



(19)
 Bundesrepublik Deutschland
 Deutsches Patent- und Markenamt

(10) **DE 103 27 963 A1** 2005.01.05

(12)

Offenlegungsschrift

(21) Aktenzeichen: **103 27 963.6**
 (22) Anmeldetag: **19.06.2003**
 (43) Offenlegungstag: **05.01.2005**

(51) Int Cl.7: **G02B 5/30**
G02B 27/28, G03F 7/20, G02B 5/28,
G02B 5/18

(71) Anmelder:
Carl Zeiss Jena GmbH, 07745 Jena, DE

(72) Erfinder:
Sandfuchs, Oliver, Dr., 07743 Jena, DE; Pesch,
Alexander, Dipl.-Phys., 07745 Jena, DE;
Blanckenhagen, Bernhard von, Dr., 73431 Aalen,
DE

(56) Für die Beurteilung der Patentfähigkeit in Betracht zu ziehende Druckschriften:

DE 100 25 694 A1
US 65 32 111 B2
US2002/00 63 962 A1
US 59 07 436
JP 11-0 95 027 A

TYAN Rong-Chung, et.al.: Design, fabrication, and characterization of form-birefringent multilayer polarizing beam splitter. In: Journal of the optical society of America, Vol.14, No.7, July 1997, S.1627-1636;;

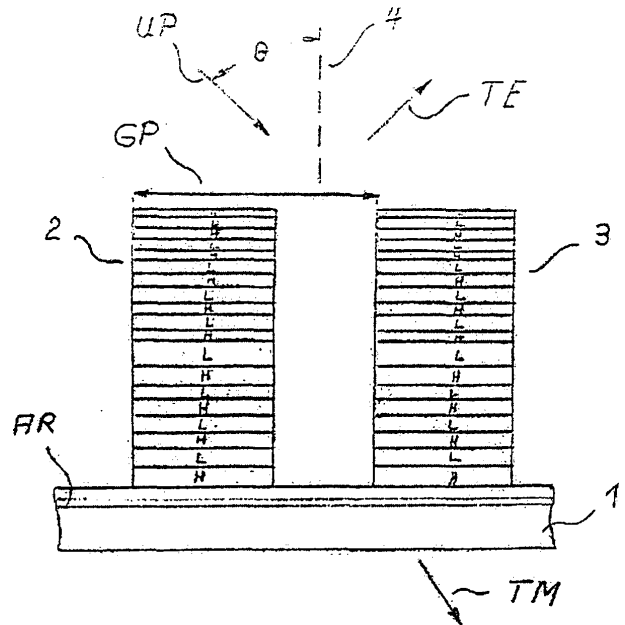
Die folgenden Angaben sind den vom Anmelder eingereichten Unterlagen entnommen

Rechercheantrag gemäß § 43 Abs. 1 Satz 1 PatG ist gestellt.

(54) Bezeichnung: **Polarisationsstrahlteiler**

(57) Zusammenfassung: Die Erfindung betrifft einen Polarisationsstrahlteiler, bevorzugt zur Anwendung in der Mikroskopie oder in Projektionssystemen über einen breitbandigen Spektralbereich von 400 bis 700 nm sowie für Anwendungen in der UV-Litografie im Wellenlängenbereich von 150 bis 400 nm, umfassend ein aus einem optisch transparenten Material bestehenden Trägersubstrat (1), auf dessen Oberfläche ein Array von parallel zueinander verlaufenden Gitterstegen (2, 3) aufgebracht ist, wobei die Gitterstege (2, 3) aus Vielschichtsystemen bestehen und das unter einem Einfallswinkel Θ auf die Gitterstege (2, 3) und das Trägersubstrat (1) auftreffende unpolarisierte Licht (UP) in einen reflektiven (rTE oder rTM) und einen transmissiven (tTM oder tTE) Polarisationsstrahlengang geteilt wird.

Erfindungsgemäß bestehen die einzelnen Schichten (H, L) der Gitterstege (2, 3) aus nichtmetallischen, in ihrem optischen Verhalten verschiedenartig zusammengesetzten, dielektrischen Substanzen.



Beschreibung

[0001] Die Erfindung betrifft einen Polarisationsstrahlteiler, bevorzugt zur Anwendung in der Mikroskopie oder in Projektionssystemen über einen breitbandigen Spektralbereich von 400 bis 700 nm sowie für Anwendungen in der UV-Lithografie im Wellenlängenbereich von 150 bis 400 nm, umfassend ein aus einem optisch transparentem Material bestehendes Trägersubstrat, auf dessen Oberfläche ein Array von parallel zueinander verlaufenden Gitterstegen aufgebracht ist, wobei die Gitterstege aus Vielschichtsystemen bestehen und das unter einem Einfallswinkel θ auf die Gitterstege und das Trägersubstrat auftreffende unpolarisierte Licht in einen reflektiven und einen transmissiven Polarisationsstrahlengang geteilt wird.

Stand der Technik

[0002] Bekannte dielektrische Polarisationsstrahlteiler basieren auf der Verwendung von unstrukturierten Dünnschichtsystemen, wie sie beispielsweise in US 6462873 B1 beschrieben werden. Derartige Lösungen erfüllen oftmals nicht die gestellten optischen Forderungen, da nur eine relativ geringe Extinktion erreichbar ist.

[0003] Weitere Lösungen sind aus US 6462873 B1 und US 6351296 B1 bekannt. Diese Lösungen haben zum einen den Nachteil, dass aufgrund der Einbettung der polarisationsoptischen Mittel in Prismen keine ausreichende kompakte Form der Anordnung möglich ist oder das zum anderen doppelbrechende Materialien zur Polarisationsstrahlteilung verwendet werden.

[0004] Bekannte diffraktive Anordnungen, wie sie beispielsweise von der Firma MOXTEK (US 6288840 B1, US 6243199 B1) vorgestellt werden, basieren auf die Verwendung einfach beschichteter metallischer Beugungsgitter oder es werden Kombinationen von metallischen mit dielektrischen Schichten in Form eines strukturierten metallo-dielektrischen Vielschichtsystems verwendet (US 02/122236 A1, EP 1239308 A2). Bei der Lösung nach US 02/122236 A1 wird das Design alternierender metallo-dielektrischer Doppelschichten und der Effekt des resonanzverstärkten Tunnelns durch einzelne Metallschichten ausgenutzt, um die optischen Anforderungen für eine effiziente Strahlteilung zu erreichen.

[0005] Ein wesentlicher Nachteil eines diffraktiven Designs aus metallischen Materialien ist das Vorhandensein von Absorption von Lichtenergie in dieser optischen Komponente und wirkt sich nachteilig auf die optischen Eigenschaften des diffraktiven Polarisationsstrahlteilers (DPBS) aus. Bei Anwendungen, bei denen sehr hohe Lichtintensitäten erforderlich sind, wie beispielsweise in digitalen Kinoprojektoren,

kann dies sogar zur Zerstörung des Bauelementes führen.

[0006] Darüberhinaus sind eine Vielzahl von schmalbandigen Lösungen für den sichtbaren und infraroten Spektralbereich bekannt (US 5748368, US 5914811), die nicht für Applikationen mit einer breitbandigen Weißlichtquelle geeignet sind.

[0007] Ein schmalbandiges Design eines DPBS für den infraroten Spektralbereich, welches sich die Strukturierung eines dielektrischen Vollsichtsystems mittels des Effekts der anisotropen spektralen Reflektivität (ASR) zur Polarisierungsteilung zunutze macht, wird beispielsweise in Rong-Chung Tyan, et al., „Design, fabrication, and characterization of form-birefringent multilayer polarizing beam splitter“, Journal of the Optical Society of America A, Vol.14, No.7/July 1997, p. 1627–1636 beschrieben. Hier wird ein Design aus alternierenden dielektrischen $\lambda/4$ -Doppelschichten verwendet, bei dem der Effekt der anisotropen spektralen Reflektivität eintritt und für genau eine Wellenlänge λ zu den erforderlichen optischen Eigenschaften führt. Für den Einsatz im breitbandigen, sichtbaren Spektralbereich ist das beschriebene Design ungeeignet.

Aufgabenstellung

[0008] Ausgehend von den beschriebenen Nachteilen des Standes der Technik liegt der Erfindung die Aufgabe zugrunde, einen diffraktiven Polarisationsstrahlteiler dahingehend weiter zu entwickeln, dass unter Verwendung unpolarisierten Weißlichtes (UP) eine Strahlaufteilung über den gesamten Wellenlängenbereich mit einer Effizienz von nahezu 100% und einer Winkelseparation von mehr als 90 Grad bei gleichzeitiger Verminderung von Lichtverlusten durch Absorption im Material selbst sowie durch unerwünschte Abstrahlung in andere Beugungsordnungen möglich ist.

[0009] Diese Aufgabe wird durch einen Polarisationsstrahlteiler der eingangs beschriebenen Art erfindungsgemäß dadurch gelöst, dass die einzelnen Schichten der Gitterstege aus nichtmetallischen, in ihrem optischen Verhalten verschiedenartig zusammengesetzten, dielektrischen Substanzen bestehen, wobei zweckmäßigerweise jeder Gittersteg mindestens drei (bei H-L-H oder vier bei H-L-H-L) Schichten aufweist, die gleiche oder unterschiedliche Schichtdicken zwischen 0,1 nm und 300 nm besitzen und die Gesamthöhe der Struktur der Gitterstege dabei in einem Bereich von 0,3 nm bis 30 μm liegt.

[0010] Die Schichten der Gitterstege bestehen dabei aus einer Kombination von verschiedenartig hochbrechenden Substanzen (H) und verschiedenartig niedrigbrechenden Substanzen (L), wobei die Reihenfolge alternierend (H1-L1-H1-L1 ...) oder nicht al-

ternierend (H1-L1-H2-L2 ... oder H1-H2-L1-L2 ...) ist.

[0011] Bedingt durch die Verwendung reiner dielektrischer Schichten, die sowohl in ihrer Abfolge bezüglich des reflektiven Verhaltens als auch in ihrer Höhe variierbar sind lassen sich Strukturprofile in Abhängigkeit vom Verwendungszweck optimieren. Die Vermeidung von metallischen Substanzen ermöglicht den Einsatz auch bei höheren Lichtintensitäten ohne dass der DPBS zerstört wird. Absorptionsverluste, die gerade bei Verwendung metallischer Substanzen auftreten werden weitestgehend vermieden, was wiederum zu einer Verbesserung der Effizienz gegenüber den Lösungen des Standes der Technik führt.

[0012] Darüberhinaus wird der Kontrast, insbesondere im blauen Spektralbereich, in dem metallische Substanzen stärker absorbieren, wesentlich verbessert.

[0013] Im Gegensatz zu den bisher bekannten Designs wird von einem für beide Polarisationszustände hochreflektierenden Vielschichtsystem (HR) ausgegangen (bis etwa 40 Schichten), das zunächst unstrukturiert ist. Es wird derart predesignt, dass die spektralen Eigenschaften, wie Breitbandigkeit und Wellenlängenbereich, ausreichend erfüllt sind. Anschließend wird das Schichtsystem entsprechend strukturiert.

[0014] Durch die Strukturierung wird der allgemein bekannte Effekt der Formdoppelbrechung ausgenutzt, um für die TE-Polarisation (s-Polarisation) eine hochreflektierende Struktur und die TM-Polarisation (p-Polarisation) eine antireflektierende Struktur zu erzeugen.

[0015] Vorteilhafterweise bestehen die hochbrechenden Substanzen (H) aus TiO₂ und/oder Ta₂O₅ und/oder HfO₂ und/oder Al₂O₃ und/oder Nb₂O₅ und/oder ZnS und/oder LaF₃ oder weitere Lanthanoidfluoride und die die niedrig brechenden Substanzen (L) aus SiO₂ und/oder MgF₂ und/oder Chiolith und/oder Kryolith und/oder AL₂O₃.

[0016] Zur Erreichung einer sehr hohen Breitbandigkeit erweist es sich als günstig, wenn die Schichtdicken der verschiedenartigen Schichten der Gitterstege zueinander kein ganzzahliges Verhältnis bilden.

[0017] Üblicherweise hat der Polarisationsstrahlteiler einen rechteckförmigen Querschnitt (lamellares Profil, wobei der Einfallswinkel θ des unpolarisierten Lichtes zur senkrecht auf dem Träger stehenden Ebene zwischen 30 und 60 Grad variierbar sein sollte.

[0018] Es sind jedoch auch trapezförmige Quer-

schnittsformen der Gitterstege denkbar.

[0019] Als vorteilhaft hat sich gezeigt, einen Einfallswinkel θ von 45 Grad zu wählen, um gerade bei einem lamellaren Profil eine Trennung der beiden Polarisatoren in Transmission und Reflexion zu realisieren.

[0020] In Abhängigkeit vom Anwendungsfall kann es sich ferner als günstig erweisen, wenn das Trägersubstrat, welches unstrukturiert ist, zusätzlich eine antireflektierende Schicht (AR) aufweist.

[0021] Hierdurch wird der durch Fresnel-Reflexion an der Substratoberfläche reflektierte Anteil der TM-Polarisation reduziert und damit der Kontrast in Reflexion erhöht.

[0022] Um die Strahlteilung unter anderen Einfallswinkeln zu optimieren oder eine Trennung der beiden Polarisatoren entweder nur in Transmission oder nur in Reflexion zu erhalten, besteht eine erfindungsgemäße Ausgestaltung ferner darin, die Gitterstege so anzuordnen, dass ihr Querschnitt die Form eines Parallelogramms (schiefwinkliges Profil) besitzt, wobei die Schichten parallel zur Oberfläche des Trägersubstrates liegen und die Seitenflächen zur senkrecht auf der Oberfläche des Trägersubstrates stehenden Ebene einen Winkel α , der bis zu 45 Grad beträgt, einschließen. Die Unterätzung kann dabei geringfügig mit dem linken Fußpunkt der Gitterstege überlappen. Dies ist aber nicht zwingend erforderlich.

[0023] Von Vorteil ist es ferner, wenn die Gitterperiode in einem Bereich von 50 bis 200 nm liegt und der Füllfaktor von 0,1 bis 0,9 gewählt wird.

Ausführungsbeispiel

[0024] Nachfolgend soll die Erfindung beispielhaft näher erläutert werden. Es zeigen:

[0025] Fig. 1: eine schematische Darstellung des Polarisationsstrahlteilers (lamellenförmig) mit zwei Gitterstegen,

[0026] Fig. 2: eine schematische Darstellung des Polarisationsstrahlteilers (schiefwinklig) mit zwei Gitterstegen,

[0027] Fig. 3: eine Darstellung der Effizienzen der transmittierten (tTE) und reflektierten (rTE) Lichtwelle für die TE-Polarisation (s-Polarisation),

[0028] Fig. 4: eine Darstellung der Effizienzen der transmittierten (tTM) und reflektierten (rTM) Lichtwelle für die TM-Polarisation (p-Polarisation) und

[0029] Fig. 5: eine Kontrastdarstellung in Transmission (T) und in Reflexion (R)

[0030] Fig. 1 zeigt den erfindungsgemäßen Polarisationsstrahlteiler mit einem Trägersubstrat **1**, auf welchem ein Array von Gitterstegen (Lamellen) mit einer Gitterperiode $GP = 140$ nm und einem Füllfaktor von 0,5 aufgebracht ist und von denen zwei Gitterstege **2** und **3** dargestellt sind. Die Gitterstege **2** und **3** bestehen aus einer Kombination von hochbrechenden Schichten H und niedrigbrechenden Schichten L, wobei für die hochbrechenden Schichten H TiO_2 und für die niedrigbrechenden Schichten L SiO_2 gewählt wurde. Die jeweiligen Schichtdicken sind unterschiedlich, wobei die kleinste Schichtdicke 51 nm und die größte Schichtdicke 183 nm ist. Sie stehen in keinem ganzzahligen Verhältnis zueinander. Im vorliegenden Ausführungsbeispiel beträgt die Gesamthöhe der dielektrischen Schichten $3,679$ μm . Das Trägersubstrat **1** ist zum Zwecke der Anwendung des Polarisationsstrahlteilers im Spektralbereich von 300 bis 400 nm zusätzlich mit einer antireflektierenden Schicht AR versehen.

[0031] Das von einer nicht näher dargestellten Lichtquelle ausgehende unpolarisierte Licht UP trifft unter einem Winkel θ von 45 Grad zur senkrecht auf der Trägersubstrat **1** liegenden Ebene **4** auf die Gitterstege **2** und **3** sowie auf die Trägersubstrat **1** auf und wird dabei in eine durch das Trägersubstrat **1** transmittierte p-polarisierte Komponente TM und in eine reflektierte s-polarisierte Komponente TE aufgespalten.

[0032] Durch die Strukturierung der Gitterstege **2** und **3** wird der Effekt der Formdoppelbrechung ausgenutzt, um für die s-Polarisation (TE) eine hochreflektierende Struktur und für die p-Polarisation (TM) eine antireflektierende Struktur zu erzeugen.

[0033] Fig. 2 zeigt einen schiefwinkligen Polarisationsstrahlteiler, bei welchen die Gitterstege **2** und **3** mit der Ebene **4** einem Winkel α von 20 Grad einschließen. Diese Anordnung ermöglicht eine Strahlteilung des unpolarisierten Lichtes UP unter anderen Einfallswinkeln. Ferner wird durch die Schiefwinkligkeit eine Trennung der Polarisierungen in entweder nur Transmission TM oder in nur Reflexion TE möglich. Eine mögliche Unterätzung kann dabei geringfügig den Fußpunkt **5** überlappen, muß sie aber nicht. Die Überlappung wird in Fig. 2 unter dem Bezugszeichen **6** dargestellt.

[0034] Die erfindungsgemäße Anordnung der Schichten H und L ist für einen Wellenlängenbereich von 400 bis 700 nm, also breitbandig einsetzbar, wobei Beugungseffizienzen rTE und tTM von > 95 für das Nutzlicht (Fig. 3 und 4 obere Kurve) und ein hoher Kontrast von Nutzlicht zu Falschlicht als Effizienzen rTM und tTE (Fig. 3 und 4 untere Kurve) erzielt werden.

[0035] Der Kontrast in Reflexion ist dabei definiert

als

$$VR = \text{Effizienz}_{rTE} / \text{Effizienz}_{rTM}$$

während der Kontrast in Transmission durch die Beziehung

$$VT = \text{Effizienz}_{tTM} / \text{Effizienz}_{tTE}$$

[0036] Fig. 5 zeigt die Darstellung von Kontrasten in Transmission T sowie in Reflexion R. Daraus ist ersichtlich, dass der Kontrast im sichtbaren Spektralbereich und in Reflexion und Transmission sehr breitbandig und, vor allem im blauen Spektralbereich, nahezu gleich groß ist, was für die Anwendung, beispielsweise in der digitalen Projektion von erheblichem Vorteil für die Bildgebung ist.

Bezugszeichenliste

1	Trägersubstrat
2, 3	Gittersteg
4	Ebene
5	Fußpunkt
6	Überlappung
GP	Gitterperiode
UP	unpolarisiertes Licht
H	hochbrechende Schicht
L	niedrigbrechende Schicht
AR	antireflektierende Schicht
TM	p-polarisierte Komponente
TE	s-polarisierte Komponente
rTE, tTE, rTM, tTM	Effizienzen
θ, α	Winkel

Patentansprüche

1. Polarisationsstrahlteiler, bevorzugt zur Anwendung in der Mikroskopie oder in Projektionssystemen über einen breitbandigen Spektralbereich von 400 bis 700 nm sowie für Anwendungen in der UV-Lithografie im Wellenlängenbereich von 150 bis 400 nm, umfassend ein aus einem optisch transparentem Material bestehenden Trägersubstrat (**1**), auf dessen Oberfläche ein Array von parallel zueinander verlaufenden Gitterstegen (**2, 3**) aufgebracht ist, wobei die Gitterstege (**2, 3**) aus Vielschichtsystemen bestehen und das unter einem Einfallswinkel θ auf die Gitterstege (**2, 3**) und das Trägersubstrat (**1**) auftretende unpolarisierte Licht (UP) in einen reflektiven (rTE oder rTM) und einen transmissiven (tTM oder tTE) Polarisationsstrahlengang geteilt wird, **dadurch gekennzeichnet**, dass die einzelnen Schichten (H, L) der Gitterstege (**2, 3**) aus nichtmetallischen, in ihrem optischen Verhalten verschiedenartig zusammengesetzten, dielektrischen Substanzen bestehen.

2. Polarisationsstrahlteiler nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass jeder Gittersteg (**2, 3**) mindestens drei Schichten (H, L) aufweist, die glei-

che oder unterschiedliche Schichtdicken zwischen 0,1 nm und 400 nm besitzen.

3. Polarisationsstrahlteiler nach den Ansprüchen 1 bis 2, dadurch gekennzeichnet, dass die Gesamthöhe der der Struktur der Gitterstege (**2, 3**) 0,3 nm bis 30 μm ist.

4. Polarisationsstrahlteiler nach den Ansprüchen 1 bis 3, dadurch gekennzeichnet, dass die Schichtsysteme (H, L) in den Gitterstegen (**2, 3**) aus einer Kombination von verschiedenartig hochbrechenden Substanzen (H) und verschiedenartig niedrigbrechenden Substanzen (L) aufgebaut sind, wobei die Reihenfolge alternierend (H1-L1-H1-L1 ...) oder nicht alternierend (H1-L1-H2-L2 ... oder H1-H2-L1-L2 ...) ist.

5. Polarisationsstrahlteiler nach Anspruch 4, dadurch gekennzeichnet, dass die hochbrechenden Substanzen (H) aus TiO_2 und/oder Ta_2O_5 und/oder HfO_2 und/oder Al_2O_3 und/oder Nb_2O_5 und/oder ZnS und/oder LaF_3 oder weitere Lanthanoidfluoride und die die niedrig brechenden Substanzen (L) aus SiO_2 und/oder MgF_2 und/oder Chiolith und/oder Kryolith und/oder Al_2O_3 bestehen.

6. Polarisationsstrahlteiler nach den Ansprüchen 1 bis 5, dadurch gekennzeichnet, dass die Schichtdicken der verschiedenartigen Schichten (H, L) der Gitterstege (**2, 3**) in einem Gittersteg (**2, 3**) zueinander kein ganzzahliges Verhältnis bilden.

7. Polarisationsstrahlteiler nach den Ansprüchen 1 bis 6, dadurch gekennzeichnet, dass der Querschnitt der Gitterstege (**2, 3**) rechteckförmig ist.

8. Polarisationsstrahlteiler nach den Ansprüchen 1 bis 6, dadurch gekennzeichnet, dass der Querschnitt der Gitterstege (**2, 3**) ein Parallelogramm ist, wobei die Schichten (H, L) parallel zur Oberfläche des Trägersubstrates (**1**) liegen und die Seitenflächen zur senkrecht auf der Oberfläche des Trägersubstrates (**1**) stehenden Ebene (**4**) einen Winkel α einschließen.

9. Polarisationsstrahlteiler nach Anspruch 8, dadurch gekennzeichnet, dass der Winkel α zwischen 0 und 45 Grad liegt.

10. Polarisationsstrahlteiler nach den Ansprüchen 1 bis 6, dadurch gekennzeichnet, dass die Gitterstege (**2, 3**) in ihrem Querschnitt trapezförmig gestaltet sind, wobei die Schichten (H, L) parallel zur Oberfläche des Trägersubstrates (**1**) liegen.

11. Polarisationsstrahlteiler nach einem der vorgenannten Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass der Einfallswinkel θ des unpolarisierten Lichtes zur senkrecht auf dem Trägersubstrat (**1**) stehenden

Ebene (**4**) zwischen 30 und 60 Grad variierbar ist.

12. Polarisationsstrahlteiler nach Anspruch 11, dadurch gekennzeichnet, dass der Einfallswinkel $\theta = 45$ Grad ist.

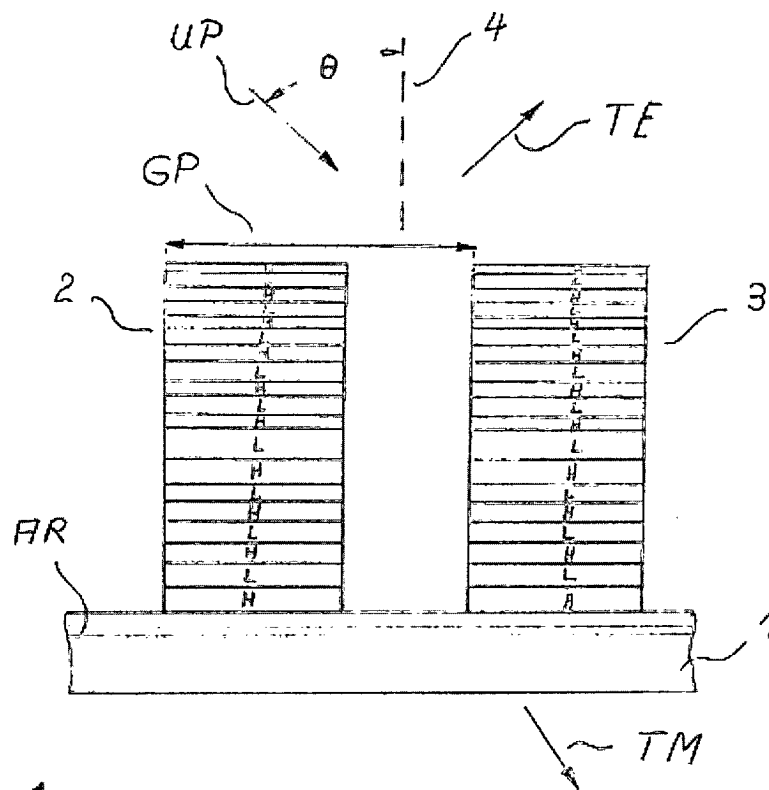
13. Polarisationsstrahlteiler nach einem der vorgenannten Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass die Gitterperiode (GP) in einem Bereich von 50 bis 300 nm bei einem Füllfaktor von 0,1 bis 0,9 liegt.

14. Polarisationsstrahlteiler nach einem der vorgenannten Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass das Trägersubstrat (**1**) unstrukturiert ist und eine antireflektierende Schicht (AR) aufweist.

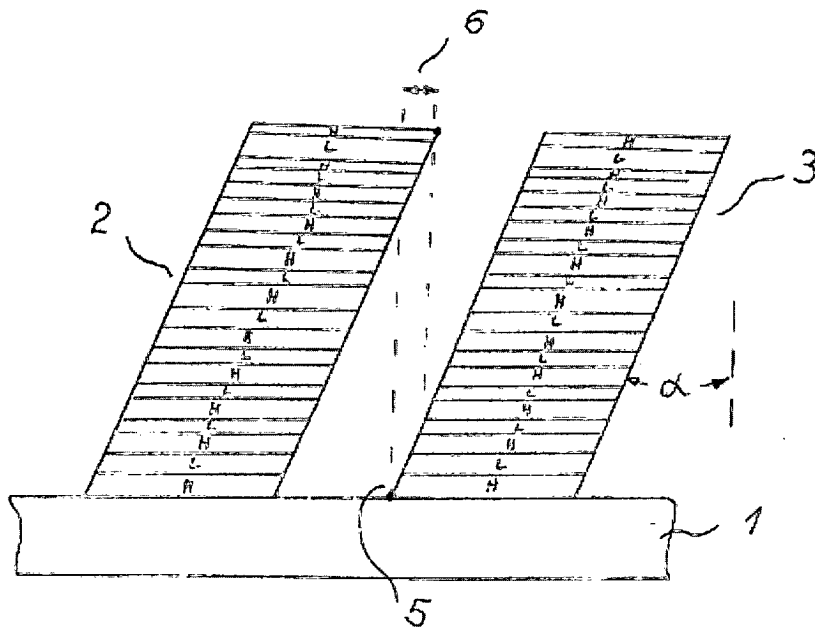
15. Polarisationsstrahlteiler nach den Ansprüchen 8 und 9, dadurch gekennzeichnet, dass die Gitterstege (**2, 3**) unterätzt sind, wobei die Oberkante eines Gittersteges (**1**) geringfügig (**6**) den Fußpunkt (**5**) des benachbarten Gittersteges (**2**) überlappt.

Es folgen 3 Blatt Zeichnungen

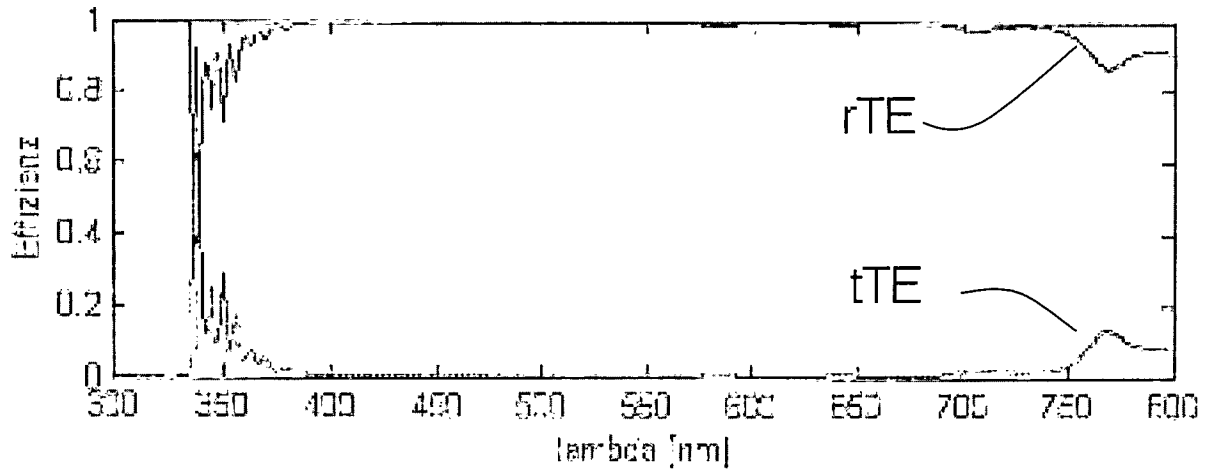
Anhängende Zeichnungen



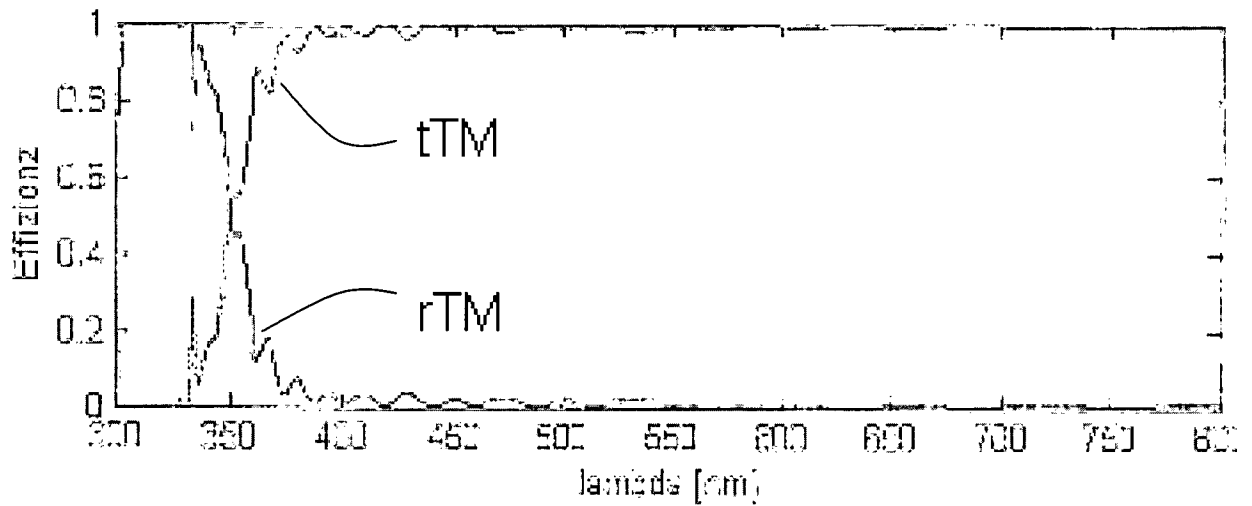
Figur 1



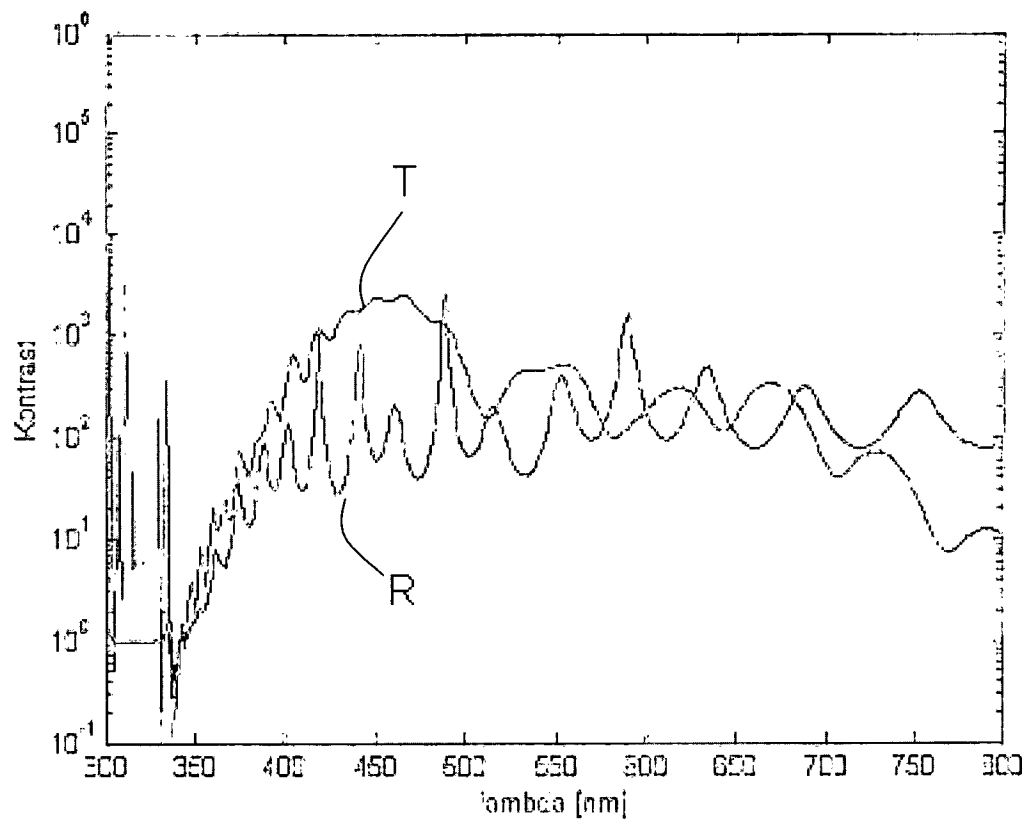
Figur 2



Figur 3



Figur 4



Figur 5