

(12) NACH DEM VERTRAG ÜBER DIE INTERNATIONALE ZUSAMMENARBEIT AUF DEM GEBIET DES PATENTWESENS (PCT) VERÖFFENTLICHTE INTERNATIONALE ANMELDUNG

(19) Weltorganisation für geistiges Eigentum  
Internationales Büro



(43) Internationales Veröffentlichungsdatum  
22. Januar 2009 (22.01.2009)

PCT

(10) Internationale Veröffentlichungsnummer  
**WO 2009/010043 A2**

(51) Internationale Patentklassifikation:

**Nicht klassifiziert**

(21) Internationales Aktenzeichen: PCT/DE2008/001136

(22) Internationales Anmeldedatum:  
14. Juli 2008 (14.07.2008)

(25) Einreichungssprache: Deutsch

(26) Veröffentlichungssprache: Deutsch

(30) Angaben zur Priorität:  
10 2007 033 567.0 19. Juli 2007 (19.07.2007) DE

(71) Anmelder (für alle Bestimmungsstaaten mit Ausnahme von US): **TRUMPF LASER- UND SYSTEMTECHNIK GMBH** [DE/DE]; Johann-Maus-Strasse 2, 71254 Ditzingen (DE).

(72) Erfinder; und

(75) Erfinder/Anmelder (nur für US): **SCHULZ, Joachim** [DE/DE]; Christophstrasse 37, 70839 Gerlingen (DE).  
**VOSS, Andreas** [DE/DE]; Hopfauer Strasse 15, 70563

Stuttgart (DE). **MARWAN, Abdou, Ahmed** [DE/DE]; Buchenländer Str. 14, 70569 Stuttgart (DE).

(74) **Anwalt: KOHLER SCHMID MÖBUS**; Ruppmannstr. 27, 70565 Stuttgart (DE).

(81) **Bestimmungsstaaten** (soweit nicht anders angegeben, für jede verfügbare nationale Schutzrechtsart): AE, AG, AL, AM, AO, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BH, BR, BW, BY, BZ, CA, CH, CN, CO, CR, CU, CZ, DK, DM, DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IS, JP, KE, KG, KM, KN, KP, KR, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LT, LU, LY, MA, MD, ME, MG, MK, MN, MW, MX, MY, MZ, NA, NG, NI, NO, NZ, OM, PG, PH, PL, PT, RO, RS, RU, SC, SD, SE, SG, SK, SL, SM, ST, SV, SY, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, ZA, ZM, ZW.

(84) **Bestimmungsstaaten** (soweit nicht anders angegeben, für jede verfügbare regionale Schutzrechtsart): ARIPO (BW, GH, GM, KE, LS, MW, MZ, NA, SD, SL, SZ, TZ, UG,

[Fortsetzung auf der nächsten Seite]

(54) **Title:** PHASE SHIFTING DEVICE, AND LASER RESONATOR FOR GENERATING RADIALY OR AZIMUTHALLY POLARIZED LASER RADIATION

(54) **Bezeichnung:** PHASENSCHIEBE-EINRICHTUNG UND LASERRESONATOR ZUR ERZEUGUNG RADIAL ODER AZIMUTAL POLARISIERTER LASERSTRAHLUNG

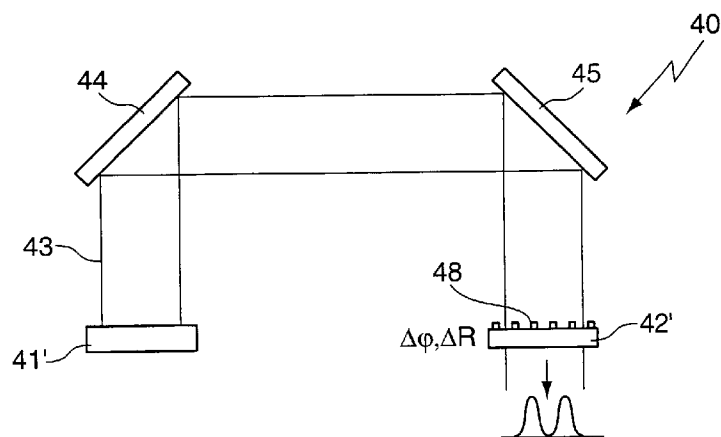


Fig. 5b

(57) **Abstract:** The invention relates to a phase shifting device (42') for stabilizing radially or azimuthally polarized laser radiation within a laser resonator (40') that comprises a polarizer device (42') for generating radially or azimuthally polarized laser radiation (3a, 3b). The phase shifting device (42') is designed to generate a phase difference ( $\Delta\phi$ ) ranging from about 30° to about 330°, preferably from about 70° to about 290°, especially preferably from about 160° to about 200°, particularly a phase difference ( $\Delta\phi$ ) of about 180° per revolution in the laser resonator (40') while having an axial symmetry. The invention further relates to a laser resonator (40') comprising such a phase shifting device (42').

[Fortsetzung auf der nächsten Seite]

WO 2009/010043 A2



ZM, ZW), eurasisches (AM, AZ, BY, KG, KZ, MD, RU, TJ, TM), europäisches (AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HR, HU, IE, IS, IT, LT, LU, LV, MC, MT, NL, NO, PL, PT, RO, SE, SI, SK, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, ML, MR, NE, SN, TD, TG).

**Veröffentlicht:**

— *ohne internationalen Recherchenbericht und erneut zu veröffentlichen nach Erhalt des Berichts*

---

**(57) Zusammenfassung:** Die Erfindung betrifft eine Phasenschiebe-Einrichtung (42') zur Stabilisierung radial oder azimuthal polarisierter Laserstrahlung innerhalb eines Laserresonators (40'), wobei der Laserresonator (40') eine Polarisator-Einrichtung (42') zur Erzeugung radial oder azimuthal polarisierter Laserstrahlung (3a, 3b) umfasst. Die Phasenschiebe-Einrichtung (42') ist derart ausgebildet, dass sie pro Umlauf im Laserresonator (40') eine Phasendifferenz ( $\Delta\phi$ ) zwischen ca. 30° und ca. 330°, bevorzugt zwischen ca. 70° und ca. 290°, besonders bevorzugt zwischen ca. 160° und ca. 200°, insbesondere von ca. 180° zwischen der radialen und der azimuthalen Polarisationsrichtung der Laserstrahlung erzeugt und eine axiale Symmetrie aufweist. Die Erfindung betrifft weiterhin einen Laserresonator (40') mit einer solchen Phasenschiebe-Einrichtung (42').

5

10

15

20

Phasenschiebe-Einrichtung und Laserresonator zur Erzeugung radial oder azimuthal polarisierter Laserstrahlung

25

Die vorliegende Erfindung betrifft eine Phasenschiebe-Einrichtung zur Stabilisierung radial oder azimuthal polarisierter Laserstrahlung innerhalb eines Laserresonators, wobei der Laserresonator eine Polarisator-Einrichtung zur Erzeugung radial oder azimuthal polarisierter Laserstrahlung umfasst. Sie betrifft weiterhin einen  
30 Laserresonator zur Erzeugung und Stabilisierung radial oder azimuthal polarisierter Laserstrahlung mit einer Polarisator-Einrichtung zur Erzeugung radial oder azimuthal polarisierter Laserstrahlung.

Eine Laserresonator mit einer Polarisator-Einrichtung zur Erzeugung radial oder azimuthal polarisierter Laserstrahlung ist durch den Artikel „Optical Elements of a Laser Cavity for the Production of a Beam with Axially Symmetric Polarization“ von Goncharskii et al., Optics and Spectroscopy Vol. 89, Nr.1, 2000, Seiten 146-149, bekannt geworden. In dem Artikel werden axial symmetrische Gitter als Polarisator-Einrichtungen zur Erzeugung radial und/oder azimuthal polarisierter Laserstrahlung in einem Laserresonator beschrieben, wobei zwischen zwei Gittertypen unterschieden wird: Beim ersten, sternförmigen Gittertyp verlaufen die Gitterlinien ausgehend von einem gemeinsamen Mittelpunkt radial nach außen, so dass der Abstand zwischen zwei benachbarten Gitterlinien und damit die Gitterperiode mit zunehmendem Abstand vom Mittelpunkt anwächst. Dies führt dazu, dass radial polarisierte Laserstrahlung bei diesem Gittertyp nur mit einem Anteil an falsch polarisierter Strahlung erhalten werden kann. Beim zweiten, konzentrischen Gittertyp verlaufen die Gitterlinien ringförmig, so dass das Gitter über den gesamten radialen Bereich eine konstante Gitterperiode aufweist.

Die Erzeugung radial oder azimuthal polarisierter Laserstrahlung in einem Laserresonator kann daneben auch durch Polarisator-Einrichtungen wie bspw. in der US 6,680,799 B1, der DE 10 2004 042 748 A1 oder der US 6,191,890 B1 beschrieben ausgeführt sein, welche bezüglich dieses Aspekts durch Bezugnahme zum Inhalt dieser Anmeldung gemacht werden. Es versteht sich, dass hierbei jeweils die Reflexionsgraddifferenz zwischen radial und azimuthal polarisierter Laserstrahlung pro Umlauf im Laserresonator größer als die Depolarisation für radial/azimuthal polarisierte Strahlung pro Umlauf im Laserresonator gewählt werden muss. Unter Depolarisation versteht man hierbei den Leistungsanteil in der unerwünschten Polarisationsrichtung (z.B. azimuthaler Polarisation) im Verhältnis zur gesamten Leistung.

Aus der US 6,680,799 B1 ist ein Sub-Wellenlängen-Gitter zur Erzeugung radial polarisierter Strahlung bekannt, dessen Gitterperiode kleiner als die Wellenlänge der einfallenden Laserstrahlung ist. Das Sub-Wellenlängen-Gitter ist in einer Ausführungsform auf ein dielektrisches Mehrschichtsystem aufgebracht, das auf einem metallischen oder dielektrischen Substrat angeordnet ist. Die Polarisationsselektivität des Gitters ist abhängig davon, ob der Laserstrahl von der Substratseite oder der Gitterseite her einfällt: Im ersten Fall durch Einkopplung der unerwünschten

Polarisationskomponente in einen Wellenleitermode einer Deckschicht des Mehrfachsichtsystems, im zweiten Fall durch Absorption der unerwünschten Polarisationskomponente in ein metallisches Substrat oder, bei Verwendung eines dielektrischen Substrats dadurch, dass die unerwünschte Polarisationskomponente unter Winkeln, die im Bereich der Totalreflexion liegen, in Leaky-Modes in das Substrat eingekoppelt wird. Prinzipiell ist die Bandbreite der Einkopplung sehr schmal, so dass Sub-Wellenlängen-Gitter in der Regel mit engen Toleranzen zu fertigen sind.

Aus der DE 10 2004 042 748 A1 ist ein periodisches oder quasiperiodisches, konzentrisches oder spiralförmiges Beugungsgitter bekannt geworden, bei dem die Gitterperiode größer als die Laserwellenlänge ist, so dass neben der nullten Beugungsordnung auch höhere Beugungsordnungen auftreten. Die Gitterperiode und die Gitterform sind derart gewählt, dass bezüglich der Laserwellenlänge der Reflexionsgrad der TM-Komponente in die eine genutzte Beugungsordnung größer als der Reflexionsgrad der TE-Komponente in diese Beugungsordnung ist. Durch geeignete Wahl der Gitterperiode und Gitterform wird ein Teil der einfallenden Laserstrahlung nicht in die eine genutzte Beugungsordnung zurückgeworfen, sondern wird abhängig von der Polarisation, mehr oder weniger auch in andere Beugungsordnungen gelenkt. Dadurch wird ein nennenswerter Teil der TE-Polarisation aus der optischen Achse ausgebeugt, während die TM-Polarisation nur in der einen genutzten Beugungsordnung zurückreflektiert wird. Dies hat zur Folge, dass die TE-Polarisation höhere Verluste im Laserresonator erfährt.

Die US 6,191,890 B1 beschreibt eine Anordnung, bei der zwischen einem ersten und einem zweiten dielektrischen Medium eine dielektrische Schicht angebracht ist, welche eine periodische Variation der dielektrischen Eigenschaften parallel zur Schicht aufweist und deren Periodenlänge kleiner als die Wellenlänge der Laserstrahlung im zweiten dielektrischen Medium ist. Mittels dieser gitterförmigen, periodischen Struktur kann vom ersten Medium einfallende Laserstrahlung mit einem ersten Polarisationszustand mit einem hohen Reflexionsgrad in die nullte Beugungsordnung, d.h. spekulär, reflektiert werden (sog. GIRO „Giant Reflectivity to order 0“-Effekt), wohingegen Laserstrahlung mit einem zweiten Polarisationszustand nur in sehr geringem Maße reflektiert wird.

In Laserresonatoren erzeugte Laserstrahlung ist für gewöhnlich unpolarisiert oder linear polarisiert. Linear polarisierte Laserstrahlung **2** weist eine identische Ausrichtung des elektrischen Feldstärkevektors, welche im Folgenden als Polarisationsrichtung  $E_y$  bezeichnet wird, über den gesamten Strahlquerschnitt **1** auf, wie in **Fig. 1a** gezeigt ist. Die Laserstrahlung **2** hat keine Komponente des elektrischen Feldstärkevektors in einer dazu senkrechten Polarisationsrichtung  $E_x$ . Bei bestimmten Anwendungen kann es von Vorteil sein, wenn die Laserstrahlung **3a, 3b** in einem Laserresonator azimuthal oder radial polarisiert ist, wie in **Fig. 1b** und **Fig. 1c** gezeigt ist. Bei den beiden letztgenannten Polarisierungstypen ist die Laserstrahlung **3a, 3b** lokal linear polarisiert, weist aber über den Strahlquerschnitt **1** hinweg eine inhomogene Verteilung auf, d.h. die elektrischen Feldstärkevektoren  $E_\phi$ ,  $E_r$  verlaufen an jedem Punkt in azimuthaler bzw. in radialer Richtung, wobei in der Mitte des Strahlquerschnitts eine Nullstelle vorliegt und der elektrische Feldstärkevektor  $E_\phi$  bzw.  $E_r$  an dieser Stelle verschwindet.

Bei modernen  $CO_2$ -Hochleistungslasern zur Lasermaterialbearbeitung, die bspw. zum Laserschneiden oder Laserschweißen eingesetzt werden, sind mehrere Faltungsspiegel üblich, die den Strahlengang zwischen einem Endspiegel und einem Auskoppelspiegel falten. **Fig. 2** zeigt einen quadratisch gefalteten Laserresonator **4** eines  $CO_2$ -Gaslasers mit acht Entladungsstrecken. Ein teildurchlässiger Auskoppelspiegel **5** und ein hochreflektierender Endspiegel **6** begrenzen den Laserresonator **4**. Der Laserstrahl wird über acht Faltungsspiegel **7a-c, 8a-b, 9a-c** in zwei übereinander liegenden Ebenen quadratisch gefaltet, wobei vier Faltungsspiegel **7a-c, 8a** in der oberen Ebene und vier Faltungsspiegel **8b, 9a-c** in der unteren Ebene angeordnet sind. Der Laserstrahl wird vom Endspiegel **6** kommend an den ersten drei Faltungsspiegeln **7a, 7b** und **7c** in der oberen Ebene um jeweils  $90^\circ$  umgelenkt. Der Laserstrahl, der vom dritten Faltungsspiegel **7c** auf den vierten Faltungsspiegel **8a** in der oberen Ebene umgelenkt wird, wird von diesem und anschließend vom ersten Faltungsspiegel **8b** in der unteren Ebene ebenfalls um  $90^\circ$  umgelenkt, allerdings in einer dazu senkrechten Richtung, und gelangt von der oberen Ebene in die untere Ebene. Die drei weiteren Faltungsspiegel **9a, 9b** und **9c** lenken den Laserstrahl um jeweils  $90^\circ$  in der unteren Ebene um. Vom vierten Faltungsspiegel **9c** der unteren Ebene kommend trifft der Laserstrahl auf den teildurchlässigen Auskoppelspiegel **5**, an dem ein Teil des Laserstrahls aus dem Laserresonator **4** ausgekoppelt und ein

anderer Teil in sich zurück reflektiert wird. Der reflektierte Laserstrahl trifft in umgekehrter Richtung auf die acht Faltungsspiegel 7a-c, 8a-b, 9a-c und durchquert sämtliche Entladungsstrecken zwischen dem Auskoppelspiegel 5 und dem Endspiegel 6.

5

Bekannt ist, dass jeder beliebige Polarisationszustand eines Laserstrahls (z.B. radial oder azimuthal) nach Reflexion an einem optischen Element durch Überlagerung einer senkrecht und einer parallel polarisierten Komponente dargestellt werden kann. Die senkrecht polarisierte (s-polarisierte) Komponente ist senkrecht zur Einfallsebene, die durch den einfallenden und reflektierten Laserstrahl gebildet ist, ausgerichtet und die parallel polarisierte (p-polarisierte) Komponente parallel zur Einfallsebene. Optische Materialien (beschichtete und unbeschichtete Spiegel) weisen für die s- und p-polarisierten Komponenten eines Laserstrahls unterschiedliche Reflexionsgrade  $R$  in Abhängigkeit vom Einfallswinkel  $\alpha$  auf, wie in **Fig. 3a** dargestellt ist. Bei größeren Einfallswinkeln ist für gewöhnlich der Reflexionsgrad  $R$  der s-polarisierten Komponente (Kurve **S**) größer als der Reflexionsgrad  $R$  der p-polarisierten Komponente (Kurve **P**). Zusätzlich zur Reflexionsgraddifferenz bildet sich bei der Reflexion auch eine vom Einfallswinkel  $\alpha$  abhängige Phasendifferenz  $\Delta\varphi$  zwischen den senkrecht und parallel polarisierten Komponenten aus, wie in **Fig. 3b** dargestellt ist.

20

Betrachtet man den Laserresonator gemäß Fig. 2 erkennt man, dass die ersten drei Faltungsspiegel 7a-c der oberen Ebene und die letzten drei Faltungsspiegel 9a-c der unteren Ebene die gleiche Umlenkebene aufweisen (erste Umlenkebene), wohingegen die Umlenkebene der beiden übrigen Faltungsspiegel 8a und 8b senkrecht dazu ausgerichtet ist (zweite Umlenkebene). Dies führt dazu, dass die senkrecht polarisierte Komponente der ersten Umlenkebene zur parallel polarisierten Komponente der zweiten, dazu senkrechten Umlenkebene wird. Gleiches gilt für die parallel polarisierte Komponente der ersten Umlenkebene. Insgesamt erfährt ein Laserstrahl durch Umlenkung an den acht Faltungsspiegeln 7a-c, 8a-b, 9a-c eine Reflexionsgraddifferenz von  $\delta R = \delta R_{7a} + \delta R_{7b} + \delta R_{7c} - \delta R_{8a} - \delta R_{8b} + \delta R_{9a} + \delta R_{9b} + \delta R_{9c}$  (als lineare Näherung für große Reflexionsgrade  $R_i$  und kleine Reflexionsgraddifferenzen  $\delta R_i$  der Faltungsspiegel) und eine Phasendifferenz von  $\delta\varphi = \delta\varphi_{7a} + \delta\varphi_{7b} + \delta\varphi_{7c} - \delta\varphi_{8a} - \delta\varphi_{8b} + \delta\varphi_{9a} + \delta\varphi_{9b} + \delta\varphi_{9c}$  zwischen den senkrecht und parallel zur Einfallsebene polari-

30

sierten Komponenten, die sich aus den Reflexionsgraddifferenzen  $\delta R_i$  und Phasendifferenzen  $\delta\phi_i$  der Faltungsspiegel 7a-c, 8a-b, 9a-c ergeben.

Als Faltungsspiegel für CO<sub>2</sub>-Hochleistungslaser werden in der Regel Silizium- oder Kupfer-Spiegel mit einer hochreflektierenden metallbasierenden Beschichtung, sogenannte MMR-Spiegel (MMR=Maximum Metal Reflector), oder Spiegel mit einer hart-versiegelten Silber- oder Goldbeschichtung verwendet. MMR-Spiegel weisen eine dielektrische Beschichtung auf und erzeugen Reflexionsgrade  $> 99,7\%$  bei 10,6  $\mu\text{m}$ . Herstellungsbedingte Ungenauigkeiten bspw. in der Schichtdicke oder in den Brechungsindices der einzelnen Schichten führen dazu, dass jeder Faltungsspiegel individuelle Reflexionsgrad- und Phasendifferenzen  $\delta R_i$ ,  $\delta\phi_i$  zwischen den s- und p-polarisierten Komponenten des Laserstrahls aufweist. Der Optikhersteller II-VI gibt für seine Faltungsspiegel Toleranzen für die Reflexionsgraddifferenz von 0,2 % und für die Phasendifferenz  $< 2^\circ$  an. Eine Messung der Reflexionsgrad- und Phasendifferenzen einer Mehrzahl von Faltungsspiegel hat ergeben, dass typische Faltungsspiegel für CO<sub>2</sub>-Hochleistungslaser bei einer Reflexion unter einem Einfallswinkel von  $45^\circ$  eine Reflexionsgraddifferenz  $\delta R_i$  von ungefähr 0,2 % und eine Phasendifferenz  $\delta\phi_i$  von ungefähr  $1^\circ$  zwischen den senkrecht und parallel polarisierten Komponenten des Laserstrahls pro Faltungsspiegel aufweisen. Die Herstellung von Faltungsspiegeln mit engeren Fertigungstoleranzen würde einen erheblichen Mehraufwand bei den Herstellungskosten bedeuten.

Untersuchungen an gefalteten Laserresonatoren, wie dem Laserresonator in Fig. 2, haben gezeigt, dass ein im Laserresonator erzeugter, radial oder azimuthal polarisierter Laserstrahl instabil werden kann und die Polarisation von radial oder azimuthal in lineare, elliptische oder eine undefinierte Polarisation wechseln kann. Die Erfinder haben erkannt, dass die Ursache für diese instabile radiale oder azimuthale Polarisation in der Phasendifferenz  $\delta\phi$  zwischen den senkrecht und parallel zur Einfallsebene polarisierten Komponenten des Laserstrahls liegt, die nach Reflexion an konventionellen Faltungsspiegeln oder Strahlteilern im Laserresonator auftritt. Die Phasendifferenz  $\delta\phi$  zwischen den s- und p-polarisierten Laserstrahlkomponenten kann dazu führen, dass ein anderer als der gewünschte radiale oder azimuthale Polarisationszustand die Randbedingungen des Laserresonators besser erfüllt und

sich im Laserresonator einstellt, so dass die radiale oder azimutale Polarisation zerstört wird.

Wenn die Reflexionsgrad- und Phasendifferenzen der Faltungsspiegel bekannt sind,  
5 kann bei der Auswahl der Faltungsspiegel für einen Laserresonator darauf geachtet werden, dass sich die Reflexionsgrad- und Phasendifferenzen  $\delta R_i$ ,  $\delta \varphi_i$  der einzelnen Faltungsspiegel möglichst ausgleichen und nicht verstärken, d.h. die Faltungsspiegel werden so ausgewählt und im Laserresonator angeordnet, dass die Summen der Reflexionsgrad- und Phasendifferenzen  $\delta R$ ,  $\delta \varphi$  möglichst klein sind. Allerdings  
10 entsteht ein zusätzlicher Aufwand durch die Messung der Reflexionsgrad- und Phasendifferenzen sowie die Selektion und Paarung der Faltungsspiegel.

Das Problem der auftretenden Phasendifferenzen zwischen den senkrecht und parallel polarisierten Komponenten des Laserstrahls kann weder durch genauere  
15 Herstellungsverfahren noch durch die Selektion und Paarung der Faltungsspiegel vollständig gelöst werden. Bei den Faltungsspiegeln treten wie bei allen optischen Elementen Alterungseffekte auf, die dazu führen, dass sich die Reflexionsgrad- und Phasendifferenzen  $\delta R_i$ ,  $\delta \varphi_i$  der einzelnen Faltungsspiegel während der Lebenszeit eines Faltungsspiegels verändern. Außerdem sind die Reflexionsgrad- und  
20 Phasendifferenzen  $\delta R_i$ ,  $\delta \varphi_i$  temperaturabhängig, so dass sich die Werte durch die Absorption von Laserstrahlung im Faltungsspiegel verändern.

#### Aufgabe der Erfindung

25 Es ist die Aufgabe der vorliegenden Erfindung, eine Phasenschiebe-Einrichtung und einen Laserresonator der eingangs genannten Art dahingehend weiterzubilden, dass die im Laserresonator erzeugte radial oder azimutal polarisierte Laserstrahlung stabilisiert und besser in ihrer Orientierung kontrolliert werden kann.

#### 30 Gegenstand der Erfindung

Diese Aufgabe wird erfindungsgemäß gelöst durch eine Phasenschiebe-Einrichtung der eingangs genannten Art, welche derart ausgebildet ist, dass sie pro Umlauf im Laserresonator eine Phasendifferenz zwischen ca.  $30^\circ$  und ca.  $330^\circ$ , bevorzugt

zwischen ca.  $70^\circ$  und ca.  $290^\circ$ , besonders bevorzugt zwischen ca.  $160^\circ$  und ca.  $200^\circ$ , insbesondere von ca.  $180^\circ$  zwischen der radialen und der azimuthalen Polarisationsrichtung der Laserstrahlung erzeugt und eine axiale Symmetrie aufweist.

5 Die Erfinder haben erkannt, dass radial oder azimuthal polarisierte Laserstrahlung im Laserresonator durch das Vorsehen einer Einrichtung zur Erzeugung einer Phasendifferenz zwischen der radialen und azimuthalen Polarisationsrichtung besser kontrolliert werden kann, insbesondere wenn zusätzliche phasenschiebende optische Elemente wie z.B. Faltungsspiegel oder Strahlteiler im Laserresonator angeordnet  
10 sind. Weil die unerwünschte Phasendifferenz in der Regel an nicht-axialsymmetrischen optischen Elementen wie den planaren Faltungsspiegeln erzeugt wird, ist zur Kompensation dieser unerwünschten Phasendifferenz eine Phasenschiebe-Einrichtung von Vorteil, welche die gewünschte axiale Symmetrie aufweist. Die Phasenschiebe-Einrichtung wird hierbei so ausgelegt, dass die über den gesamten Strahlquerschnitt auftretende, lokal entsprechend der Symmetrie der Faltungsspiegel  
15 variierende, unerwünschte Phasendifferenz durch eine betragsmäßig große, axialsymmetrisch verteilte Phasendifferenz überboten wird. Diese Phasendifferenz kann über das gesamte Feld der Laserstrahlung konstant sein oder in den oben angegebenen Grenzen radial oder azimuthal über das Feld variieren. Eine über das  
20 gesamte Feld konstante Phasendifferenz von ca.  $180^\circ$  hat sich hierbei als besonders vorteilhaft erwiesen.

Bei einer vorteilhaften Ausführungsform ist die Phasenschiebe-Einrichtung als Gitter ausgebildet, wobei die Gitterperiode und bevorzugt auch die Gitterform derart  
25 gewählt sind, dass das Gitter die gewünschte Phasendifferenz zwischen radialer und azimuthaler Polarisationsrichtung erzeugt. Das axial symmetrische Gitter kann hierbei zusätzlich auch als Polarisator-Einrichtung dienen und zwischen der radialen und azimuthalen Polarisationsrichtung eine Reflexionsgraddifferenz oder eine Transmissionsgraddifferenz erzeugen, je nachdem, ob das Gitter als reflektierendes oder als  
30 transmissives optisches Element ausgebildet ist.

Bei einer bevorzugten Ausführungsform ist die Phasenschiebe-Einrichtung als transmissives optisches Element ausgebildet. Ein solches optisches Element kann innerhalb des Laserresonators bspw. zwischen einem Auskoppelspiegel und einem

Endspiegel angeordnet werden und wird von der Laserstrahlung bei einem Umlauf im Laserresonator zweimal durchlaufen, so dass dieses gegenüber einer Phasenschiebe-Einrichtung, welche als reflektierendes optisches Element ausgebildet ist, nur die halbe Phasendifferenz erzeugen muss.

5

Bei einer besonders vorteilhaften Weiterbildung ist das transmissive optische Element als form-doppelbrechendes Element ausgebildet. Durch geeignete Mikrostrukturierung von transparenten, optisch isotropen Materialien (z.B. GaAs für Infrarotanwendungen) mit einer Periodizität, die in mindestens einer Dimension deutlich unter der benutzten Laserwellenlänge liegt, kann auf der Basis der Form-Doppelbrechung ein transmissives optisches Element hergestellt werden, dessen optische Verzögerung zwischen „schneller“ und „langsamer“ Polarisationsrichtung und dessen lokale Orientierung der Polarisationsachsen durch die Art der Mikrostrukturierung (z.B. Form und Orientierung der Einzelstrukturen) in geeigneter Weise gesteuert werden kann, um eine radial/azimutal (bzw. radialsymmetrisch)-doppelbrechende Verzögerungsplatte (vorzugsweise mit ca. 90° Phasendifferenz im Einfachdurchgang) zu erzeugen. Hierbei ist nicht zwingend erforderlich, dass die Mikrostrukturen ein Gitter ausbilden, vielmehr können auch Mikrostrukturen verwendet werden, bei denen lokal Strukturen vorgesehen sind, welche auf makroskopischer Ebene nicht zusammenhängen. Form-doppelbrechende Gitter als Phasenschiebe-Einrichtung sind z.B. in folgenden Veröffentlichungen beschrieben: „Broadband form birefringent quarter-wave plate for the mid-infrared wavelength region“: Gregory P. Nordin and Panfilo C. Deguzman (11 October 1999 / Vol. 5, No. 8 / OPTICS EXPRESS 163), sowie „Form-birefringence structure fabrication in GaAs by use of SU-8 as a dry-etching mask“: Lin Pang, Maziar Nezhad, Uriel Levy, Chia-Ho Tsai, and Yeshaiahu Fainman (APPLIED OPTICS / Vol. 44, No. 12 / 20 April 2005), welche bezüglich dieses Aspekts durch Bezugnahme zum Inhalt dieser Anmeldung gemacht werden.

30 Bei einer vorteilhaften Ausführungsform ist die Phasenschiebe-Einrichtung als reflektierendes optisches Element ausgebildet. Bevorzugt ist das reflektierende optische Element als Endspiegel oder als Auskoppelspiegel ausgebildet. Diese optischen Elemente können zusätzlich auch als Polarisator-Einrichtung ausgebildet sein und daher neben der gewünschten Phasendifferenz auch eine Reflexionsgraddifferenz

erzeugen, durch den die radial oder azimuthal polarisierte Laserstrahlung in dem Laserresonator erzeugt wird. Sowohl die Erzeugung der radial oder azimuthal polarisierten Laserstrahlung als auch deren Stabilisierung können daher an ein- und demselben optischen Element vorgenommen werden. Alternativ kann ggf. auch einer der im Laserresonator vorhandenen Faltungsspiegel ein Gitter aufweisen, das als Phasenschiebe-Einrichtung ausgebildet ist und eine Phasendifferenz zwischen der radialen und azimuthalen Polarisationsrichtung erzeugt.

Bei einer vorteilhaften Weiterbildung umfasst das reflektierende optische Element ein Mehrschichtsystem, das auf einem Substrat angeordnet ist. Das Mehrschichtsystem kann hierbei als reflexionsverstärkende Beschichtung ausgebildet sein und weist hierzu eine Anzahl von Einzelschichten auf, deren Brechungsindizes und Dicken derart aufeinander abgestimmt sind, dass durch Interferenzeffekte der Anteil der von dem optischen Element reflektierten Strahlung möglichst groß wird. Auf oder in dem Mehrschichtsystem oder an dem Substrat können hierbei Strukturen vorgesehen sein, welche die gewünschte Phasendifferenz erzeugen.

Bei einer bevorzugten Weiterbildung ist die Phasenschiebe-Einrichtung als Gitter ausgebildet, bei dem die Gitterperiode, der Aufbau des Mehrschichtsystems, das Material des Substrats und bevorzugt auch die Gitterform derart gewählt sind, dass die radiale oder azimuthale Polarisationsrichtung der Laserstrahlung in mindestens einen Leaky-Mode des Mehrschichtsystems und des Substrats eingekoppelt und die Phasendifferenz zwischen der radialen und der azimuthalen Polarisationsrichtung ( $E_r$ ,  $E_\varphi$ ) der Laserstrahlung erzeugt wird. Der Aufbau des Mehrschichtsystems ist durch die Anzahl der Einzelschichten, die Abfolge der Einzelschichten sowie durch deren Brechungsindizes und geometrischen Schichtdicken bestimmt. Das Gitter kann hierbei grundsätzlich wie die in der US 6,680,799 B1 beschriebenen Gitter ausgelegt sein, welche zur Erzeugung einer Reflektionsgraddifferenz zwischen den radial und azimuthal polarisierten Laserstrahlkomponenten ausgelegt sind, wobei zusätzlich die oben genannten Parameter noch so aufeinander abgestimmt werden müssen, dass sich auch die gewünschte Phasendifferenz zwischen radialer und azimuthaler Polarisationsrichtung einstellt.

Bei einer weiteren vorteilhaften Ausführungsform ist die Phasenschiebe-Einrichtung als periodisches oder quasiperiodisches, konzentrisches oder spiralförmiges Gitter ausgebildet, bei dem die Gitterperiode und bevorzugt auch die Gitterform derart gewählt sind, dass bezüglich der Laserwellenlänge der TM-Reflexionsgrad des Gitters in die eine genutzte Beugungsordnung größer oder kleiner als der TE-Reflexionsgrad des Gitters in diese Beugungsordnung ist und die Phasendifferenz zwischen der radialen und der azimuthalen Polarisationsrichtung der Laserstrahlung erzeugt wird. Das Gitter kann in diesem Fall grundsätzlich wie die in der eingangs genannten DE 10 2004 042 748 A1 beschriebenen Gitter ausgelegt sein, wobei auch in diesem Fall zusätzlich die oben genannten Parameter derart aufeinander abgestimmt werden müssen, dass sich eine Phasendifferenz zwischen den radial und azimuthal polarisierten Laserstrahlkomponenten einstellt, welche die unerwünschte, z.B. durch die Faltungsspiegel im Laserresonator hervorgerufene Phasendifferenz überbietet.

Bei einer weiteren vorteilhaften Weiterbildung ist das reflektierende optische Element als Gitter an einer Grenzfläche zwischen einem ersten dielektrischen Medium mit einem ersten Brechungsindex und einem zweiten dielektrischen Medium mit einem zweiten, kleineren Brechungsindex gebildet, wobei die Gitterperiode kleiner als die Wellenlänge der Laserstrahlung in dem zweiten dielektrischen Medium ist, und wobei die Gitterperiode und bevorzugt auch die Gitterform derart gewählt sind, dass ein mittlerer Brechungsindex des Gitters zwischen dem ersten Brechungsindex und dem zweiten Brechungsindex liegt. Die Laserstrahlung propagiert im ersten Medium und wird an der Grenzfläche zum zweiten Medium reflektiert. Hierbei ist das zweite Medium beispielsweise Luft oder Lasergas mit einem zweiten Brechungsindex. Dieser Gittertyp ist in der eingangs erwähnten US 6,191,890 B1 beschrieben und ermöglicht eine besonders hohe Reflexion der auf die Grenzfläche auftreffenden Laserstrahlung.

Bevorzugt sind bei dem oben beschriebenen Gitter die Brechungsindizes der dielektrischen Medien, die Gitterperiode und bevorzugt auch die Gitterform derart gewählt, dass die radiale oder azimuthale Polarisationsrichtung der Laserstrahlung in höhere Beugungsordnungen gebeugt und die Phasendifferenz zwischen der radialen und der azimuthalen Polarisationsrichtung der Laserstrahlung erzeugt wird. Neben der

Erzeugung einer besonders großen Reflexionsgraddifferenz kann zur Erzeugung der gewünschten Phasendifferenz ebenfalls der eingangs genannte GIRO-Effekt genutzt werden.

5 Bei einer weiteren vorteilhaften Ausführungsform ist die Phasenschiebe-Einrichtung als Polarisator-Einrichtung zur Erzeugung radial oder azimuthal polarisierter Laserstrahlung ausgebildet. In diesem Fall erzeugt die Phasenschiebe-Einrichtung zusätzlich zu der Phasendifferenz auch eine ausreichende Reflexionsgrad- oder Transmissionsgraddifferenz zwischen der radialen und azimuthalen Polarisationsrichtung zur Ausbildung eines radialen oder azimuthalen Polarisationszustands der  
10 Laserstrahlung in dem Laserresonator.

Bei einer bevorzugten Ausführungsform wird neben der Phasendifferenz auch eine Reflexionsgraddifferenz zwischen der radialen und der azimuthalen Polarisationsrichtung erzeugt, wobei die Reflexionsgraddifferenz bevorzugt mindestens 5%,  
15 besonders bevorzugt mindestens 15% und insbesondere mindestens 50% beträgt. Durch einen hinreichend großen Unterschied im Reflexionsgrad zwischen radial und azimuthal polarisierter Laserstrahlung lässt sich der gewünschte radiale bzw. azimuthale Polarisationszustand in dem Laserresonator einstellen.

20 Die Erfindung betrifft auch einen Laserresonator mit einer Polarisator-Einrichtung zur Erzeugung radial oder azimuthal polarisierter Laserstrahlung, bei dem eine Phasenschiebe-Einrichtung zur Erzeugung einer Phasendifferenz zwischen der radialen und der azimuthalen Polarisationsrichtung der Laserstrahlung innerhalb des Laserresonators vorgesehen ist, die wie oben beschrieben ausgebildet ist, so dass  
25 der gewünschte radiale bzw. azimuthale Polarisationszustand der Laserstrahlung in dem Laserresonator stabilisiert werden kann.

Bei einer vorteilhaften Ausführungsform weist der Laserresonator mindestens einen,  
30 bevorzugt mindestens drei Faltungsspiegel auf, die den Strahlengang der Laserstrahlung zwischen einem Endspiegel und einem Auskoppelspiegel falten. Die Faltungsspiegel ermöglichen einen kompakten Aufbau und dadurch eine hohe mechanische Stabilität des Laserresonators.

Bei einer weiteren bevorzugten Ausführungsform umfasst der Laserresonator einen Auskoppelspiegel, welcher als Phasenschiebe-Einrichtung ausgebildet ist, und einen Endspiegel, welcher als Polarisator-Einrichtung ausgebildet ist. In diesem Fall werden die Reflexionsgraddifferenz und die Phasendifferenz an den beiden gegenüberliegenden Enden des Laserresonators erzeugt. Durch eine Aufteilung dieser beiden Funktionen auf zwei verschiedene optische Elemente können die Reflexionsgraddifferenz und die Phasendifferenz getrennt voneinander eingestellt werden, so dass die jeweils hierfür zur Verfügung stehenden Parameter über einen größeren Wertebereich variiert und somit jede Funktion für sich besser optimiert werden kann.

Bei einer alternativen Ausführungsform weist der Laserresonator einen Endspiegel auf, welcher als Phasenschiebe-Einrichtung ausgebildet ist, sowie einen Auskoppelspiegel, welcher als Polarisator-Einrichtung ausgebildet ist. In diesem Fall sind die Funktionen des Endspiegels und des Auskoppelspiegels gegenüber dem oben beschriebenen Fall vertauscht.

Bei einer weiteren alternativen Ausführungsform weist der Laserresonator einen Auskoppelspiegel auf, welcher als Phasenschiebe-Einrichtung und als Polarisator-Einrichtung ausgebildet ist. Durch die kombinierte Erzeugung und Stabilisierung der radial oder azimuthal polarisierten Laserstrahlung an einem einzigen optischen Element können gegenüber dem Fall, dass hierfür zwei oder mehr optische Elemente vorgesehen werden, Kosten eingespart werden.

Bei einer alternativen Ausführungsform weist der Laserresonator einen Endspiegel auf, welcher als Phasenschiebe-Einrichtung und als Polarisator-Einrichtung ausgebildet ist. Neben dem Auskoppelspiegel kann auch der Endspiegel des Laserresonators zur kombinierten Erzeugung und Stabilisierung der radial oder azimuthal polarisierten Laserstrahlung verwendet werden. Sowohl beim Endspiegel als auch beim Auskoppelspiegel ist es hierbei vorteilhaft, dass die Laserstrahlung nahezu senkrecht auf deren Oberfläche auftrifft.

Bei einer weiteren alternativen Ausführungsform ist die Phasenschiebe-Einrichtung als transmissives, insbesondere als form-doppelbrechendes optisches Element ausgebildet, welches zwischen dem Auskoppelspiegel und dem Endspiegel ange-

ordnet ist. Neben der bereits oben beschriebenen Möglichkeit, die Phasendifferenz durch Form-Doppelbrechung zu erzeugen, kann ggf. auch ein doppelbrechendes Element zum Einsatz kommen, welches aus einer Vielzahl von Einzelementen (Facetten) zusammengesetzt ist, die jeweils unterschiedliche doppelbrechende Eigenschaften besitzen und in ihrer Gesamtheit die gewünschte Phasendifferenz erzeugen.

Bei einer bevorzugten Weiterbildung ist die Phasenschiebe-Einrichtung auf dem Auskoppelspiegel oder dem Endspiegel angeordnet und steht in direktem Kontakt zum Auskoppelspiegel oder Endspiegel. Als Phasenschiebe-Einrichtung kann hierbei beispielsweise eine transmissive form-doppelbrechende Platte dienen. Hierbei kann die Phasenschiebe-Einrichtung auf dem Auskoppelspiegel oder dem Endspiegel fixiert werden, z.B. indem sie am Rand aufgeklebt oder in einer gemeinsamen Halterung gelagert wird.

Bei einer bevorzugten Weiterbildung ist die Polarisator-Einrichtung als Auskoppelspiegel oder als Endspiegel ausgebildet und dient zur Erzeugung von Laserstrahlung mit einem radialen oder azimuthalen Polarisationszustand, indem der Unterschied im Reflexionsgrad zwischen diesen beiden Polarisationsrichtungen hinreichend groß gewählt wird.

Bei einer alternativen Weiterbildung ist die Polarisator-Einrichtung als transmissives, insbesondere als form-doppelbrechendes optisches Element ausgebildet. In diesem Fall wird Laserstrahlung mit dem unerwünschten Polarisationszustand nicht oder nur in geringem Maße transmittiert und so eine Transmissionsgraddifferenz zwischen radialer und azimuthaler Polarisationsrichtung erzeugt.

Bei einer weiteren alternativen Weiterbildung ist die Polarisator-Einrichtung durch den mindestens einen Faltungsspiegel gebildet. In diesem Fall wird die radial oder azimuthal polarisierte Laserstrahlung durch die Reflexionsgraddifferenz des oder der Faltungsspiegel zwischen den senkrecht und parallel zur Einfallsebene polarisierten Komponenten der Laserstrahlung erzeugt, wie in Fig. 3a gezeigt ist. Hierbei hat es sich als besonders günstig erwiesen, wenn die Phasenschiebe-Einrichtung zur Erzeugung einer Phasendifferenz zwischen der radialen und der azimuthalen

Polarisationsrichtung der Laserstrahlung in dem Laserresonator zwischen  $30^\circ$  und  $330^\circ$ , bevorzugt zwischen  $60^\circ$  und  $300^\circ$ , besonders bevorzugt zwischen  $65^\circ$  und  $90^\circ$ , außerordentlich bevorzugt zwischen  $70^\circ$  und  $80^\circ$ , insbesondere bei  $75^\circ$  ausgelegt ist.

- 5 Weitere Vorteile der Erfindung ergeben sich aus der Beschreibung und der Zeichnung. Ebenso können die vorstehend genannten und die noch weiter aufgeführten Merkmale je für sich oder zu mehreren in beliebigen Kombinationen Verwendung finden. Die gezeigten und beschriebenen Ausführungsformen sind nicht als abschließende Aufzählung zu verstehen, sondern haben vielmehr beispielhaften
- 10 Charakter für die Schilderung der Erfindung.

Es zeigen:

- 15 Fig. 1a-c den Strahlquerschnitt eines Laserresonators mit linear (Fig. 1a), azimuthal (Fig. 1b) und radial (Fig. 1c) polarisierter Laserstrahlung;
- Fig. 2 einen gefalteten Laserresonator mit einem Auskoppelspiegel, einem Endspiegel und acht Faltungsspiegeln;
- 20 Fig. 3a,b die Reflexionsgrade  $R$  (Fig. 3a) und Phasendifferenzen  $\Delta\varphi$  (Fig. 3b) der senkrecht und parallel polarisierten Komponenten eines Laserstrahls in Abhängigkeit vom Einfallswinkel  $\alpha$  des Laserstrahls für einen dielektrisch beschichteten Faltungsspiegel;
- 25 Fig. 4a-c ein Gitter zur Erzeugung radial polarisierter Laserstrahlung in einer Schrägansicht und einer Detailansicht gemäß III (Fig. 4a), ein auf einem dielektrischen Substrat und Mehrschichtsystem aufgebrachtes Gitter mit Leaky-Moden (Fig. 4b) und ein auf einem dielektrischen Substrat aufgebrachtes Gitter mit GIRO-Effekt (Fig. 4c);
- 30 Fig. 5a,b Ausführungsformen eines erfindungsgemäßen Laserresonators mit einem Auskoppelspiegel als Phasenschiebe-Einrichtung und einem Endspiegel als Polarisator-Einrichtung (Fig. 5a) und mit dem

Auskoppelspiegel als Phasenschiebe- und Polarisator-Einrichtung (Fig. 5b);

- 5 Fig. 6a-d Ausführungsformen eines erfindungsgemäßen Laserresonators mit einer form-doppelbrechenden Platte als Phasenschiebe-Einrichtung, welche zwischen Endspiegel und Auskoppelspiegel (Fig. 6a,b), auf dem Endspiegel (Fig. 6c) bzw. auf dem Auskoppelspiegel (Fig. 6d) angebracht ist;
- 10 Fig. 7a,b Berechnete Reflexionsgrade und Reflexionsgraddifferenzen (Fig. 7a) sowie berechnete Phasendifferenzen (Fig. 7b) eines Gitters mit Leaky-Moden; und
- 15 Fig. 8a,b Berechnete Reflexionsgrade und Reflexionsgraddifferenzen (Fig. 8a) sowie berechnete Phasendifferenzen (Fig. 7b) eines Gitters mit GIRO-Effekt.

20 Die **Fig. 4a-c** zeigen bekannte Polarisator-Einrichtungen zur Erzeugung radial oder azimuthal polarisierter Laserstrahlung, die in einem Laserresonator angeordnet werden können.

Fig. 4a zeigt einen Gitterspiegel **10** mit einem Gitter **11**, das eine Ringstruktur mit konzentrischen Gitterrillen **12** und Gitterstegen **13** aufweist und an einer Oberfläche **14** eines metallischen Substrats **15** durch Drehbearbeitung erzeugt ist. Beim Gitter **11** wird die Laserstrahlung mit tangential zu den Gitterrillen **12** verlaufender Polarisation als **TE**-polarisiert und die mit rechtwinklig zu den Gitterrillen **12** verlaufender Polarisation als **TM**-polarisiert bezeichnet. Die wesentlichen Parameter, über die die Polarisation beeinflusst wird, sind die Gitterperiode  $\Lambda$ , die Tiefe **d** der Gitterrillen **12** und die Breite **b** der Gitterstege **13**. Als Füllfaktor **f** wird das Verhältnis der Breite **b** der Gitterstege **13** zur Gitterperiode  $\Lambda$  bezeichnet. Für Gitter **11** mit konzentrischen Gitterrillen **12** entsprechen die TE-Komponente der azimuthalen Polarisationsrichtung und die TM-Komponente der radialen Polarisationsrichtung. Die Ermittlung der erforderlichen Parameter (Gitterperiode, Gitterform und Wahl des Substratmaterials) erfolgt über kommerziell verfügbare Berechnungsmethoden z.B.

25

30

auf Basis der RCWA(=rigorous coupled wave analysis)-Methode. Insbesondere kann das Gitter 11 wie in der DE 10 2004 042 748 A1 beschrieben ausgebildet sein, d.h. eine Gitterperiode  $\Lambda$  aufweisen, welche größer als die Wellenlänge der Laserstrahlung in dem Laserresonator ist, oder gemäß der US 6,680,799 B1 oder der  
5 US 6,191,890 B1 ausgebildet sein, d.h. eine Gitterperiode  $\Lambda$  aufweisen, welche kleiner als die Laserwellenlänge ist.

Fig. 4b zeigt einen Gitterspiegel **20** mit einem Sub-Wellenlängen-Gitter **21**, das an einer Deckschicht **24** eines Mehrschichtsystems **22** gebildet ist, welches auf  
10 einem dielektrischen Substrat **23** angeordnet ist. Das Sub-Wellenlängen-Gitter 21 kann auch innerhalb einer oder mehrerer Schichten des Mehrschichtsystems 22 oder zwischen dem Mehrschichtsystem 22 und dem Substrat 23 angeordnet sein (nicht gezeigt). Die Gitterperiode und die Gitterform des Gitters 21 sind derart gewählt, dass eine Polarisationsrichtung des Laserstrahls in mindestens einen  
15 Leaky-Mode des Mehrschichtsystems 22 und des Substrats 23 eingekoppelt wird. Dies kann wie in der US 6,680,799 B1 beschrieben erfolgen, wobei die spektrale Lage des zumindest einen Leaky-Modes derart gewählt wird, dass diese nahe genug an der Laserwellenlänge  $\lambda_0$  liegt. Durch geeignete Wahl der Gitterperiode und Gitterform in Kombination mit dem Aufbau des Mehrschichtsystems  
20 22 (Material, Schichtdicke, Brechungsindizes), kann die Lage der Reflexionsgrad-differenz  $\Delta R$  zwischen axialer und radialer Polarisationsrichtung so beeinflusst werden, dass diese im gewünschten Bereich liegt.

Das Design kann auch so ausgelegt werden, dass sich mehrere Leaky-Moden in  
25 unmittelbarer Nähe der Laserwellenlänge  $\lambda_0$  befinden. Dies geschieht dadurch, dass für einen gewählten Ansatz, d.h. für eine vorgegebene Wahl der Parameter des Mehrschichtsystems 22, die Feldverteilung der Leaky-Moden berechnet wird und diejenige(n) Schicht(en) identifiziert werden kann (können), die in größter Wechselwirkung mit dem Leaky-Mode steht (stehen). Die genaue spektrale Lage dieses  
30 Leaky-Modes kann nun durch Variation dieser Schicht(en) beeinflusst werden. Durch numerische Rechenmethoden (z.B. RCWA) kann man so iterativ die gewünschte spektrale Lage aller Leaky-Moden beeinflussen. Hierbei kann sich ggf. herausstellen, dass der gewählte Ansatz dahingehend modifiziert werden muss, dass die Anzahl der Schichten des Mehrschichtsystems 22 variiert wird. Mit der spektralen

Platzierung der Leaky-Moden und passender Gitter-Auslegung, die diese Leaky-Moden resonant ankoppeln, kann daher auf die spektrale Verteilung der Reflexionsgraddifferenz  $\Delta R$  von radialer und azimuthaler Polarisationsrichtung Einfluss genommen werden.

5

Der Gitterspiegel 20 gemäß Fig. 4b kann als hochreflektierender Endspiegel für einen Laserresonator ausgebildet sein, wobei der Reflexionsgrad durch den Aufbau des Mehrschichtsystems 22 eingestellt wird. Die durch einen Pfeil angedeutete, auf das Gitter 21 auftreffende Laserstrahlung wird von diesem in Abhängigkeit von der Polarisationsrichtung unterschiedlich stark reflektiert. Grundsätzlich kann der Gitterspiegel 20 auch so ausgebildet sein, dass der Laserstrahl von der Seite des Substrats 23 einfällt und das Gitter auf der Rückseite des Endspiegels angeordnet ist (vgl. die Anordnung in Fig. 4c).

10

Fig. 4c zeigt einen weiteren Gitterspiegel 30 mit einem Sub-Wellenlängen-Gitter 31, bei dem die Gitterperiode  $\Lambda$  kleiner als die Laserwellenlänge  $\lambda_0$  ( $10,6 \mu\text{m}$  für  $\text{CO}_2$ -Laserstrahlung) ausgelegt ist. Die Gitterparameter (Gitterperiode  $\Lambda$ , Gitterform) sind derart gewählt, dass das Gitter 31 den sogenannten GIRO-Effekt zeigt, der eine hohe Polarisationsselektivität zur Folge hat. Einzelheiten zum GIRO-Effekt sind in der eingangs erwähnten US 6,191,890 B1 beschrieben. Der Gitterspiegel gemäß Fig. 4c weist ein erstes dielektrisches Medium 32 (z.B. Galliumarsenid) als Substrat mit einem ersten Brechungsindex von  $n_1 = 3,27$  bei  $10,6 \mu\text{m}$ , ein zweites dielektrisches Medium 33 (z.B. Luft) mit einem zweiten Brechungsindex  $n_2$  nahe 1,0 und das an einer Grenzfläche zwischen den beiden dielektrischen Medien 32, 33 gebildete Gitter 31 auf, welches einen mittleren Brechungsindex  $n_{AV}$  aufweist, der zwischen den beiden Brechungsindizes  $n_1, n_2$  liegt. Der Gitterspiegel 30 kann als hochreflektierender Endspiegel ausgebildet sein, wobei das Gitter 31 auf der Rückseite des Endspiegels angeordnet ist. Der durch einen Pfeil angedeutete einfallende Laserstrahl durchquert das erste dielektrische Medium 32 und wird vom Gitter 31 reflektiert.

20

25

30

Die Fig. 5a und 5b zeigen zwei Laserresonatoren 40, 40' mit jeweils einem hochreflektierenden Endspiegel 41, 41' und einem teildurchlässigen Auskoppelspiegel 42, 42', wobei im Strahlengang 43 zwischen End- und Auskoppelspiegel jeweils zwei Faltungsspiegel 44, 45 angeordnet sind, die unter einem Einfallswinkel von jeweils

45° betrieben werden. Die Phasenschiebe-Einrichtung ist bei den Laserresonatoren 40, 40' von Fig. 5a und 5b als reflektierendes optisches Element ausgebildet.

Fig. 5a zeigt einen Laserresonator 40, bei dem der Auskoppelspiegel 42 als  
5 Phasenschiebe-Einrichtung und der Endspiegel 41 als Polarisator-Einrichtung  
ausgebildet sind. Der Auskoppelspiegel 42 ist mit einem Gitter 46 versehen, das eine  
Phasendifferenz  $\Delta\varphi$  zwischen radialer und azimuthaler Polarisationsrichtung der  
Laserstrahlung erzeugt und der Endspiegel 41 weist ein Gitter 47 auf, das eine  
10 Reflexionsgraddifferenz  $\Delta R$  zwischen der radialen und azimuthalen Polarisations-  
richtung erzeugt. Es versteht sich, dass auch der Endspiegel 41 als Phasenschiebe-  
Einrichtung und der Auskoppelspiegel 42 als Polarisator-Einrichtung ausgebildet sein  
können (nicht gezeigt).

Fig. 5b zeigt einen Laserresonator 40', bei dem der Auskoppelspiegel 42' als  
15 Phasenschiebe-Einrichtung und als Polarisator-Einrichtung ausgebildet ist. Der  
Auskoppelspiegel 42' ist hierzu mit einem Gitter 48 versehen, das eine  
Phasendifferenz  $\Delta\varphi$  und eine Reflexionsgraddifferenz  $\Delta R$  zwischen radialer und  
azimutaler Polarisationsrichtung der Laserstrahlung erzeugt, so dass sich im  
Laserresonator 40' ein radialer Polarisationszustand einstellt, wie er in Fig. 1c  
20 dargestellt ist. Die Intensitätsverteilung der im Laserresonator 40' erzeugten, radial  
polarisierten Strahlung ist ringförmig um das Zentrum des Strahlquerschnitts verteilt.  
Anstatt zur Einstellung des gewünschten Polarisationszustands das Gitter 48 auf  
dem teildurchlässigen Auskoppelspiegel 42' anzuordnen, könnte es auch auf dem  
Endspiegel 41' angeordnet sein (nicht gezeigt). Das Gitter 48 kann wie in der US  
25 6,680,799 B1, der DE 10 2004 042 748 A1, der US 6,191,890 B1 oder dem Artikel  
von Goncharski et al. beschrieben ausgeführt sein. Für Einzelheiten zur Auswahl  
geeigneter Parameter für die Erzeugung der Reflexionsgraddifferenz  $\Delta R$  sei auf  
diese Dokumente verwiesen, wobei die Parameter des Gitters 48 zusätzlich derart  
30 gewählt werden müssen, dass sich zwischen radialer und azimuthaler Polarisierung  
auch die gewünschte Phasendifferenz einstellt.

Die **Fig. 6a,b** zeigen zwei weitere Laserresonatoren **50, 50'** mit einem hochreflek-  
tierenden Endspiegel **51** und einem teildurchlässigen Auskoppelspiegel **52**, bei  
denen im Strahlengang **53** zwischen dem End- und dem Auskoppelspiegel 51, 52

zwei Faltungsspiegel **54**, **55** angeordnet sind, die einen Laserstrahl unter einem Einfallswinkel von jeweils  $45^\circ$  umlenken. Die Phasenschiebe-Einrichtung ist in beiden Fällen als transmissives, form-doppelbrechendes optisches Element **56**, **56'** ausgebildet, das zwischen dem End- und dem Auskoppelspiegel 51, 52 angeordnet ist. Es versteht sich, dass zur Herstellung der gewünschten Phasendifferenz  $\Delta\varphi$  mittels eines transmissiven optischen Elements in einem Laserresonator 50, 50' dieses nur die Hälfte der gewünschten Phasendifferenz  $\Delta\varphi$  erzeugen darf, da ein solches transmissives optisches Element bei einem Umlauf der Laserstrahlung im Laserresonator 50, 50' zweimal durchlaufen wird. Neben der bereits oben beschriebenen Möglichkeit, die Phasendifferenz durch Form-Doppelbrechung zu erzeugen, kann ggf. auch ein doppelbrechendes Element zum Einsatz kommen, welches aus einer Vielzahl von Einzelementen (Facetten) zusammengesetzt ist, die jeweils unterschiedliche doppelbrechende Eigenschaften besitzen und in ihrer Gesamtheit die gewünschte Phasendifferenz erzeugen.

Fig. 6a zeigt einen Laserresonator 50, bei dem neben dem form-doppelbrechenden Element 56 (im Folgenden auch als form-doppelbrechende Platte bezeichnet) ein weiteres transmissives optisches Element **57** als Polarisator-Einrichtung vorgesehen ist, welches eine Transmissionsgraddifferenz  $\Delta T$  zwischen radialer und azimuthaler Polarisationsrichtung der Laserstrahlung erzeugt. Anstatt eine transmissive Polarisator-Einrichtung 57 zur Erzeugung radial oder azimuthal polarisierter Laserstrahlung zu verwenden, können auch der Auskoppelspiegel 51 oder der Endspiegel 52 als Polarisator-Einrichtung, welche eine Reflexionsgraddifferenz  $\Delta R$  zwischen radialer und azimuthaler Polarisationsrichtung der Laserstrahlung erzeugt, ausgebildet sein (nicht gezeigt). Es versteht sich, dass die form-doppelbrechende Platte 56 auch zwischen dem Endspiegel 51 und dem ersten Faltungsspiegel 54 oder zwischen dem Auskoppelspiegel 52 und dem zweiten Faltungsspiegel 55 angeordnet sein könnte (nicht gezeigt).

Fig. 6b zeigt einen Laserresonator 50', bei dem die transmissive, form-doppelbrechende Platte 56' als Phasenschiebe- und als Polarisator-Einrichtung ausgebildet ist. Die form-doppelbrechende Platte 56' erzeugt bei zweimaligem Durchqueren die gewünschte Phasendifferenz  $\Delta\varphi$  und die gewünschte Trans-

missionsgraddifferenz  $\Delta T$  zwischen radialer und azimuthaler Polarisationsrichtung der Laserstrahlung in dem Laserresonator 50'.

Die **Fig. 6c,d** zeigen Laserresonatoren **60, 60'** mit einem Endspiegel **61** und einem  
5 Auskoppelspiegel **62**. Im Strahlengang **63** zwischen dem End- und Auskoppelspiegel  
61, 62 sind zwei Faltungsspiegel **64, 65** angeordnet, die den Laserstrahl um jeweils  
90° umlenken. Die Funktion der Phasenschiebe-Einrichtung wird wie in Fig. 6a,b  
von einer form-doppelbrechenden Platte **66** erfüllt. Als Polarisator-Einrichtung ist der  
10 Auskoppelspiegel 62 ausgebildet, welcher eine Reflexionsgraddifferenz  $\Delta R$  zwischen  
der radialen und azimuthalen Polarisationsrichtung der Laserstrahlung erzeugt. Hierzu  
kann der Auskoppelspiegel 62 ein Gitter gemäß den Fig. 4a-c oder ein anderes  
Gitter mit den gewünschten Eigenschaften aufweisen. Die form-doppelbrechende  
Platte 66 ist in dem Laserresonator 60 von Fig. 6c auf dem Endspiegel 61 und in  
dem Laserresonator 60' von Fig. 6d auf dem Auskoppelspiegel 62 fixiert.

15 Den in Fig. 5a,b und 6a-d dargestellten Typen von Laserresonatoren 40, 40'; 50,  
50'; 60, 60' ist gemeinsam, dass sie zur Herstellung eines stabilen, axial sym-  
metrischen Polarisationszustands der Laserstrahlung sowohl eine Reflexions-  
graddifferenz bzw. eine Transmissionsgraddifferenz erzeugen als auch die Phasen-  
20 differenz zwischen den Polarisationsrichtungen der Laserstrahlung lokal geeignet  
beeinflussen. Es versteht sich, dass der Fachmann die oben gezeigten Anordnungen  
entsprechend seiner Bedürfnisse modifizieren, d.h. z.B. die Zahl der Faltungsspiegel  
oder die Wellenlänge der Laserstrahlung variieren kann. Insbesondere kann auch  
eine größere als die gezeigte Anzahl von Polarisator- bzw. Phasenschiebe-Einrich-  
25 tungen in einem Laserresonator angeordnet sein, wobei diese Elemente auch anders  
als hier beschrieben ausgeführt und an anderen Stellen im Laserresonator ange-  
ordnet sein können. Auch können die Faltungsspiegel 44, 45; 54, 55; 64, 65 ggf. als  
Polarisator-Einrichtung zur Erzeugung radial oder axial polarisierter Laserstrahlung  
dienen, so dass auf eine zusätzliche, axial symmetrische Polarisator-Einrichtung in  
30 dem Laserresonator verzichtet werden kann. Ferner können die Faltungsspiegel 44,  
45; 54, 55; 64, 65 auch mit Gitterstrukturen versehen werden, welche die gewün-  
schte Reflexionsgrad- und Phasendifferenzen aufweisen und welche für die typi-  
scherweise auftretenden Einfallswinkel von 45° optimiert sind.

Die **Fig. 7a und 7b** zeigen die berechneten Reflexionsgrade  $R$  und Reflexionsgrad-  
differenzen  $\Delta R$  (Fig. 7a) sowie die berechneten Phasendifferenzen  $\Delta\phi$  (Fig. 7b) für  
ein Gitter, das als Phasenschiebe- und Polarisator-Einrichtung und gleichzeitig als  
Endspiegel in einem Laserresonator ausgebildet ist. Das Gitter 21 ist entsprechend  
5 dem in Fig. 4b gezeigten Aufbau auf der Deckschicht 24 aus Germanium des  
Mehrfachschichtsystems 22 gebildet, welches wiederum auf dem dielektrischen  
Substrat 23 aus Galliumarsenid aufgebracht ist. Das Gitter 21 weist eine Ringstruktur  
mit konzentrischen Gitterrillen und Gitterstegen auf (vgl. Fig. 4a) und ist für den  
Betrieb mit Laserstrahlung bei einer Laserwellenlänge  $\lambda_0$  von  $10,6 \mu\text{m}$  ausgelegt. Das  
10 Gitter 21 weist ferner eine Gitterperiode  $\Lambda$  auf, welche geringer als die Laser-  
wellenlänge  $\lambda_0$  ist und  $6,27 \mu\text{m}$  beträgt. Die Tiefe  $d$  der Gitterrillen liegt bei  $3,42 \mu\text{m}$   
und die Breite der Gitterstege entspricht der halben Gitterperiode  $\Lambda$  des Gitters 21,  
so dass der Füllfaktor  $f$  des Gitters 50 % entspricht. Die Parameter des Gitters 21  
wurden dahingehend optimiert, dass die unerwünschte azimuthale Polarisations-  
15 komponente in Leaky-Moden eingekoppelt wird. Das mit diesen Parametern  
ausgestattete Gitter ermöglicht die Erzeugung einer Reflexionsgraddifferenz  $\Delta R$  und  
einer Phasendifferenz  $\Delta\phi$ , welche die stabile Erzeugung von radial polarisierter  
Strahlung in einem Laserresonator ermöglichen, wie im Folgenden näher ausgeführt  
ist.

20 **Fig. 7a** zeigt die Abhängigkeit der Reflexionsgrade  $R$  der TM- und TE-polarisierten  
Laserstrahlung von der Wellenlänge  $\lambda$  der einfallenden Laserstrahlung. Deutlich zu  
erkennen ist, dass für bestimmte Werte der Wellenlänge  $\lambda$  die TE-Komponente  
Minima des Reflexionsgrades  $R$  aufweist, welche als Leaky-Moden bezeichnet  
25 werden, deren Lage von der Beschaffenheit des Mehrfachschichtsystems 22 und des  
Substrats 23 abhängig ist. Die zu den beiden Leaky-Moden  $\text{TE}_{L1}$  und  $\text{TE}_{L2}$  gehörigen  
Wellenlängen  $\lambda_1$  und  $\lambda_2$  sind in einem so geringen Abstand zur Betriebswellenlänge  
 $\lambda_0$  des Gitters 21 angeordnet, dass sie sich innerhalb der spektralen Verstärkungs-  
bandbreite eines zugehörigen Laserresonators befinden. Dies wird erreicht, indem  
30 der relative spektrale Abstand der beiden Leaky-Moden  $\text{TE}_{L1}$  und  $\text{TE}_{L2}$  von der  
Laserwellenlänge  $\lambda_0$  ( $10,6 \mu\text{m}$ ) gegeben durch  $\Delta\lambda_1 = |\lambda_1 - \lambda_0| / \lambda_0$  bzw.  $\Delta\lambda_2 = |\lambda_2 - \lambda_0| /$   
 $\lambda_0$ , bei weniger als 5 %, insbesondere bei weniger als 3 %, liegt.

Für die Laserwellenlänge  $\lambda_0$  von  $10,6 \mu\text{m}$  liegt der Reflexionsgrad  $R$  der TM-Komponente bei  $99,6 \%$  und der Reflexionsgrad  $R$  der TE-Polarisation bei  $41 \%$ , so dass sich eine Reflexionsgraddifferenz  $\Delta R$  von  $58,6 \%$  zwischen den TM- und TE-Komponenten ergibt. Die in **Fig. 7b** gezeigte Phasendifferenz  $\Delta\phi$  liegt bei der  
5 Laserwellenlänge  $\lambda_0$  von  $10,6 \mu\text{m}$  bei  $180^\circ$  ( $2\pi=360^\circ$ ).

Die **Fig. 8a und 8b** zeigen die berechneten Reflexionsgrade  $R$  und Reflexionsgraddifferenzen  $\Delta R$  (Fig. 8a) sowie die berechneten Phasendifferenzen  $\Delta\phi$  (Fig. 8b) für ein Gitter 31, das als Phasenschiebe- und Polarisator-Einrichtung und gleichzeitig als  
10 Endspiegel in einem Laserresonator ausgebildet ist. Das Gitter 31 ist entsprechend dem in Fig. 4c gezeigten Aufbau auf einem dielektrischen Substrat 32 aus Galliumarsenid (GaAs) gebildet und weist eine Ringstruktur mit konzentrischen Gitterrillen und Gitterstegen (vgl. Fig. 4a) auf und ist für den Betrieb mit Laserstrahlung bei einer Laserwellenlänge  $\lambda_0$  von  $10,6 \mu\text{m}$  ausgelegt. Die Gitterperiode  $\Lambda$  beträgt  $6,27 \mu\text{m}$ , die  
15 Tiefe  $d$  der Gitterrillen liegt bei  $3,42 \mu\text{m}$  und die Breite  $b$  der Gitterstege entspricht der halben Gitterperiode  $\Lambda$  ( $b=3,135 \mu\text{m}$ ).

Der berechnete Reflexionsgrad  $R$  des Gitters 31 für TM- und TE-polarisierte Laserstrahlung ist in Fig. 8a in Abhängigkeit von der Wellenlänge  $\lambda$  dargestellt, wobei  
20 die Reflexionsgraddifferenz  $\Delta R$  zwischen der TM- und TE-Komponente bei der Betriebswellenlänge  $\lambda_0$  von  $10,6 \mu\text{m}$  maximal ist. Hier beträgt der Reflexionsgrad  $R$  für die TM-Komponente  $99,2 \%$  und für die TE-Komponente  $0,1 \%$ , d.h. die Reflexionsgraddifferenz  $\Delta R$  liegt bei  $99,1 \%$ . Dies ist möglich, weil die Parameter des Gitters 31 derart gewählt sind, dass dieses den sogenannten GIRO-Effekt zeigt,  
25 welcher eine außerordentlich starke Polarisationsselektivität zur Folge hat. Zur Erzeugung eines radialen bzw. azimuthalen Polarisationszustands sollte die Reflexionsgraddifferenz  $\Delta R$  zwischen der TM- und TE-Komponente mindestens  $5 \%$ , bevorzugt mindestens  $15 \%$ , besonders bevorzugt mindestens  $50 \%$  betragen.

30 Fig. 8b zeigt die berechnete Phasendifferenz  $\Delta\phi$  zwischen TE- und TM-polarisierter Laserstrahlung. Diese liegt bei der Laserwellenlänge  $\lambda_0$  von  $10,6 \mu\text{m}$  bei  $-2,3 \text{ rad}$ , d.h. bei  $2,3 \times 57,3^\circ = 131,8^\circ$  (absolut). Durch eine solche Phasendifferenz  $\Delta\phi$  kann erreicht werden, dass die im Laserresonator ausgebildete, radial polarisierte

Laserstrahlung auch bei Vorhandensein von phasenschiebenden optischen Elementen, wie bspw. mehreren Faltungsspiegeln (siehe Fig. 2) erhalten werden kann.

Die oben beschriebenen radial symmetrischen Gitter sind derart ausgelegt, dass die Gitterperiode  $\Lambda$  über das gesamte Feld der Laserstrahlung konstant ist. Es versteht sich, dass zur Erzeugung und/oder zur Stabilisierung der Laserstrahlung die Gitterperiode  $\Lambda$  bzw. die Gitterform ggf. auch in radialer Richtung variabel gewählt werden können, so dass insbesondere die Phasendifferenz von der radialen Koordinate abhängig wird. Bei der Modulation der Gitterperiode  $\Lambda$  ist jedoch darauf zu achten, dass diese bei Gittern vom in der DE 10 2004 042 748 A1 beschriebenen Typ nicht kleiner gewählt wird als die Laserwellenlänge  $\lambda_0$  bzw. bei Gittern vom in der US 6,680,799 B1 oder der US 6,191,890 B1 beschriebenen Typ die Laserwellenlänge  $\lambda_0$  nicht überschreitet.

Patentansprüche

5

1. Phasenschiebe-Einrichtung (42; 42'; 56; 56'; 66) zur Stabilisierung radial oder azimuthal polarisierter Laserstrahlung (3a, 3b) innerhalb eines Laserresonators (40; 40'; 50; 50'; 60; 60'), wobei der Laserresonator (40; 40'; 50; 50'; 60; 60') eine Polarisator-Einrichtung (41; 42'; 57; 56'; 62) zur Erzeugung radial oder azimuthal polarisierter Laserstrahlung (3, 4) umfasst, dadurch gekennzeichnet, dass die Phasenschiebe-Einrichtung (42; 42'; 56; 56'; 66) derart ausgebildet ist, dass sie pro Umlauf im Laserresonator (40; 40'; 50; 50'; 60; 60') eine Phasendifferenz ( $\Delta\varphi$ ) zwischen ca.  $30^\circ$  und ca.  $330^\circ$ , bevorzugt zwischen ca.  $70^\circ$  und ca.  $290^\circ$ , besonders bevorzugt zwischen ca.  $160^\circ$  und ca.  $200^\circ$ , insbesondere von ca.  $180^\circ$  zwischen der radialen und der azimuthalen Polarisationsrichtung ( $E_r$ ,  $E_\varphi$ ) der Laserstrahlung (3a, 3b) erzeugt, und dass die Phasenschiebe-Einrichtung (42; 42'; 56; 56'; 66) eine axiale Symmetrie aufweist.
2. Phasenschiebe-Einrichtung nach Anspruch 1, welche als Gitter (10, 21, 31) ausgebildet ist, wobei die Gitterperiode ( $\Lambda$ ) und bevorzugt auch die Gitterform (b, d) derart gewählt sind, dass das Gitter (10, 21, 31) die Phasendifferenz ( $\Delta\varphi$ ) erzeugt.
3. Phasenschiebe-Einrichtung nach Anspruch 1 oder 2, welche als transmissives optisches Element (56; 56'; 66) ausgebildet ist.
4. Phasenschiebe-Einrichtung nach Anspruch 3, bei der das transmissive optische Element (56, 56'; 66) als form-doppelbrechendes Element ausgebildet ist.
5. Phasenschiebe-Einrichtung nach Anspruch 1 oder 2, welche als reflektierendes optisches Element (41; 42'; 62) ausgebildet ist.
6. Phasenschiebe-Einrichtung nach Anspruch 5, bei der das reflektierende optische Element als Endspiegel (41) oder als Auskoppelspiegel (42'; 62) ausgebildet ist.

7. Phasenschiebe-Einrichtung nach Anspruch 5 oder 6, bei der das reflektierende Element (41; 42'; 62) ein Mehrfachschichtsystem (22) umfasst, das auf einem Substrat (23) angeordnet ist.
- 5
8. Phasenschiebe-Einrichtung nach Anspruch 7, welche als Gitter (21) ausgebildet ist, bei dem die Gitterperiode ( $\Lambda$ ), der Aufbau des Mehrfachschichtsystems (22), das Material des Substrats (23) und bevorzugt auch die Gitterform (b, d) derart gewählt sind, dass die radiale oder azimutale Polarisationsrichtung ( $E_r$ ,  $E_\phi$ ) der Laserstrahlung (3a, 3b) in mindestens einen Leaky-Mode des Mehrfachschichtsystems (22) und des Substrats (23) eingekoppelt und die Phasendifferenz ( $\Delta\phi$ ) zwischen der radialen und der azimutalen Polarisationsrichtung ( $E_r$ ,  $E_\phi$ ) der Laserstrahlung erzeugt wird.
- 10
9. Phasenschiebe-Einrichtung nach einem der Ansprüche 5 bis 7, welche als periodisches oder quasiperiodisches, konzentrisches oder spiralförmiges Gitter (11) ausgebildet ist, bei dem die Gitterperiode ( $\Lambda$ ) und bevorzugt auch die Gitterform (b, d) derart gewählt sind, dass bezüglich der Laserwellenlänge der TM-Reflexionsgrad des Gitters (11) in die eine genutzte Beugungsordnung größer oder kleiner als der TE-Reflexionsgrad des Gitters (11) in diese Beugungsordnung ist und die Phasendifferenz ( $\Delta\phi$ ) zwischen der radialen und der azimutalen Polarisationsrichtung ( $E_r$ ,  $E_\phi$ ) der Laserstrahlung erzeugt wird.
- 15
10. Phasenschiebe-Einrichtung nach Anspruch 5 oder 6, bei der das reflektierende optische Element (41; 42'; 62) als Gitter (31) an einer Grenzfläche zwischen einem ersten dielektrischen Medium (32) mit einem ersten Brechungsindex ( $n_1$ ) und einem zweiten dielektrischen Medium (33) mit einem zweiten, kleineren Brechungsindex ( $n_2$ ) gebildet ist, wobei die Gitterperiode ( $\Lambda$ ) kleiner als die Wellenlänge der Laserstrahlung (3a, 3b) in dem zweiten dielektrischen Medium (33) ist, und wobei die Gitterperiode ( $\Lambda$ ) und bevorzugt auch die Gitterform (b, d) derart gewählt sind, dass ein mittlerer Brechungsindex ( $n_{av}$ ) des Gitters (31) zwischen dem ersten Brechungsindex ( $n_1$ ) und dem zweiten Brechungsindex ( $n_2$ ) liegt.
- 25
- 30

11. Phasenschiebe-Einrichtung nach Anspruch 10, bei dem die Brechungsindizes ( $n_1$ ,  $n_2$ ) der dielektrischen Medien, die Gitterperiode ( $\Lambda$ ) und bevorzugt auch die Gitterform ( $b$ ,  $d$ ) derart gewählt sind, dass die radiale oder azimutale Polarisationsrichtung ( $E_r$ ,  $E_\varphi$ ) der Laserstrahlung (3a, 3b) in höhere Beugungsordnungen gebeugt und die Phasendifferenz ( $\Delta\varphi$ ) zwischen der radialen und der azimutalen Polarisationsrichtung ( $E_r$ ,  $E_\varphi$ ) der Laserstrahlung (3a, 3b) erzeugt wird.
12. Phasenschiebe-Einrichtung nach einem der Ansprüche 5 bis 11, welche als Polarisator-Einrichtung (42'; 56') zur Erzeugung radial oder azimutal polarisierter Laserstrahlung (3a, 3b) ausgebildet ist.
13. Phasenschiebe-Einrichtung nach Anspruch 12, welche derart ausgebildet ist, dass neben der Phasendifferenz ( $\Delta\varphi$ ) auch eine Reflexionsgraddifferenz ( $\Delta R$ ) zwischen der radialen und der azimutalen Polarisationsrichtung ( $E_r$ ,  $E_\varphi$ ) erzeugt wird, wobei die Reflexionsgraddifferenz bevorzugt mindestens 5%, besonders bevorzugt mindestens 15% und insbesondere mindestens 50% beträgt.
14. Laserresonator (40; 40'; 50; 50'; 60; 60') zur Erzeugung und Stabilisierung radial oder azimutal polarisierter Laserstrahlung (3a, 3b) mit einer Polarisator-Einrichtung (41; 42'; 57; 56'; 62) zur Erzeugung radial oder azimutal polarisierter Laserstrahlung (3a, 3b), gekennzeichnet durch eine Phasenschiebe-Einrichtung (41; 42'; 57; 56'; 62) zur Erzeugung einer Phasendifferenz ( $\Delta\varphi$ ) zwischen der radialen und der azimutalen Polarisationsrichtung ( $E_r$ ,  $E_\varphi$ ) der Laserstrahlung (3a, 3b) innerhalb des Laserresonators (40; 40'; 50; 50'; 60; 60'), die gemäß einem der vorhergehenden Ansprüche ausgebildet ist.
15. Laserresonator nach Anspruch 14 mit mindestens einem, bevorzugt mit mindestens drei Faltungsspiegeln (44, 45; 54, 55; 64, 65), die den Strahlengang (43; 53; 63) der Laserstrahlung (3a, 3b) zwischen einem Endspiegel (41; 41'; 51; 61) und einem Auskoppelspiegel (42; 42'; 52; 62) falten.
16. Laserresonator nach Anspruch 14 oder 15 mit einem Auskoppelspiegel (42), welcher als Phasenschiebe-Einrichtung ausgebildet ist, und einem Endspiegel (41), welcher als Polarisator-Einrichtung ausgebildet ist.

17. Laserresonator nach Anspruch 14 oder 15 mit einem Endspiegel, welcher als Phasenschiebe-Einrichtung ausgebildet ist, und einem Auskoppelspiegel, welcher als Polarisator-Einrichtung ausgebildet ist.
- 5
18. Laserresonator nach Anspruch 14 oder 15 mit einem Auskoppelspiegel (42'), welcher als Phasenschiebe-Einrichtung und als Polarisator-Einrichtung ausgebildet ist.
- 10
19. Laserresonator nach Anspruch 14 oder 15 mit einem Endspiegel, welcher als Phasenschiebe-Einrichtung und als Polarisator-Einrichtung ausgebildet ist.
20. Laserresonator nach Anspruch 14 oder 15, bei dem die Phasenschiebe-Einrichtung (56; 56'; 66) als transmissives, insbesondere als form-doppelbrechendes
- 15
- optisches Element ausgebildet ist, welches zwischen dem Auskoppelspiegel (52; 62) und dem Endspiegel (51; 61) angeordnet ist.
21. Laserresonator nach Anspruch 20, bei dem die Phasenschiebe-Einrichtung (66) auf dem Auskoppelspiegel (62) oder dem Endspiegel (61) angeordnet ist und in
- 20
- direktem Kontakt zum Auskoppelspiegel (62) oder Endspiegel (61) steht.
22. Laserresonator nach Anspruch 20 oder 21, bei dem die Polarisator-Einrichtung als Auskoppelspiegel (42'; 62) oder als Endspiegel (41) ausgebildet ist.
- 25
23. Laserresonator nach Anspruch 20 oder 21, bei dem die Polarisator-Einrichtung als transmissives, insbesondere als form-doppelbrechendes optisches Element (56'; 57) ausgebildet ist.
- 30
24. Laserresonator nach Anspruch 14, 15, 20 oder 21, bei dem die Polarisator-Einrichtung durch den mindestens einen Faltungsspiegel (44, 45; 54, 55; 64, 65) gebildet ist.

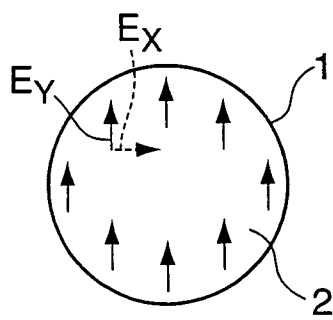


Fig. 1a

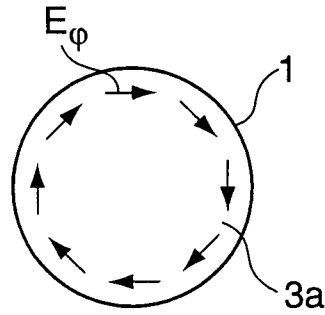


Fig. 1b

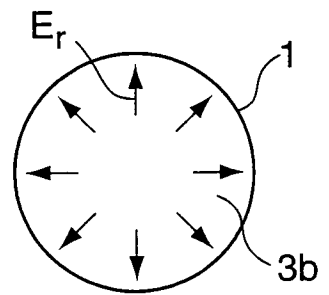


Fig. 1c

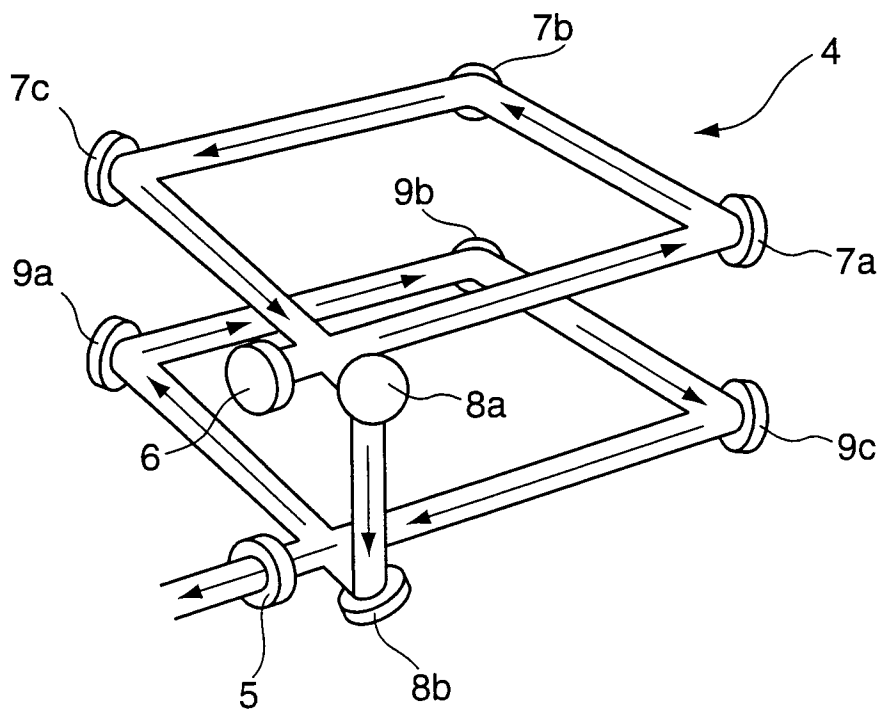


Fig. 2

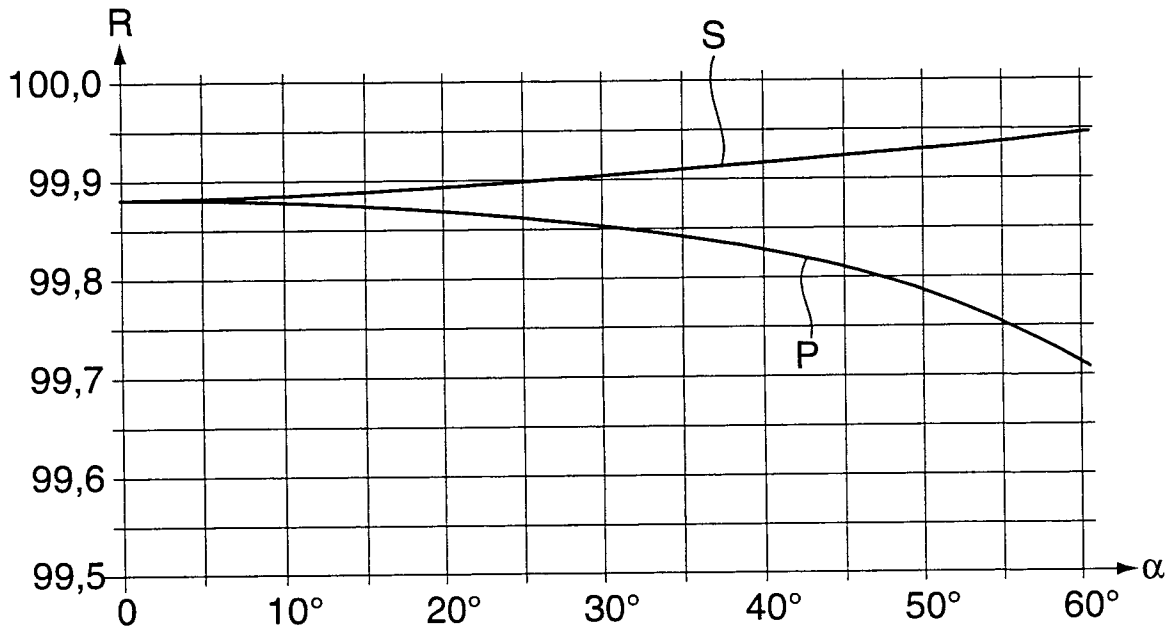


Fig. 3a

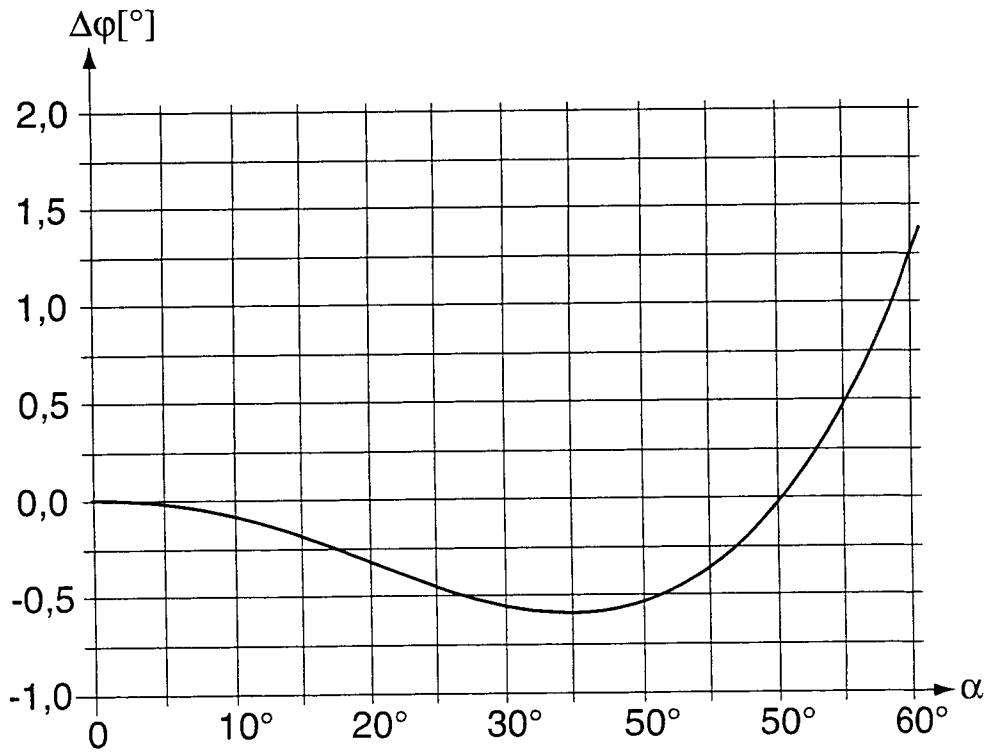


Fig. 3b

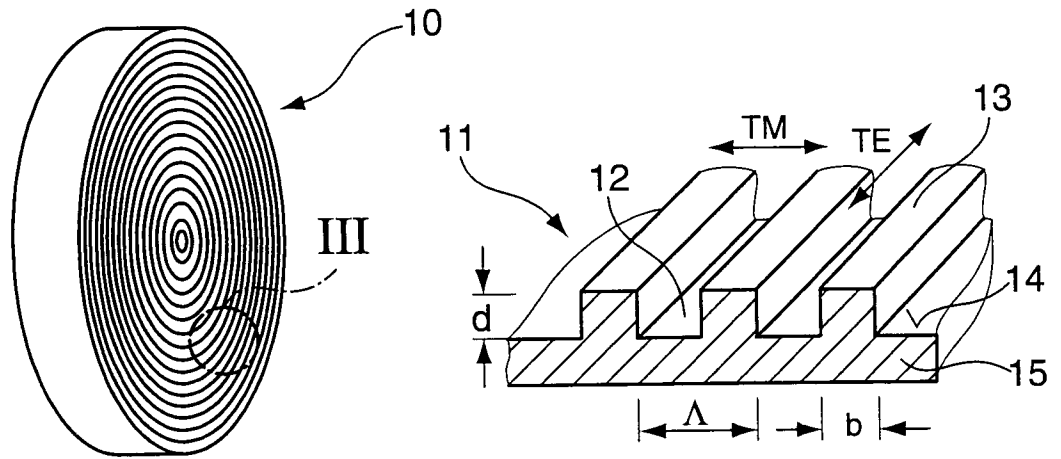


Fig. 4a

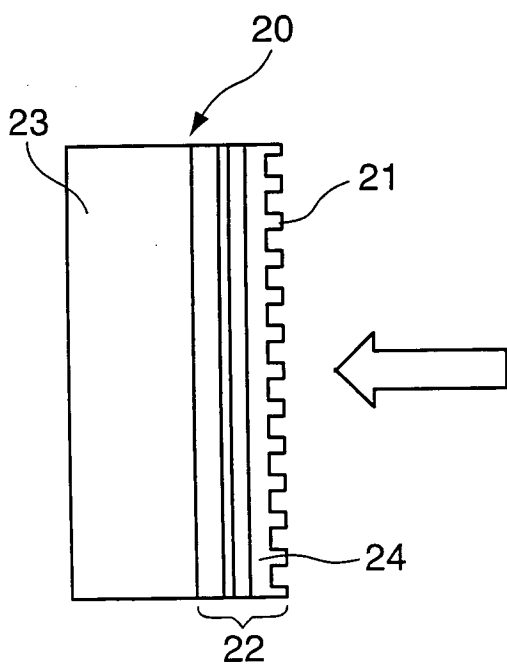


Fig. 4b

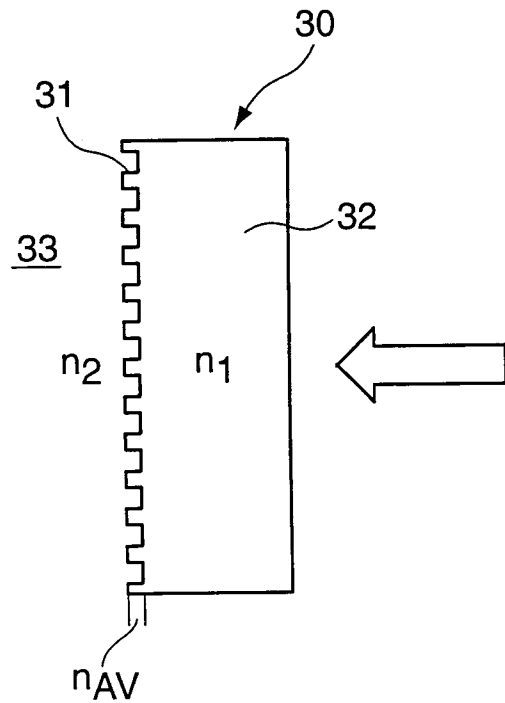


Fig. 4c

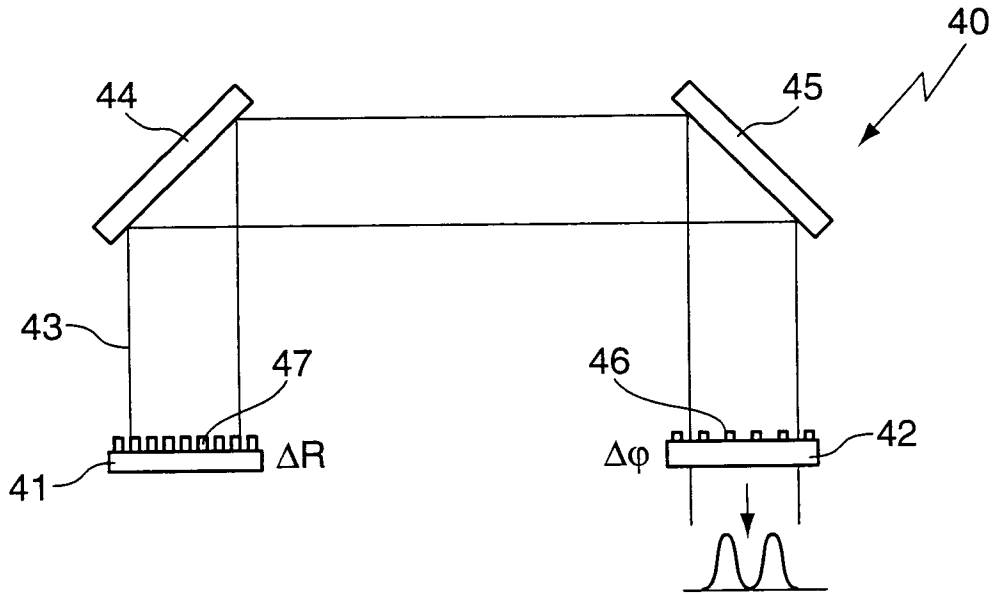


Fig. 5a

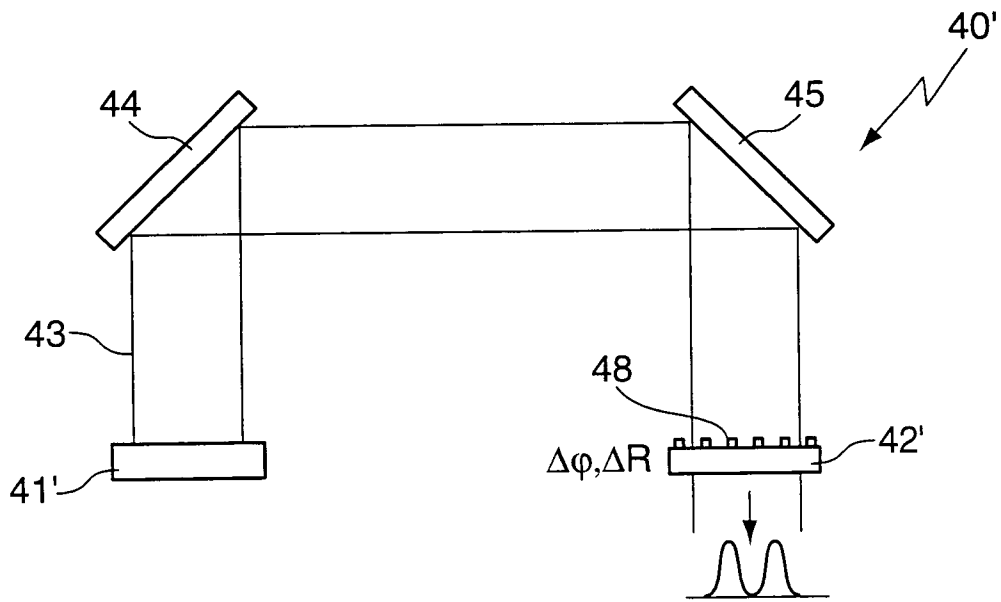


Fig. 5b

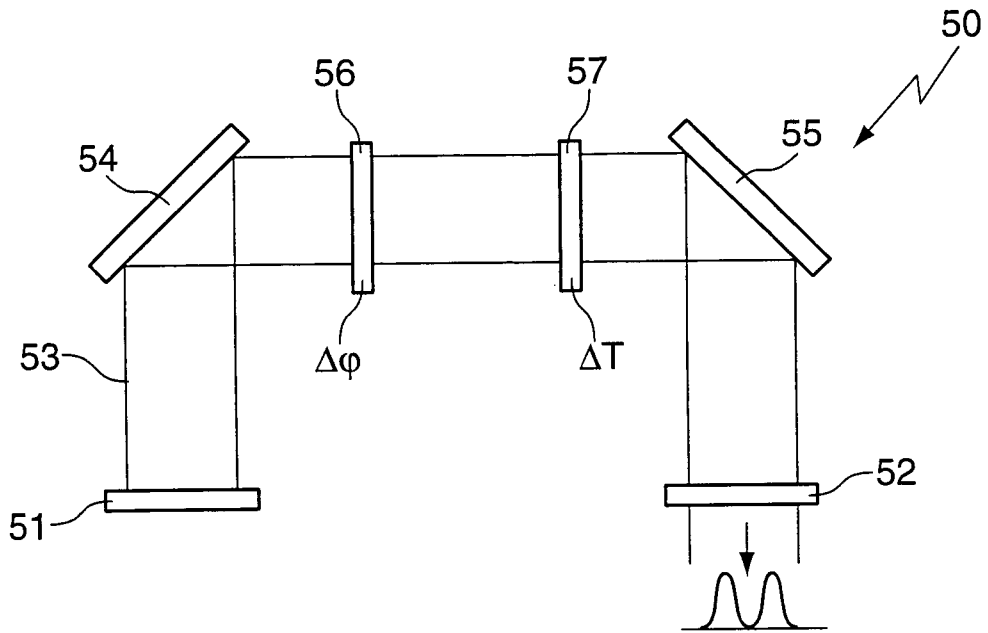


Fig. 6a

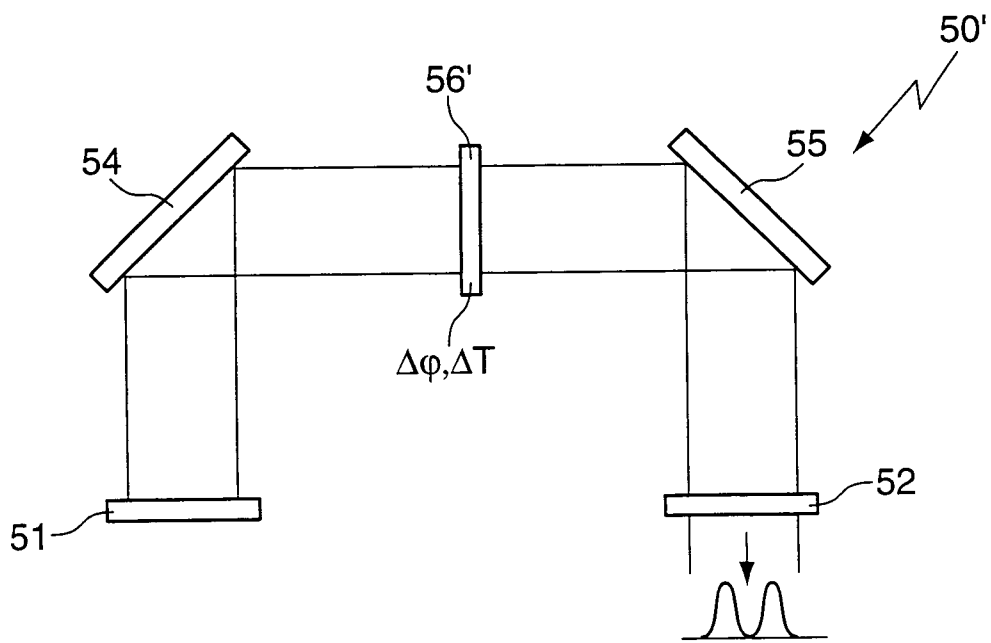


Fig. 6b

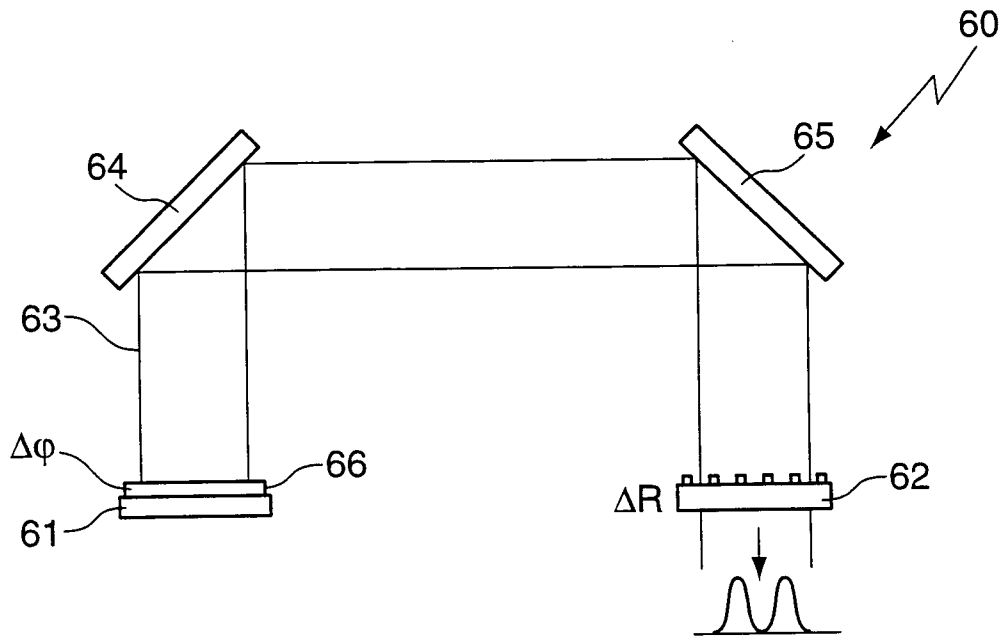


Fig. 6c

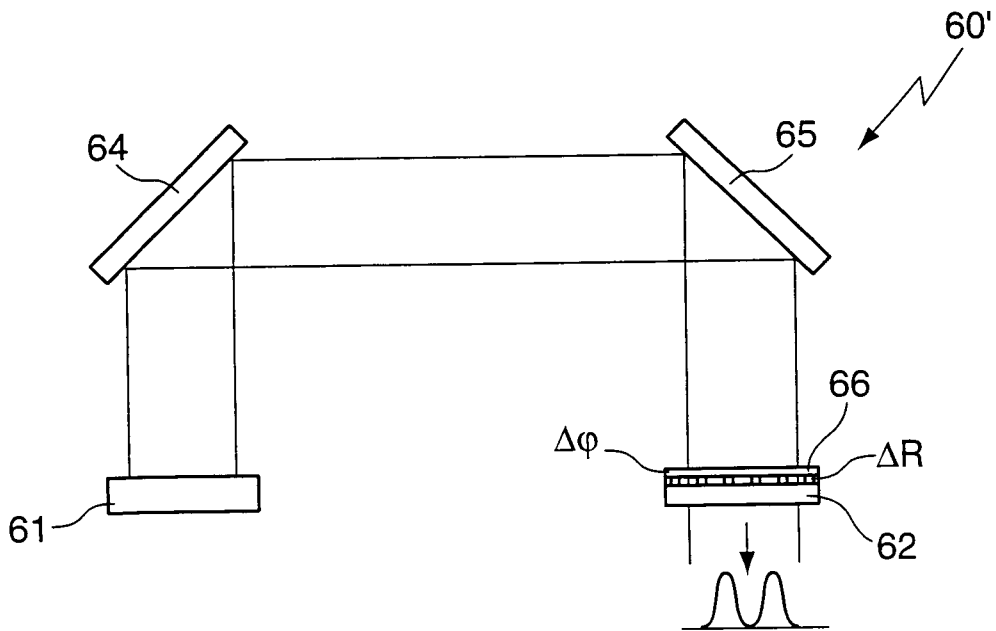


Fig. 6d

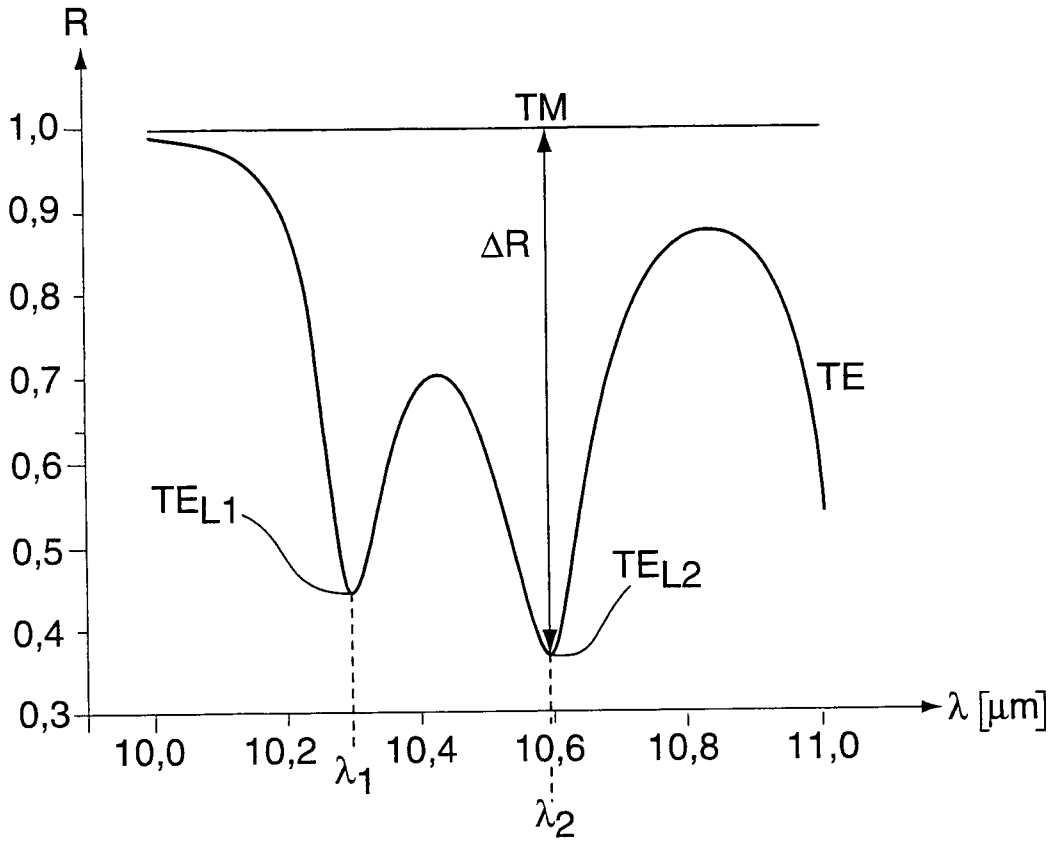


Fig. 7a

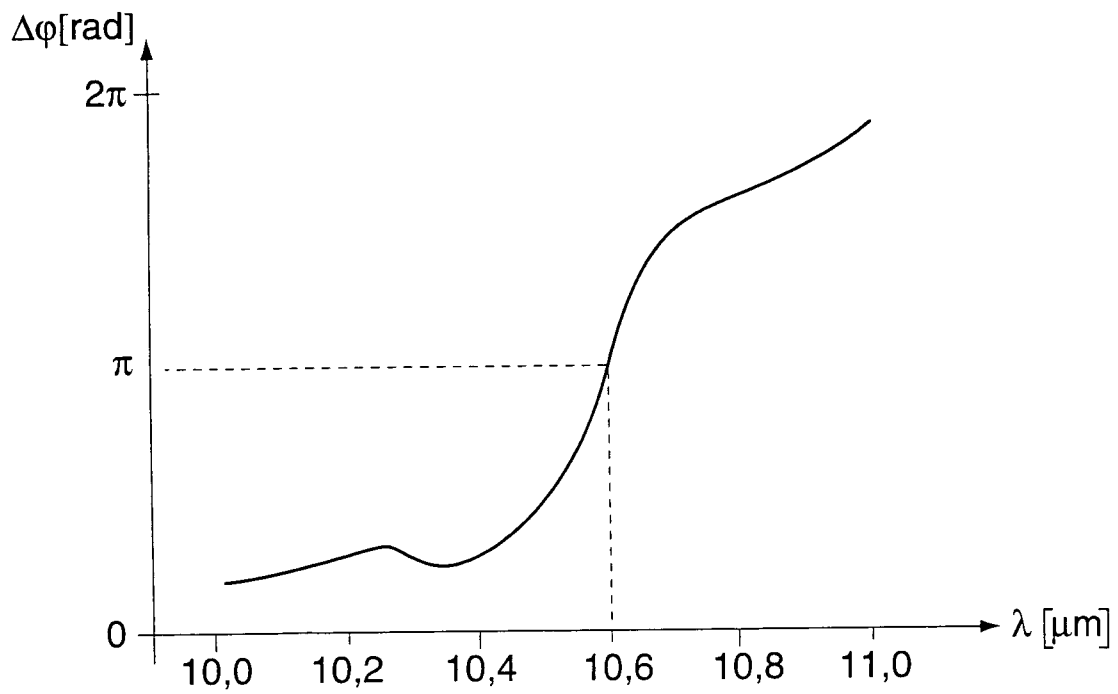


Fig. 7b

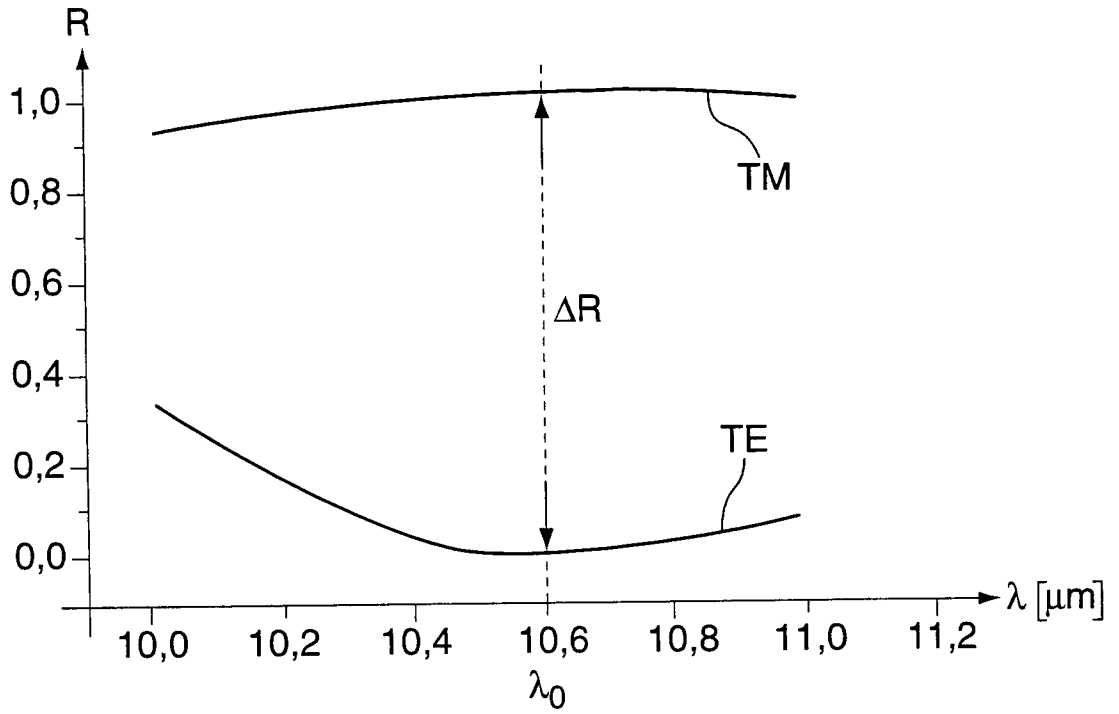


Fig. 8a

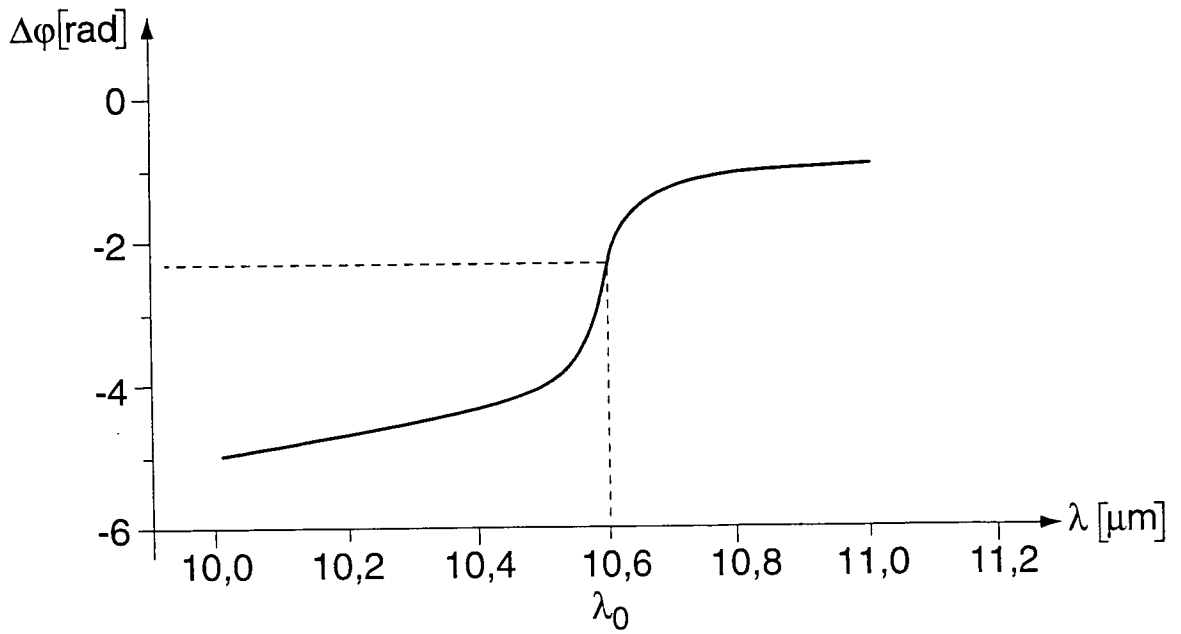


Fig. 8b