grenzflächen im Inneren der Spiegel-Mehrschichtstruktur schräg verlaufenden Einzelschichten besteht, entsprechend dem schrägen Verlauf der Vorderfläche des eigentlichen Spiegels. Als Einzelschichten für die AR-Beschichtung können beispielsweise Titanoxid ( $\text{TiO}_2$ ) und Siliziumdioxid ( $\text{SiO}_2$ ) bzw. Tantalpentoxid ( $\text{Ta}_2\text{O}_5$ ) und Siliziumdioxid ( $\text{SiO}_2$ ) verwendet werden.

Die variierenden Dicken der Einzelschichten dienen zur Erzielung einer vorbestimmten Reflexionscharakteristik und bzw. oder einer vorbestimmten Gruppenverzögerungsdispersions-Charakteristik. Durch die angegebene Schichtdicken-Variation kann je nach Einsatzzweck des Spiegels eine bestimmte Soll-Kurve betreffend Reflexionsvermögen bzw. Dispersion (Gruppenverzögerungsdispersion) festgelegt werden, wobei beispielsweise die Einführung einer negativen Gruppenverzögerungsdispersion ebenso wie das Vorsehen einer vorgegebenen positiven Gruppenverzögerungsdispersion denkbar ist. Insbesondere ist es hier vorteilhaft, wenn die Dicken der Einzelschichten mit dem Abstand von der Vorderfläche im Allgemeinen zunehmen, und so eine negative, gegebenenfalls konstante Gruppenverzögerungsdispersion und ein hohes Reflexionsvermögen in einem vorgegebenen spektralen Bereich definiert sind.

Der vorliegende mehrschichtige dispersive Spiegel kann eine "gechirpte" Struktur (vgl. US 5 734 503 A) aufweisen, bei der die Schichtdicken im Schnitt mit dem Abstand von der vordersten Schicht zunehmen, es kann jedoch auch eine resonante Struktur vorliegen, wie sie beispielsweise in der bereits erwähnten nicht vorveröffentlichten älteren AT-Anmeldung A 1160/99 offenbart ist. Für den Aufbau der Mehrschichtstruktur des vorliegenden Spiegels können als Einzelschichten in an sich bekannter Weise abwechselnd Siliziumdioxid ( $\text{SiO}_2$ )-Schichten und Titandioxid

( $\text{TiO}_2$ )-Schichten vorgesehen sein; im Hinblick auf eine preiswerte und zuverlässige Herstellung ist es aber auch denkbar, dass als Einzelschichten in an sich bekannter Weise abwechselnd Siliziumdioxid ( $\text{SiO}_2$ )-Schichten und Tantalpentdioxid ( $\text{Ta}_2\text{O}_5$ )-Schichten vorgesehen sind. Eine derartige Schichtenstruktur mit Tantalpentoxid ( $\text{Ta}_2\text{O}_5$ )-Schichten ist auch deshalb vorteilhaft, weil die Absorptionskante von Tantalpentoxid ( $\text{Ta}_2\text{O}_5$ ) bei relativ kurzen Wellenlängen liegt, wodurch die Zerstörungsschwelle des Materials höher liegt.

Eine andere vorteilhafte Ausführungsform des vorliegenden Spiegels wird erhalten, wenn als Einzelschichten in an sich bekannter Weise abwechselnd Halbleiterschichten mit niedrigerem Brechungsindex und Halbleiterschichten mit höherem Brechungsindex vorgesehen sind. Ein Vorteil einer solchen Halbleiter-Ausführung besteht darin, dass es dann möglich ist, in der Mehrschichtstruktur des Spiegels (an sich bekannte) sättigbare Absorber-Schichten einzufügen, was für die Anwendung in Laservorrichtungen von besonderem Vorteil sein kann.

Der erfindungsgemäße Spiegel wird in besonders vorteilhafter Weise in einer Laservorrichtung, insbesondere in einer Kurzpuls-Laservorrichtung, verwendet, u.zw. insbesondere als Element zur Dispersionskontrolle, wie eingangs erläutert wurde.

Die Erfindung wird nachstehend anhand von besonders bevorzugten Ausführungsbeispielen, auf die sie jedoch nicht beschränkt sein soll, und unter Bezugnahme auf die beiliegenden Zeichnungen noch näher erläutert. Es zeigen im Einzelnen in der Zeichnung: Fig.1 schematisch den Aufbau eines dispersiven mehrschichtigen Spiegels mit einem keilförmigen vorderen Glassubstrat; Fig.2 in einer entsprechenden schematischen Ansicht einen anderen mehrschichtigen dispersiven Spiegel, bei dem ein rückseitiges, je nach Einsatzzweck zu wählendes Substrat als Basis für den Schichtaufbau vorgesehen ist; Fig.3 eine Anordnung mit zwei dispersiven Spiegeln beispielsweise gemäß Fig.1 (oder aber auch gemäß Fig.2) für die Kompensation einer räumlichen Dispersion (Winkeldispersion); Fig.4 in einem Diagramm das Reflexionsvermögen  $R$  eines Spiegels gemäß Fig.1 oder Fig.2 in Abhängigkeit von der Wellenlänge  $\lambda$ ; Fig.5 in einem Diagramm die Gruppenverzögerungsdispersion GDD des Spiegels gemäß Fig.1 oder 2 über der Wellenlänge  $\lambda$ ; und die Fig.6 und 7 in entsprechenden Diagrammen das Reflexionsvermögen  $R$  (Fig.6) bzw. die Gruppenverzögerungsdispersion GDD (Fig.7) über der Wellenlänge  $\lambda$  für einen anderen Spiegel gemäß Fig.1 oder 2 der dank seiner hohen Transmission im Bereich der Pump-Wellenlänge als Einkopplungsspiegel in einem Laser-Resonator verwendet werden kann.

In Fig.1 ist schematisch ein mehrschichtiger dispersiver Spiegel 1 veranschaulicht, der beispielsweise aus Einzelschichten 2 mit relativ niedrigem Brechungsindex und Einzelschichten 3 mit relativ hohem Brechungsindex aufgebaut ist. Diese Einzelschichten 2, 3 sind abwechselnd angeordnet, wobei insgesamt z.B. 30 bis 70 Einzelschichten 2, 3 oder mehr vorhanden sein können. Diese Einzelschichten 2, 3 sind an der Rückseite eines als Träger vorgesehenen keilförmigen dünnen transparenten Substrats 4, insbesondere eines Glassubstrats, in an sich herkömmlicher Weise, beispielsweise durch Niederschlagen aus der Dampfphase, aufgebracht. Das Trägersubstrat 4 hat wie ersichtlich Keilform, d.h. seine Dicke ändert sich linear von einer Seite mit minimaler Dicke zur anderen, gegenüberliegenden Seite mit maximaler Dicke, so dass auf diese Weise eine Vorderfläche 5 erhalten wird, die im Vergleich zu den Grenzflächen 6 zwischen den Einzelschichten 2, 3 unter einem Winkel  $\alpha$  geneigt verläuft.

Ein an der Vorderfläche 5 ankommender Strahl 7, insbesondere Laserstrahl, durchdringt das Trägersubstrat 4 und wird abhängig von den Wellenlängen seiner einzelnen Frequenzkomponenten mehr oder weniger tief in der Mehrschichtstruktur des Spiegels 1 an den entsprechenden Grenzflächen 6 reflektiert, um so die eingangs beschriebene Dispersionskontrolle für den reflektierten Strahl 8 zu erzielen. In der Regel wird hier eine negative Gruppenverzögerungsdispersion GDD vorgesehen, wobei Wellen mit größeren Wellenlängen zwecks stärkerer Verzögerung tiefer in die Mehrschichtstruktur eindringen als kurzwellige Anteile, die im Spiegel 1 weiter außen reflektiert werden.

Wie sich gezeigt hat, kommt es normalerweise an der Vorderfläche des Spiegels 1 zu einer wenn auch geringen, so doch - ohne schräge Vorderfläche - nachteiligen Reflexion, wobei der hier reflektierte Strahl mit den innerhalb der Mehrschichtstruktur des Spiegels 1 reflektierten Strahlen Interferenzen bewirkt, woraus starke Verzerrungen des Reflexionsvermögens und der Phasencharakteristik des Spiegels resultieren. Um diese Interferenzeffekte zu vermeiden, ist wie erwähnt die Vorderfläche 5 relativ zu den übrigen Grenzflächen 6 schräg angeordnet, so dass der an der

Vorderseite 5 bzw. 5' des Spiegels 1 reflektierte Strahl 9 unter einem Winkel gleich dem doppelten Neigungswinkel  $\alpha$  der Vorderfläche 5 bzw. 5' reflektiert wird. Dadurch ist dieser schräg reflektierte Strahl 9 zumindest in einem relativ kurzen Abstand bereits kein Störfaktor, da er je nach Neigungswinkel der Vorderfläche 5 bzw. 5' sowie je nach Durchmesser des einfallenden Strahls 7 bereits nach einer relativ kurzen Propagationslänge, im Bereich von einigen wenigen Zentimetern, völlig von den Nutz-Strahlen 7 und 8 getrennt ist, so dass ab dieser Distanzphasen störende Interferenzeffekte nicht mehr auftreten können.

Da der schräg reflektierte Strahl 9 zu den Verlusten des Spiegels 1 beiträgt, wird bevorzugt an der Vorderfläche 5 des keilförmigen Substrats 4 - eine an sich bekannte anti-reflektierende (AR-Antireflexions-) Beschichtung 10 aufgebracht, die aus mehreren Einzelschichten 11, 12 von abwechselnd schwächer brechenden Einzelschichten 11 bzw. stärker brechenden Einzelschichten 12 angebracht wird. Für diese AR-Beschichtung können beispielsweise abwechselnd Titandioxid ( $\text{TiO}_2$ ) - und Siliziumdioxid ( $\text{SiO}_2$ )-Schichten oder aber Tantalpentoxid ( $\text{Ta}_2\text{O}_5$ )- und Siliziumdioxid ( $\text{SiO}_2$ )-Schichten in an sich herkömmlicher Weise verwendet werden, wobei in der Regel weniger als 15 Einzelschichten ausreichen und durch diese AR-Beschichtung 10 keine Phasenverzerungen eingeführt werden. Mit einer derartigen AR-Beschichtung 10 ist es möglich, das Reflexionsvermögen an der nunmehr äußeren Vorderfläche 5' (Grenzfläche vom Spiegel 1 zur Umgebung) im interessanten Wellenlängenbereich von 500 nm bis 1000 nm auf unter 0,2% herabzusetzen.

Der Vollständigkeit halber ist in Fig.1 weiters die Flächennormale 13 eingezeichnet, die senkrecht auf die Vorderfläche 5' steht und die Winkelsymmetrale zwischen dem einfallenden Strahl 7 und dem an der Vorderfläche 5' schräg reflektierten Strahl 9 bildet.

Für den Aufbau eines Spiegels 1 gemäß Fig.1 kann beispielsweise die folgende Schichtenstruktur gewählt werden:

Material	Schichtdicke(nm)
keilförmiges Substrat 4	
$\text{SiO}_2$	259.80
$\text{TiO}_2$	15.00
$\text{SiO}_2$	61.38
$\text{TiO}_2$	59.12
$\text{SiO}_2$	18.81
$\text{TiO}_2$	79.30
$\text{SiO}_2$	72.89
$\text{TiO}_2$	21.16
$\text{SiO}_2$	118.24
$\text{TiO}_2$	56.13
$\text{SiO}_2$	30.30
$\text{TiO}_2$	75.66
$\text{SiO}_2$	96.41
$\text{TiO}_2$	33.40
$\text{SiO}_2$	76.25
$\text{TiO}_2$	76.31
$\text{SiO}_2$	80.31
$\text{TiO}_2$	35.10
$\text{SiO}_2$	108.49
$\text{TiO}_2$	73.01
$\text{SiO}_2$	72.73
$\text{TiO}_2$	48.58
$\text{SiO}_2$	102.70
$\text{TiO}_2$	76.02
$\text{SiO}_2$	95.01
$\text{TiO}_2$	42.53
$\text{SiO}_2$	100.45
$\text{TiO}_2$	97.86
$\text{SiO}_2$	100.47

	TiO <sub>2</sub>	50.81
	SiO <sub>2</sub>	93.09
	TiO <sub>2</sub>	82.43
	SiO <sub>2</sub>	132.75
5	TiO <sub>2</sub>	76.17
	SiO <sub>2</sub>	84.22
	TiO <sub>2</sub>	69.18
	SiO <sub>2</sub>	148.68
	TiO <sub>2</sub>	78.55
10	SiO <sub>2</sub>	117.82
	TiO <sub>2</sub>	79.60
	SiO <sub>2</sub>	154.27
	TiO <sub>2</sub>	78.25
	SiO <sub>2</sub>	116.50
15	TiO <sub>2</sub>	109.89
	SiO <sub>2</sub>	143.51
	TiO <sub>2</sub>	89.85
	SiO <sub>2</sub>	158.38
	TiO <sub>2</sub>	76.01
20	SiO <sub>2</sub>	174.52
	TiO <sub>2</sub>	86.94
	SiO <sub>2</sub>	186.03
	TiO <sub>2</sub>	96.81
	SiO <sub>2</sub>	167.78
25	TiO <sub>2</sub>	106.09
	SiO <sub>2</sub>	191.54
	TiO <sub>2</sub>	120.83
	SiO <sub>2</sub>	187.05
	TiO <sub>2</sub>	122.09
30	SiO <sub>2</sub>	307.80

Für einen derartigen Spiegel ist in den Fig.4 und 5 das Reflexionsvermögen R (in %) über der Wellenlänge  $\lambda$  (in nm) bzw. die Gruppenverzögerungsdispersion (group delay dispersion) GDD (in fs<sup>2</sup>) über der Wellenlänge  $\lambda$  (in nm) veranschaulicht. Wie aus Fig.4 ersichtlich ist das Reflexionsvermögen R im Wellenlängenbereich von 500 nm bis 1000 nm praktisch konstant, und die in Fig.5 gezeigte Gruppenverzögerungsdispersion GDD weist einen leicht welligen Verlauf auf.

In Fig.2 ist eine andere Ausführungsform eines mehrschichtigen dispersiven Spiegels 1 gezeigt, wobei hier auf einem von der Strahlauftreffseite abgewandten, als Träger vorgesehenen Trägersubstrat 14 wiederum abwechselnd Spiegelschichten 2, 3 mit höherem bzw. niedrigerem Brechungsindex in herkömmlicher Weise aufgebracht sind. Als vorderste Spiegelschicht ist eine keilförmige Schicht 4' vorgesehen, deren Schichtdicke linear, entsprechend dem Winkel  $\alpha$  zunimmt, so dass wiederum ihre Vorderfläche 5 relativ zu den Grenzflächen 6 zwischen den übrigen Spiegelschichten 2, 3 um den Winkel  $\alpha$  geneigt verläuft. Auch hier ist wiederum an der Vorderfläche 5 der keilförmigen Schicht 4' eine an sich bekannte AR(antireflektierende)-Beschichtung 10 angebracht, die aus abwechselnden Einzelschichten 11 bzw. 12 von niedrigerem bzw. höherem Brechungsindex besteht. Dadurch wird wiederum die Intensität des unerwünschten, an der Vorderfläche 5' der AR-Beschichtung 10 reflektierten Strahls 9 äußerst gering gehalten, so dass die Spiegelverluste minimiert werden.

Die keilförmige Schicht 4' kann beispielsweise dadurch hergestellt werden, dass das Substrat 14 mit den bereits darauf angebrachten zahlreichen Einzelschichten 2, 3 in der Beschichtungskammer entsprechend der gewünschten Schrägstellung gekippt wird, wodurch aufgrund dessen, dass das Substrat mit den Spiegelschichten damit de facto einem inhomogenen Dampfstrom ausgesetzt wird, die Dicke der vordersten, keilförmigen Schicht 4' linear mit zunehmendem Abstand von der Dampfquelle abnehmen wird. Eine andere Möglichkeit besteht darin, eine entsprechend inhomogene Maske beim Niederschlagen des Materials für die keilförmige Schicht 4' aus

der Dampfphase zu verwenden, wobei ebenfalls eine linear variierende Schichtdicke für die keilförmige Schicht 4' erhalten wird.

Die Einzelschichten 2, 3 des Mehrschicht-Spiegels 1 können je nach Anwendungsfall in an sich bekannter Weise abhängig vom Abstand von der vordersten keilförmigen Schicht 4' (Fig.2) bzw. vom keilförmigen Trägersubstrat 4 (Fig.1) variierende Dicken haben, insbesondere mit diesem Abstand allgemein im Durchschnitt zunehmende Schichtdicken, um so eine negative Gruppenverzögerungsdispersion GDD bzw. eine hohe Reflektivität R in einem bestimmten spektralen Bereich zu erzielen.

Der Spiegel 1 kann in an sich bekannter Weise ein sog. "gechirpter" Spiegel (CM-Spiegel) sein, es kann sich jedoch auch um eine resonante Schichten-Struktur handeln. Die Einzelschichten 2, 3 können überdies auch an sich herkömmliche Halbleiterschichten sein, um auf diese Weise sättigbare Absorberschichten in der Spiegelstruktur einzubauen.

In den Fig.6 und 7 sind zum Spiegel 1 gemäß Fig.2 gehörige Diagramme betreffend Reflexionsvermögen R über der Wellenlänge  $\lambda$  (Fig.6) und Gruppenverzögerungsdispersion GDD über der Wellenlänge  $\lambda$  (Fig.7) gezeigt, wobei die Konstanz des Reflexionsvermögens R im Wellenlängenbereich von ca. 580 nm bis 950 nm, ein leicht wellenförmiger Verlauf der Gruppenverzögerungsdispersion GDD zwischen ca.  $-30 \text{ fs}^2$  und  $-38 \text{ fs}^2$  im Bereich von 600 nm bis 950 nm sowie eine hohe Durchlässigkeit in der Nähe der Pumpstrahl-Wellenlänge (bei 520 nm bis 540 nm) ersichtlich sind.

Um eine räumliche (Winkel-) Dispersion zu vermeiden bzw. zu kompensieren, ist es zweckmäßig, Spiegel 1 mit einer geneigten Vorderfläche 5 bzw. 5' wie hier beschrieben paarweise zu verwenden, wie dies aus der Fig.3 ersichtlich ist. Auf diese Weise kann die Winkeldispersion, die von einem Spiegel 1 eingeführt wird, durch den anderen Spiegel, beispielsweise den Spiegel 1a in Fig.3, kompensiert werden. Überdies erlaubt es eine derartige Anordnung mit Spiegelpaaren 1, 1a, die Gesamtdispersion exakt abzustimmen, wobei einer der Spiegel, z.B. der Spiegel 1a, in Querrichtung verstellt wird, wie in Fig.3 mit dem Pfeil 15 schematisch veranschaulicht ist.

Durch die beschriebene Schrägstellung der Vorderfläche 5 bzw. 5' des vorliegenden Mehrschicht-Spiegels 1 wird die Impedanz- Fehlanpassung an der äußersten Grenzfläche (Vorderfläche 5 bzw. 5') vermieden, und die Durchlässigkeit unterhalb des Hochreflexionsbandes des Spiegels wird wesentlich verbessert, da Interferenzbanden höherer Ordnung teilweise unterdrückt werden. Demgemäß kann der vorliegende Spiegel 1 mit schräger Vorderfläche 5 bzw. 5' wie aus den Fig.4 bis 7 ersichtlich ein hohes Reflexionsvermögen R und eine konstante Gruppenverzögerungsdispersion GDD im Wellenlängenbereich von 600 nm bis 950 nm sowie eine hohe Durchlässigkeit in der Nähe der üblichen Pumpstrahl-Wellenlänge (520 nm bis 540 nm) aufweisen. Die Transmission eines Bragg-Spiegels bei der Pumpstrahl-Wellenlänge kann auch durch ein Schrägstellen der vordersten Grenzfläche 6 relativ zu den übrigen Grenzflächen 6 der Schichtstruktur erhöht werden. Der vorliegende Spiegel 1 ist bezüglich Abweichungen von der Nenndicke der Einzelschichten 2, 3, 4, 4', insbesondere der äußersten Schicht 4 bzw. 4', nicht so empfindlich wie herkömmliche "gechirpte" Spiegel, bei denen bereits relativ geringfügige Herstellungsfehler zu starken Schwankungen insbesondere in der GDD-Kurve führen können.

Die höhere Stabilität des vorliegenden Spiegels 1 wird dadurch erreicht, dass die Impedanz-Anpassung zwischen der eigentlichen Mehrschichtstruktur und der obersten keilförmigen Schicht 4 bzw. 4' unabhängig von der Schichtstruktur erreicht wird. Statistische Untersuchungen haben gezeigt, dass bei einem herkömmlichen gechirpten Spiegel, der eine Gruppenverzögerungsdispersion von  $-45 \text{ fs}$ , im Bereich von 300 nm bei 800 nm einführt, Schwankungen in der GDD-Kennlinie mit einer maximalen Amplitude von 100% des Zielwertes (bei 800 nm) bei einer durchschnittlichen Abweichung von 0,5 nm von der nominellen Schichtdicke die Folge sind. Unter gleichen Bedingungen beträgt bei einem Spiegel mit geneigter Vorderfläche 5 bzw. 5' die maximale Amplitude der GDD-Schwankungen bei 800 nm nur 30%.

#### PATENTANSPRÜCHE:

1. Mehrschichtiger Spiegel (1) zur Herbeiführung einer vorgegebenen Gruppenverzögerungsdispersion, z.B. für eine Laservorrichtung, insbesondere eine Kurzpuls-Laservorrich-



- 5      tung, mit mehreren, auf einem Träger angebrachten, über zueinander parallele, ebene Grenzflächen (6) aneinander anschließenden, verschiedene Brechungsindizes und verschiedene Dicken aufweisenden Einzelschichten (2, 3) und mit einer ebenen, strahlauftreffseitigen Vorderfläche (5; 5'), dadurch gekennzeichnet, dass die Vorderfläche (5; 5') relativ zu den Grenzflächen (6) zwischen den Einzelschichten (2, 3) geneigt ist.
- 10      2. Spiegel nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass die geneigte Vorderfläche (5; 5') durch die Außenfläche eines als Träger vorgesehenen dünnen keilförmigen transparenten Substrats (4), insbesondere Glassubstrats, gebildet ist, auf dessen Rückseite die Einzelschichten (2, 3) angebracht sind (Fig.1).
- 15      3. Spiegel nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass die geneigte Vorderfläche (5; 5') durch die Außenfläche einer äußeren keilförmigen Schicht (4') vorgesehen ist, die zusammen mit den Einzelschichten (2, 3) auf einem von der Strahlauftreffseite abgewandten, als Träger vorgesehenen Trägersubstrat (14) angebracht ist (Fig.2).
- 20      4. Spiegel nach einem der Ansprüche 1 bis 3, dadurch gekennzeichnet, dass auf der geneigten Vorderfläche (5) eine an sich bekannte antireflektierende Beschichtung (10) mit entsprechend geneigter Vorderfläche (5') aufgebracht ist.
- 25      5. Spiegel nach einem der Ansprüche 1 bis 4, dadurch gekennzeichnet, dass die Dicken der Einzelschichten (2, 3) in an sich bekannter Weise mit dem Abstand von der Vorderfläche (5; 5') im Allgemeinen zunehmen, und so eine negative, gegebenenfalls konstante Gruppenverzögerungsdispersion und ein hohes Reflexionsvermögen in einem vorgegebenen spektralen Bereich definiert sind.
- 30      6. Spiegel nach einem der Ansprüche 1 bis 5, dadurch gekennzeichnet, dass als Einzelschichten (2, 3) in an sich bekannter Weise abwechselnd Siliziumdioxid- ( $\text{SiO}_2$ -)Schichten und Titandioxid- ( $\text{TiO}_2$ -)Schichten vorgesehen sind.
- 35      7. Spiegel nach einem der Ansprüche 1 bis 5, dadurch gekennzeichnet, dass als Einzelschichten (2, 3) in an sich bekannter Weise abwechselnd Siliziumdioxid- ( $\text{SiO}_2$ -)Schichten und Tantalpentoxid- ( $\text{Ta}_2\text{O}_5$ -)Schichten vorgesehen sind.
- 40      8. Spiegel nach einem der Ansprüche 1 bis 5, dadurch gekennzeichnet, dass als Einzelschichten (2, 3) in an sich bekannter Weise abwechselnd Halbleiterschichten mit niedrigerem Brechungsindex und Halbleiterschichten mit höherem Brechungsindex vorgesehen sind.
- 45
- 50
- 55

# HIEZU 5 BLATT ZEICHNUNGEN

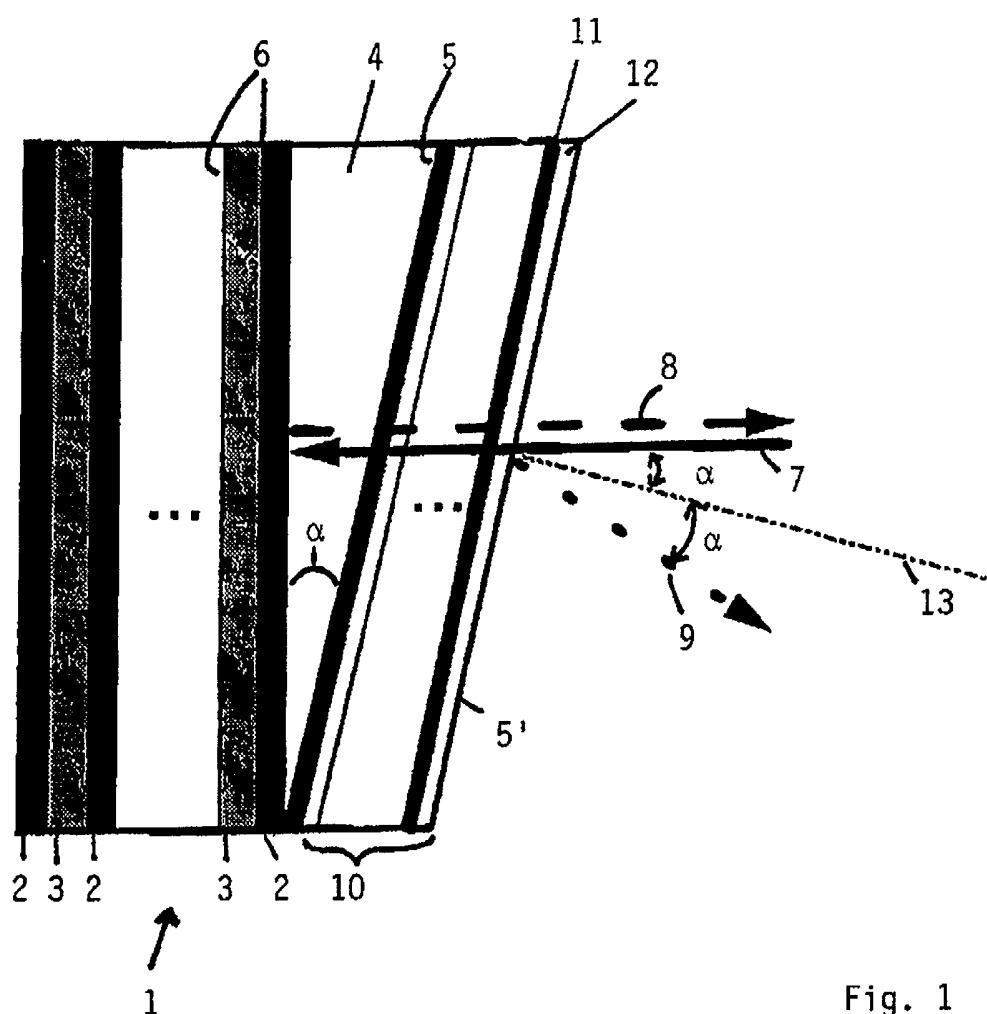


Fig. 1

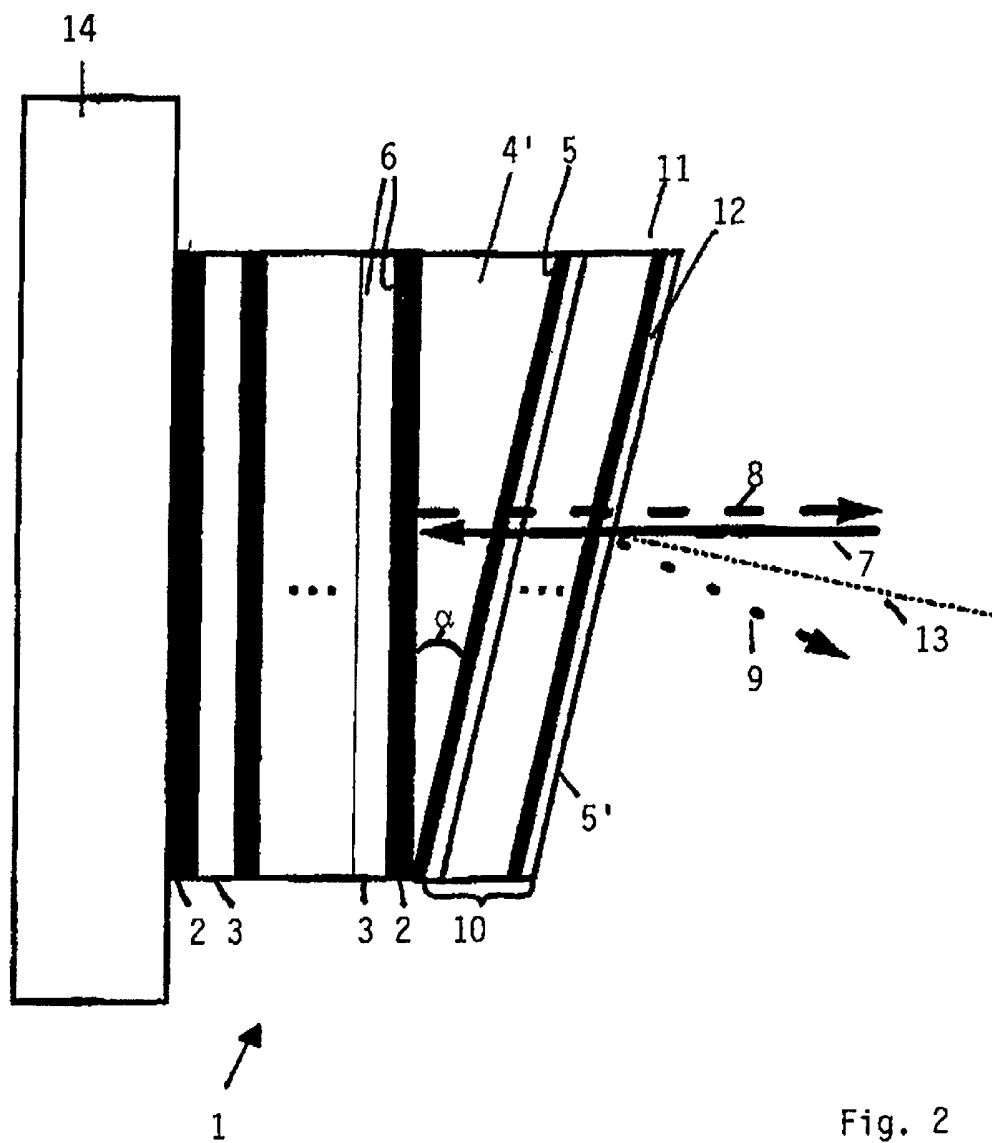


Fig. 2

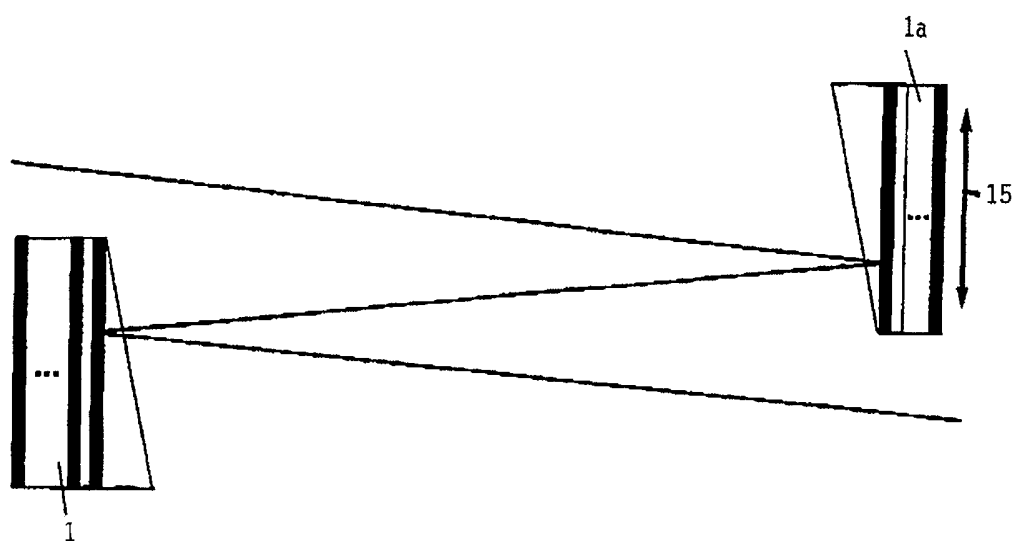


Fig. 3

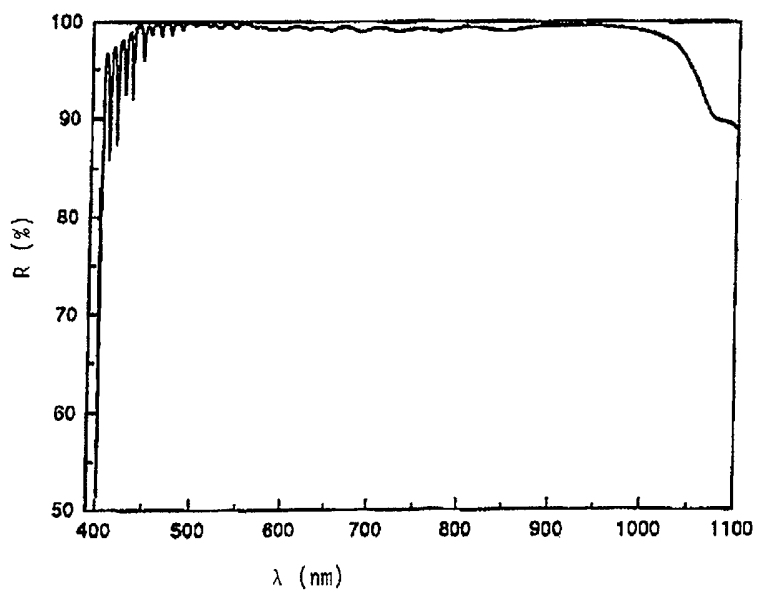


Fig. 4

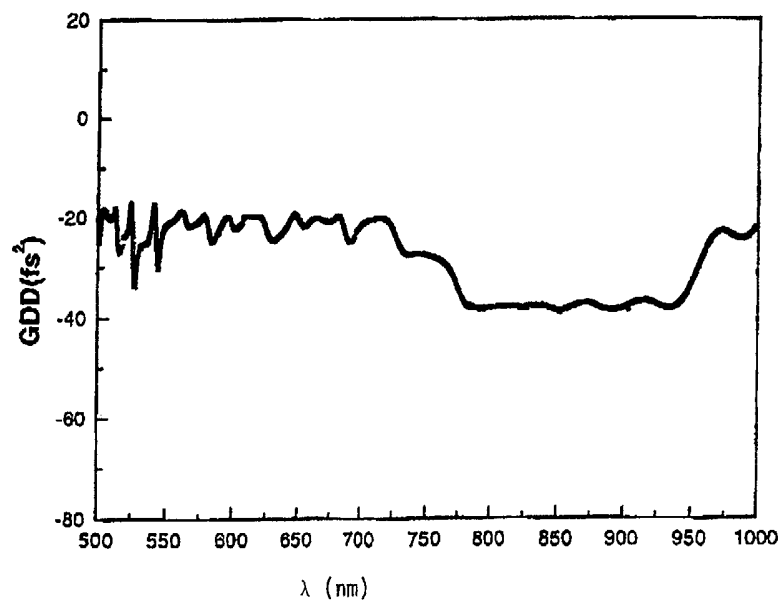


Fig. 5

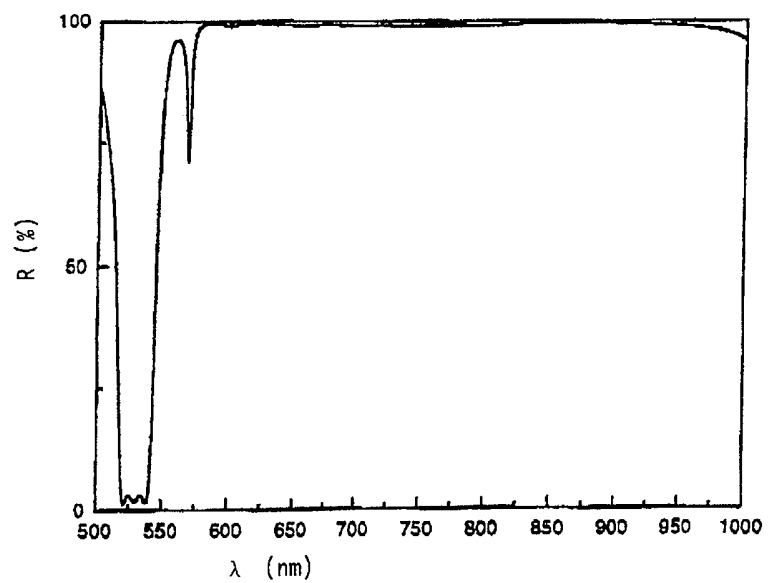


Fig. 6

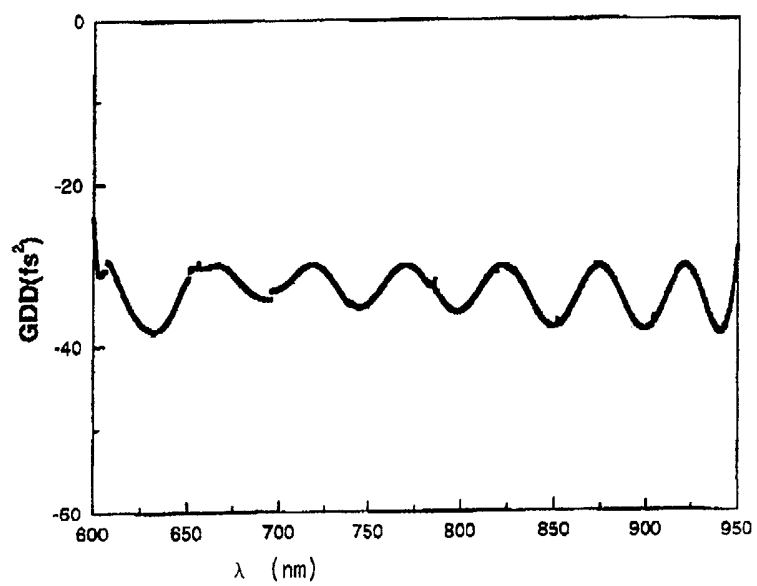


Fig. 7