



(12) **Offenlegungsschrift**

(21) Aktenzeichen: **10 2011 000 941.8**
(22) Anmeldetag: **25.02.2011**
(43) Offenlegungstag: **30.08.2012**

(51) Int Cl.: **H01S 5/12 (2006.01)**
H01S 5/36 (2006.01)
H01S 3/213 (2006.01)
H01S 5/18 (2006.01)

(71) Anmelder:
**Fraunhofer-Gesellschaft zur Förderung der
angewandten Forschung e.V., 80686, München,
DE**

(74) Vertreter:
**Olgemöller, Luitgard, Dipl.-Chem. Dr.rer.nat.,
81545, München, DE**

(72) Erfinder:
Döring, Sebastian, 14471, Potsdam, DE;
Kollosche, Matthias, 14473, Potsdam, DE;
**Stumpe, Joachim, Dr., 14641, Nauen, DE; Kofod,
Guggi, Dr., 10961, Berlin, DE**

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

WO 2007/ 090 842 A2

**James L. Wilbur et al.: Elastomeric Optics. In:
Chem. Mater., 8, 1996, 1380 - 1385.**

**Manuel Aschwanden et al.: Diffractive
Transmission Grating Tuned by Dielectric
Elastomer Actuator. In: IEEE PHOTONICS
TECHNOLOGY LETTERS, VOL. 19, NO. 14, 2007,
S. 1090 - 1092.**

**Manuel Aschwanden et al.: Polymeric,
electrically tunable diffraction grating based on
artificial muscles. In: OPTICS LETTERS, Vol. 31,
No. 17, 2006, S. 2610 - 2612.**

Prüfungsantrag gemäß § 44 PatG ist gestellt.

Die folgenden Angaben sind den vom Anmelder eingereichten Unterlagen entnommen

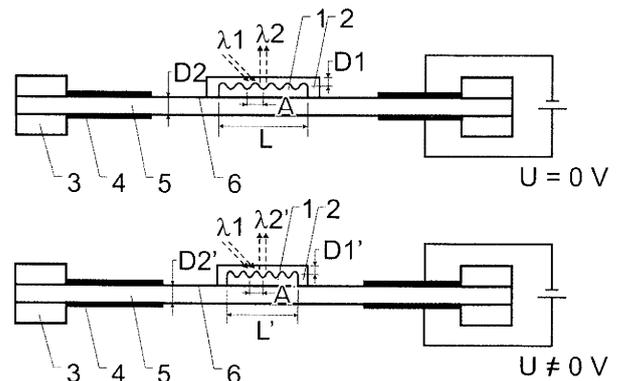
(54) Bezeichnung: **Polymerlaser mit spannungsgesteuerter Einstellung der Laserwellenlänge**

(57) Zusammenfassung: Die Erfindung betrifft ein Laserbauteil, umfassend

(a) ein elastomeres, dielektrisches Substrat (5), das mit mindestens einem flächigen, entgegengesetzt gepolten Elektrodenpaar (4) derart versehen ist, dass eine Oberfläche (6) des Substrats (5) bei Anlegen einer Spannung an das Elektrodenpaar gedehnt und/oder gestaucht wird,

(b) ein optisches Gitter, das als Resonatorstruktur des Lasers dient und sich über eine Fläche mit einer Länge (L) auf oder in der genannten Oberfläche des Substrats (5) erstreckt,
sowie

(c) ein laseraktives Medium,
wobei das optische Gitter (b) und das laseraktive Medium (c) zusammen die Funktion eines DFB-Lasers besitzen.



Beschreibung

[0001] Die vorliegende Erfindung betrifft einen spannungsgesteuerten kontinuierlich wellenlängeneinstellbaren Dünnschichtlaser auf der Basis organischer Komponenten, der nach dem Prinzip des "Distributed Feedback" (DFB) arbeitet. Der Laser befindet sich auf oder in einem elektroaktiven Substrat, welches auf dem Prinzip eines dielektrischen Elastomer-Aktors beruht. Die spannungsgesteuerte Verformung des Elastomer-Aktors wird zur Verformung (Stauchung/Streckung) der Resonanzstruktur des Dünnschichtlasers (Oberflächengitter, Volumengitter) benutzt. Durch die spannungsgesteuerte Dehnung oder Stauchung des dielektrischen Elastomer-Aktors erfolgt die Änderung der Resonanzstruktur, in bevorzugten Ausführungsformen der Periode des Gitters, wodurch sich wiederum die Emissionswellenlänge des Lasers verschiebt. Damit ist die direkte und besonders einfache spannungsgesteuerte Verschiebung und Einstellung der Emissionswellenlänge eines einzigen Lasers über den gesamten optischen Verstärkungsbereich des benutzten Farbstoffsystems möglich. Arrays verschiedener Laser auf einem Elastomer-Aktor, die mit verschiedenen Wellenlängen arbeiten, erweitern das Spektrum an emittierbaren Laserstrahlen noch weiter.

[0002] Kommerziell verfügbare Laser mit verstellbarer Wellenlänge waren auf den verschiedensten technischen Gebieten von großem Nutzen, beispielsweise in der optischen Nachrichtentechnik oder für die Detektion von chemischen und insbesondere biochemischen Stoffen. Es fehlte daher in jüngerer Zeit nicht an Versuchen, solche Laser aufzufinden.

[0003] Wellenlängeneinstellbare Laser sind bisher auf Basis sehr verschiedener Prinzipien konstruiert worden. M. Ozaki et al. in *Advanced Materials* 15 (12), S. 974 (2003) nutzten die Einwirkung eines elektrischen Feldes auf ein ferroelektrisches, chirales, smektisches Flüssigkristallmaterial, die zu einer Veränderung der Ganghöhe (pitch) der Flüssigkristall-Helices führt, um eine Verschiebung der Wellenlänge eines Laserfarbstoff-Dotanden im Flüssigkristallmaterial zu bewirken. Brueck et al. konstruierten einen optischen Pump laser auf Basis von Halbleitermaterialien, dessen oberste Schicht ein Bragg-Gitter mit parabelförmig auseinanderlaufenden Gitterlinien aufwies. Die Laser-Lichtquelle ließ sich über die unterschiedlichen Gitterlinien-Abstände des Pump lasers hinweg verschieben, so dass sich in Abhängigkeit von der Position der Laserquelle unterschiedliche Emissionswellenlängen erhalten ließen (US 2008/0240174 A1). S. Klinkhammer et al. zeigten in *Applied Physics B* 97, S. 787 (2009) einen kontinuierlich tunbaren organischen Halbleiter-DFB-Laser, bei dem die Verschiebung der Wellenlänge ebenfalls durch ein Verschieben der Laser-Lichtquelle über den Laser bewirkt wird, wobei es jedoch nicht

der Gitterabstand des Bragg-Gitters ist, der sich über die Länge des Lasers hinweg verändert, sondern die Höhe des Gitters, das in Form eines Keils auf einem geätzten Glasuntergrund aufgebracht ist.

[0004] Es ist bekannt, die optischen Eigenschaften optischer Elemente mit Hilfe von elektrisch dehn- oder stauchbaren, dünnen Elastomerfolien zu beeinflussen. WO2010/78666 und WO2010/78662 offenbaren eine optische Vorrichtung, bei der ein starres optisches Element auf einem vorgespannten Polymerfilm aufgebracht ist. Durch Aufbringen einer Spannung auf den Polymerfilm mit Hilfe von Elektroden expandiert dieser, was zu einer lateralen Verschiebung des optischen Elements führt. EP 2 239 792 schlägt die Verwendung von einem oder mehreren derartigen Polymerfilmen zum Positionieren von optischen Fasern oder dergleichen vor. Dabei sind die Fasern durch ein durchgehendes Loch im Polymerfilm geführt, das sich beim Aufbringen einer Spannung auf die Elektroden verschiebt.

[0005] Schon früher schlugen J. L. Wilbur et al. in *Chem. Mater.* 8, S. 1380 (1996) vor, Gitter, Spiegel oder Linsen aus Polydimethylsiloxan-(PDMS-)Elastomer zu formen und mechanisch zu strecken oder zu stauchen, um deren optische Eigenschaften zu verändern.

[0006] Gemäß WO 2007/090842 A2 wird auf eine mit Elektroden versehene, elastomere Aktor-Folie (einen "Aktor") ein Brechungsgitter aufgebracht. Beim Anlegen einer Spannung expandiert die Folie, was zu einer entsprechenden Deformation des Gitters führt. Ähnliche Anordnungen mit Transmissions- bzw. Brechungsgittern offenbaren M. Aschwanden et al., *Optics Letters* 31 (17), S. 2610 (2006) und M. Aschwanden et al., *IEEE Photonics Technology Letters* 19 (14), S. 1090 (2007). Als elektroaktives Material wird ein dielektrisches Acryl-Elastomer vorgeschlagen, das mit Elektroden aus einem mit leitfähigen Kohlenstoffpartikeln (Carbon-Black) gemischtem Silikonol versehen ist. Als Material für das Brechungsgitter dient ein in einer Master-Form vernetztes Elastomer (Elastosil von Wacker), als dasjenige für das Transmissionsgitter PDMS.

[0007] Z. Li, Z. Zhang et al., *Optics Express* 14 (22), S. 10494 (2006) beschreiben einen optofluidischen DFB-Farbstofflaser, bei dem ein Bragg-Gitter in einem mit einem flüssigen Laserfarbstoff gefüllten Mikrokanal ausgebildet ist. Das Gitter wie auch das Substrat (der Chip) bestehen aus PDMS. Durch das Wirken einer mechanischen Spannung sowie die Verwendung zweier verschiedener Farbstoffe konnte die Wellenlänge des emittierten Lichts um fast 60 nm von gelb nach rot verschoben werden. B. Wenger et al. beschreiben in *Applied Physics Letters* 97 (19), S. 3303 (2010) einen mechanisch verstimmbaren DFB-Laser, für den ein Benzothiadiazol-Farbstoff

in eine mechanisch verstretchbare PDMS-Matrix verkapselt wurde. In M. R. Weinberger et al., *Advanced Materials* 16 (2), S. 130 (2004) ist ein kontinuierlich durchstimmbarer Laser beschrieben. Hierfür wird ein Elastomer aus einem Copolymerisat von 4-Vinylbenzylthiocyanat und Butadien hergestellt. Für den Laser wurde das Copolymer mit einem Laserfarbstoff vermischt und auf ein PDMS-Substrat aufgebracht. Danach wurde ein Gitter in das Elastomer eingeschrieben. Aufgrund der Flexibilität der Materialien lassen sich diese dehnen oder komprimieren, was zu einer Änderung der Gitterlinien-Abstände führt. Auch der von D. Pisignano et al. in *Physical Review B* 70 (20), S. 5206 (2004) beschriebene DFB-Laser nutzt PDMS als Substrat. Ein flexibler Polymerwellenleiter-Laser mit veränderlichen optischen Eigenschaften wurde von K.-J. Kim et al. entwickelt, siehe *Optics Express* 18 (8), S. 8392 (2010).

[0008] Die vorstehend erwähnten Vorschläge zur Herstellung von durchstimmbaren Lasern besitzen allesamt den Nachteil eines sehr komplizierten Aufbaus. Sie sind deshalb für kommerzielle Anwendungen nicht geeignet. Für solche Anwendungen besteht jedoch ein hoher Bedarf, darunter auch im Bereich von Wegwerf- oder Einmalartikeln für chemische, biochemische oder medizinische Untersuchungen.

[0009] Den Erfindern der vorliegenden Erfindung ist überraschenderweise das Auffinden eines sehr einfach gebauten Lasers gelungen.

[0010] Gelöst wird die Aufgabe durch die Bereitstellung eines Laser-Bauteils, umfassend (a) ein elastomeres, dielektrisches Substrat (5), das mit mindestens einem flachigen, entgegengesetzt gepolten Elektrodenpaar (4) derart versehen ist, dass eine Oberfläche (6) des Substrats (5) bei Anlegen einer Spannung an das Elektrodenpaar gedehnt und/oder gestaucht wird, (b) ein optisches Gitter, das als Resonatorstruktur des Lasers dient und sich über eine Fläche mit einer Länge (L) auf oder an der genannten Oberfläche des Substrats (5) oder im Substrat (5) erstreckt, sowie (c) ein laseraktives Medium, wobei das optische Gitter (b) und das laseraktive Medium (c) zusammen die Funktion eines DFB-Lasers besitzen.

[0011] Die Erfindung stellt in einer ersten Ausführungsform einen Laser mit verschiebbarer Wellenlänge bereit, der sich für die vorgenannten Zwecke gut eignet. Weitere Ausführungsformen betreffen Arrays solcher Laser, mit denen sich entweder, bei gleicher Ausgestaltung der einzelnen Laser, viele Messungen gleichzeitig durchführen lassen oder die, bei Verwendung von Lasern mit unterschiedlichen optischen Eigenschaften, einen weiten Bereich von emittierbaren Wellenlängen aufweisen.

[0012] Die beigefügten Figuren erläutern die Erfindung, wobei [Fig. 1](#) eine erste Variante des Aufbaus

des Lasers mit elektrisch verschiebbarer und einstellbarer Wellenlänge zeigt, basierend auf einem elastischen DFB-Laser auf einem elektroaktiven Substrat,

[0013] [Fig. 2](#) eine zweite Variante eines solchen Aufbaus zeigt, bei dem das elektroaktive Substrat aus einem gestapelten Aktor besteht, der durch seine Konfiguration in mechanischer Dehnung arbeitet und der nicht auf eine Vorstretchung der Elastomerfolie angewiesen ist;

[0014] [Fig. 3](#) den Aufbau eines Laser-Arrays mit mehreren Lasern auf einem elektrisch steuerbaren Elastomerfilm zeigt,

[0015] [Fig. 4](#) den Querschnitt eines Lasers gemäß [Fig. 1](#) zeigt, und zwar in vorgespannter Form ([Fig. 4a](#)) und in durch Anlegen einer elektrischen Spannung entspannter Form ([Fig. 4b](#)),

[0016] [Fig. 5](#) den Stauchungs-Dehnungs-Modus darstellt: Die obere Figur zeigt die Stauchung des DFB-Lasers durch das elektroaktive Substrat, die mittlere den DFB-Laser ohne Verformung und die untere die Streckung des DFB-Lasers durch das elektroaktive Substrat,

[0017] [Fig. 6](#) ein Graph mit der spektralen Position der Emissionswellenlänge λ [nm] eines DFB-Lasers wie im Beispiel angegeben für verschiedene Aktorspannungen ist,

[0018] [Fig. 7](#) ein Graph ist, der die relative Wellenlängenverschiebung $\Delta\lambda$ des DFB-Lasers in Abhängigkeit von der verwendeten elektrischen Aktorspannung U für den "Stauchungs"-Modus für zwei aufeinanderfolgende Zyklen zeigt,

[0019] [Fig. 8](#) eine schematische Darstellung ist, die verschiedene Emissionsrichtungen eines DFB-Lasers zweiter Ordnung (senkrecht und parallel zur Gitterebene) veranschaulicht, und

[0020] [Fig. 9](#) eine Auswahl an möglichen Geometrien des elektroaktiven Substrats zur gezielten, einfachen, spannungsgesteuerten Einstellung der Laserwellenlänge im "Stauchungs"- und "Zug"-Modus sowie in einer Kombination dieser Modi zeigt.

[0021] Das Laser-Bauteil umfasst ein flexibles elektroaktives Substrat (einen Dielektrischen Elastomer Aktor, DEA) in Kombination mit einem aufgetragenen elastischen, organischen Dünnschichtlaser. Der Dünnschichtlaser weist ein optisches Gitter (Oberflächen- oder Volumengitter), das als Resonatorstruktur des Lasers dient und eine optische Rückkopplung nach dem Prinzip der verteilten Rückkopplung (Distributed Feedback – DFB) ermöglicht, sowie eine laseraktive Schicht auf, die auf eine optische Anregung mit Pumplicht hin kohärentes Licht enger Bandbrei-

te emittiert. Die Wellenlänge des emittierten Lichts kann durch das Anlegen einer elektrischen Spannung kontinuierlich über den gesamten spektralen Verstärkungsbereich der laseraktiven organischen Farbstoffschicht (z. B. organische Farbstoffe in Polymeren oder konjugierte Polymere) verschoben werden.

[0022] Die Änderung der Wellenlänge wird durch eine elektrisch gesteuerte Verformung des elastischen Dunnschichtlasers ausgelöst, die von der Aktuati-on des elektroaktiven Substrats hervorgerufen wird. Durch die Verformung des Lasers werden die Peri-ode des Gitters, die Schichtdicke aller Einzelschichten sowie der effektive Brechungsindex des gesamen Wellenleiters geändert. Die Periode des Gitters, die Schichtdicke und der Brechungsindex legen die Emissionswellenlänge des Lasers fest. Die Emissionswellenlänge eines DFB-Lasers, der mit einem Oberflächengitter ausgestattet ist, hängt nach der Bragg-Bedingung von der Gitterperiode Λ , dem effektiven Brechungsindex des Wellenleitersystems n_{eff} , auf dem der Laser beruht, und der verwendeten Beugungsordnung m der Rückkopplung ab:

$$\lambda_B = \frac{2n_{eff}\Lambda}{m}$$

[0023] Während der Verformung ändert sich der effektive Brechungsindex durch die Dickenänderung der Schichten geringfügig. Hauptsächlich ändert sich jedoch die Gitterperiode. Wie an der Formel zu sehen ist, gibt es einen linearen Zusammenhang zwischen Gitterperiode und Emissionswellenlänge λ_B des Lasers, was zur Verschiebung der Laserwellenlänge führt. Durch die flächenwirksame elektrostatische Wechselwirkung (Maxwell Stress) der entgegengesetzt geladenen parallelen Elektroden kann die quadratische Abhängigkeit von Periodenänderung und angelegter elektrischer Spannung beschrieben werden. Dies ist im Stand der Technik beschrieben.

[0024] Das Gitter kann als 1-dimensionales Oberflächengitter (1D) ausgebildet sein, also z. B. in x-Richtung eine Höhenmodulation z. B. mit einer rechteckigen oder sinusförmigen Struktur aufweisen, während die Oberfläche des Gitters in y-Richtung gleichbleibend ausgebildet ist. Die Gitterstruktur kann stattdessen in zwei Dimensionen variabel sein (2D-Gitter), z. B. eine "Eierkarton"-Struktur besitzen. In einer weiteren Variante der Erfindung ist das Gitter nicht als Oberflächen-, sondern als Volumengitter ausgebildet (3D-Struktur, z. B. in Form eines photonischen Kristalls). In allen diesen Ausführungsformen kann das Gitter in verschiedenen Bereichen eine unterschiedliche Periodenlänge haben, wobei diese Periode bei 2D- und 3D-Gittern in jeweils einer, zwei oder gegebenenfalls allen drei Raumrichtungen unterschiedlich sein kann. In allen diesen Fällen kann der Laser durch Anwendung des Prinzips der elektro-mechanischen

Deformation zur Erzeugung von elektrisch verstellbarem Laserlicht nach dem DFB-Prinzip genutzt werden.

[0025] Das elektroaktive Substrat besteht aus einem weichen dielektrischen Polymerfilm, der im vorgestreckten Zustand fixiert wird. Für die Aktuati-on des Substrats werden in einer ersten Variante flexible Elektroden in einer ausgewählten Geometrie beidseitig des Films aufgebracht und mit elektrischen Kontakten versehen. Eine schematische Zeichnung dieses Aufbaus ist in [Fig. 1](#) gezeigt.

[0026] Eine zweite Variante, die mit oder ohne Vorstreckung des elektroaktiven Substrats funktioniert, nutzt eine gestapelte Konfiguration (siehe [Fig. 2](#)). Die Idee der gestapelten Aktoren ist bereits aus der Literatur bekannt (G. Kovacs, L. Daring, S. Michel, G. Terrasi, "Stacked dielectric elastomer actuator for tensile force transmission", *Sensors and Actuators A: Physical*, 155, (2), Oktober 2009, S. 299–307). Diese Konfiguration bietet den Vorteil, dass eine Vorstreckung als wesentliches Funktionsprinzip des elektroaktiven Substrats vermieden werden kann.

[0027] Bei dieser Variante werden mehrere Elastomerefilme mit aufgebrachten Elektroden gestapelt, oder es wird ein massives Elastomersubstrat mit eingearbeiteten Elektroden eingesetzt. Mit Hilfe einer elektrischen Kontaktierung und durch das Anlegen einer elektrischen Spannung erfährt das Substrat eine Dickenveränderung. Durch diese Geometrieveränderung und den Ansatz des Volumenerhalts erfährt das Substrat gleichzeitig eine Vergrößerung in der Grundfläche, was direkt mit einer Veränderung der Resonatorwellenlänge des Lasers gekoppelt werden kann. Dieses Prinzip bietet ebenfalls die Möglichkeit zu einer weiteren Miniaturisierung.

[0028] Die Messergebnisse (s. [Fig. 6](#) und [Fig. 7](#)), erhalten mit Hilfe eines Substrats in Form der ersten Variante, zeigen an, dass eine Veränderung der Laserwellenlänge durch das direkte Anlegen einer elektrischen Spannung zwischen den Elektroden ausgelöst wird. Die Spektren verändern sich mit der Änderung der Elektrodenspannung, was auf eine Verkürzung der Gitterperiode zurückgeführt werden kann. Die Wellenlänge des kohärenten Lichts konnte bis zu ca. 8% zu kleineren Wellenlängen hin verschoben werden ([Fig. 6](#)). Gegebenenfalls kann auch eine Verschiebung zu größeren Wellenlängen hin bewirkt werden.

[0029] Mit der vorliegenden Erfindung wird damit erstmals ein elastischer DFB-Laser auf DEA-Strukturen bereitgestellt, dessen Strukturkomponenten ausschließlich aus Polymermaterialien hergestellt sein können und der eine kontinuierliche elektrische Verstellbarkeit und Feineinstellung der Laserwellenlänge durch Deformation der Lasergeometrie mittels elek-

trischer Felder (spannungsgesteuerte Laserwellenlängenverschiebung) ermöglicht. Wie aus den nachstehenden Ergebnissen ersichtlich, konnte eine Verschiebung der Emissionswellenlänge eines DEA-DFB-Lasers von bis zu 8% bei ca. 600 nm gezeigt werden. (s. [Fig. 7](#)). Erstmals steht damit auch ein DFB-Laser zur Verfügung, der eine dynamische und schnelle Durchstimmung der Emissionswellenlänge mit Einstellzeiten im ms-Bereich ermöglicht.

[0030] Die Vorteile des erfindungsgemäßen Lasers können unter anderem in folgendem gesehen werden:

- die Herstellung eines polymeren Dünnschicht- bzw. Mikrolasers in Form eines reinen Polymerbauteils ist kostenuaufwendig, weil ausschließlich polymertypische Herstellungsschritte eingesetzt werden müssen;
- der Laser erlaubt eine optimale Integration in Mikrosysteme; es sind keine mechanischen Teile, keine komplizierten Justage- und Einkoppelprozesse bei kurzen Distanzen erforderlich;
- die Verstellbarkeit der Laserwellenlänge erfolgt durch eine Variation der Lasergeometrie: der Periode, der Amplitude sowie der Schichtdicke von Gitter und Wellenleiter (mit integrierter laseraktiver Schicht);
- durchgängig polymerbasierte Herstellungsmethode von Mikrofluidikkomponenten und Anregungsquelle. Der Laser kann z. B. direkt in die Wand eines Mikrofluidikkanals integriert werden, sodass sich die zu untersuchenden Flüssigkeiten am Laser ablagern und die Emission beeinflussen können; der Laser kann aber auch so angebracht sein, dass er in einen Wellenleiterkanal emittiert, der wiederum von einem Mikrofluidikkanal gekreuzt und gestört wird; hierbei kann die wellenlangenabhängige Transmission durch den Wellenleiter untersucht werden;
- man erhält breite spektrale optische Verstärkungsbereiche durch die Verwendung organischer Farbstoffe; eine Verstellbarkeit der Laserwellenlänge über den gesamten VIS-Bereich ist durch Kombination verschiedener organischer Farbstoffe als laseraktive Materialien mit Gittern unterschiedlicher Perioden und unterschiedlichen Wellenleiterkonfigurationen für unterschiedliche Brechungsindizes möglich;
- eine hohe spektrale Auflösung und Sensitivität wird erreicht;
- niedrige Laserschwellen sind möglich;
- die Vorrichtung emittiert kohärentes Licht;
- die einsetzbaren Laserfarbstoffe besitzen eine ausreichende Lebenszeit;
- zur Anregung des Lasers ist optisches Pumpen mit kommerziell zugänglichen Lasern, Laserdioden oder LEDs möglich;
- eine multiplexe und simultane Anregung mit hoher Orts-, Zeit- und Wellenlängenauflösung ist erreichbar;

- der Laser besitzt ein sehr geringes Gewicht;
- "Wegwerf"-Anwendungen sind möglich, daher können die Laser als "Disposables" eingesetzt werden.

[0031] Der erfindungsgemäße Laser eignet sich unter anderem für die folgenden Anwendungen:

- als Lichtquelle für optische Sensoren, insbesondere für analytische Zwecke (z. B. in der Chemie und in der Biochemie);
- als Verformungssensor (z. B. thermisch verursacht, zur Detektion von Deformationen, von z. B. eingetragener Feuchtigkeit oder von Umweltparametern). Dabei zeigt der Laser die jeweilige Veränderung an, weil sich diese Änderung unmittelbar in einer Dehnung (oder gegebenenfalls auch Verkürzung) der Gitterperiode niederschlägt, und ist daher selbst der Sensor;
- für die allgemeine Spektroskopie (z. B. Raman, FTIR-VIS-UV). Hierfür ist insbesondere die Möglichkeit einer multi-spektralen, schmalbandigen Anregung wichtig;
- Anwendungen, für die eine leicht wegzunehmende und an einen anderen Ort bringbare und damit "tragbare" Vorrichtung benötigt wird: Der Laser ist, auch in Kombination mit gegebenenfalls vorhandenen zusätzlichen integrierten optischen Elementen, besonders klein und besitzt ein besonders niedriges Gewicht, weshalb beispielsweise eine "Point-of-Care"-Spektrometrie möglich ist (z. B. in sogenannten "lab-on-a-chip" Systemen in der Bioanalytik);
- für die Telekommunikation, als Teil eines Testgeräts; in der Kommunikationsschalttechnik zur Erzeugung unterschiedlicher Wellenlängen;
- als Lichtquelle für Quantum Computing/optische Rechner;
- als Lichtquelle für Interferometrie (Weglängenveränderungen, Höhenunterschiede), für stark verbesserte Genauigkeit;
- zur exakten Bestimmung der Materialsteifigkeit des optisch aktiven Systems, bestehend aus dem optischen Gitter mit der laseraktiven Schicht. Die Materialsteifigkeit kann über die Vermessung der Wellenlängenverschiebung des Laserlichts bei verschiedenen Spannungen erfolgen. (Dieser Ansatz zur Bestimmung von Materialsteifigkeiten von dünnen polymeren Filmen kann in weiten Bereichen von Industrie und Wissenschaft verwendet werden, insbesondere für Bereiche die sich mit der Beschreibung von Polymeren in der Mikro-mechanik beschäftigen).

[0032] In [Fig. 1](#) ist der Aufbau eines erfindungsgemäßen Laser-Bauteils mit einem Substrat in Form der ersten Variante schematisch in perspektivischer Aufsicht dargestellt. [Fig. 2](#) zeigt den prinzipiellen Aufbau der zweiten Substratvariante. [Fig. 3](#) zeigt eine Ausführungsform eines Laser-Arrays. [Fig. 4](#) zeigt einen Schnitt durch das Bauteil gemäß [Fig. 1](#), und zwar ein-

mal im vorgespannten Anfangszustand (**Fig. 4a**) und nach Anlegen einer Spannung (**Fig. 4b**). Die Anordnung der Bauteile dieser Figuren entspricht der Variante 400 in **Fig. 9**. Die in den **Fig. 1** bis **Fig. 4** eingezeichneten Symbole haben die folgenden Bedeutungen:

Bezugszeichenliste

1	elastischer Film mit Oberflächenreliefgitter
2	aktive Laserschicht (z. B. organischer Farbstoff/Polymer, konjugiertes Polymer, Mischsystem)
3	Rahmen zur Stabilisierung der Polymeraktorschicht
4	flexible Elektroden, beispielsweise bestehend aus einer leitfähigen Mischung von Silikonöl und Carbon Black Partikeln (Carbon Black Grease)
5	vorgestreckte Polymeraktorschicht
6	Oberfläche des Substrats
$\lambda 1$	Pumplichtwellenlänge
$\lambda 2$	Emissionslichtwellenlänge der Wellenlänge λ_2 des ungestauchten Gitters
$\lambda 2'$	Emissionslichtwellenlänge des gestauchten Gitters
$\lambda 3$	Emissionslichtwellenlänge der Wellenlänge λ_3
$\lambda 4$	Emissionslichtwellenlänge der Wellenlänge λ_4
$\lambda 5$	Emissionslichtwellenlänge der Wellenlänge λ_5
$\lambda 6$	Emissionslichtwellenlänge der Wellenlänge λ_6
D1	Schichtdicke der aktiven Laserschicht im ungestauchten Zustand
D1'	Schichtdicke der aktiven Laserschicht im gestauchten Zustand
D2	Schichtdicke der vorgestreckten Polymeraktorschicht ohne angelegte Spannung
D2'	Schichtdicke der vorgestreckten Polymeraktorschicht mit angelegter Spannung
DFB1	DFB-Laser mit Gitterperiode A1 und aktivem Material M1
DFB2	DFB-Laser mit Gitterperiode A2 und aktivem Material M2
DFB3	DFB-Laser mit Gitterperiode A3 und aktivem Material M3
DFB4	DFB-Laser mit Gitterperiode A4 und aktivem Material M4
L	Länge der elastischen Schicht mit Oberflächenreliefgitter im ungestauchten Zustand
L'	Länge der elastischen Schicht mit Oberflächenreliefgitter im gestauchten Zustand
A	Periode des ungestauchten Gitters
A'	Periode des gestauchten Gitters

[0033] Aus den Figuren ist eine erste Ausgestaltung des erfindungsgemäßen Lasers ersichtlich, realisiert in Kombination mit der ersten Substrat-Variante: Ein

elektroaktives Substrat, bestehend aus einem vorge-dehnten Elastomerfilm, wird an einer Rahmenstruktur fixiert. Er ist beidseitig über einen frei wählbaren Teil seiner Fläche hinweg mit dehnbaren Elektroden beschichtet. Dieses elektroaktive Substrat wird durch das Anlegen einer Spannung verformt. Die Verformung beruht darauf, dass sich die einander gegenüberliegenden Elektroden durch elektrostatische Wechselwirkungen anziehen und daher einen Druck auf das elastomere Material zwischen sich ausüben. Dieses gibt dem Druck nach und weicht aus. Daher dehnen sich die mit Elektroden versehenen Bereiche aus. Dies hat wiederum zur Folge, dass die freien Bereiche (ohne Elektroden) gestaucht werden, weil dadurch die ursprüngliche Vorspannung des Gesamtsystems verringert wird.

[0034] Die zweite Substratvariante unterscheidet sich von der ersten durch eine gestapelte Elektrodenkonfiguration, wobei sich die Elektroden parallel zueinander im Substrat befinden, was sich insbesondere durch das Stapeln mehrerer Elastomerfilme mit aufgebrachtten Elektrodenpaaren realisieren lässt. Durch eine geschickte elektrische Kontaktierung kann durch das Anlegen einer elektrischen Spannung eine Dickenveränderung des Elastomerfilmstapels induziert werden. Die Geometrieveränderung führt bei gleichzeitigem Volumenerhalt zu einer Vergrößerung der Grundfläche des Elastomerfilmstapels. D. h. es kommt zu einer Ausdehnung der Fläche des Systems. Das Besondere dieser Substratvariante bzw. dieses gestapelten Aktors ist, dass keine Vorstreckung der Elastomerfilme mehr nötig ist, um eine Aktuierung zu erreichen. Die nachfolgenden Ausführungen gelten für beide Varianten.

[0035] Auf dem Elastomeraktor, also dem Substrat, wird in der genannten ersten Ausgestaltung eine dehnbare, aus zwei Lagen bestehende Schicht aufgebracht. Die Oberseite der weichen unteren Schicht ist mit einer Oberflächengitterstruktur versehen. Dessen Fläche kann je nach den Abmessungen des Lasers schwanken; eine sinnvolle Untergrenze liegt bei wenigen 100 μm Länge und wenigen 10 μm Breite. Die obere Schicht ist eine laseraktive Schicht. Deren Dicke schwankt in der Regel zwischen etwa 100 nm und etwa 10 μm . Sie ändert sich während der Aktuierung. Durch eine optische Anregung der Schichtstruktur mittels Pumplicht kommt es zu einer optischen Rückkopplung und einer Emission von kohärentem Laserlicht. Hierdurch ergibt sich die Möglichkeit zur direkten elektrischen Ansteuerung und Verschiebung der Emissionswellenlängen des Lasers.

[0036] In einer konkreten Ausführungsform dieser Ausgestaltung wird das elektroaktive Substrat wie folgt hergestellt: Eine Elastomerschicht (**5**), bestehend aus einem dielektrischen Gummi (z. B. einem dielektrischen Acrylpolymer wie VHB4910, bei dem es sich um einen elastomeren, industriellen Klebe-

film handelt, oder einem Styrol-Dreiblock-Copolymer wie Poly-styrene-ethylenbutadienestyrene (SEBS), das unter der Bezeichnung Dryflex 500120 vertrieben wird), wird vorgedehnt und auf einem starren Rahmen (3) festgeklebt. Damit wird der Zustand der Vordehnung festgehalten. Die Elektroden (4) bestehen hier aus einer leitfähigen Mischung von Silikonöl und elektrisch leitfähigen Kohlenstoffpartikeln (Carbon Black Grease). Die Erfindung ist jedoch nicht auf dieses spezifische Material beschränkt; jede Zusammensetzung aus einem weichen, dehnbaren Material (tragende Matrix) mit leitfähigen Partikeln (z. B. leitfähigem Kohlenstoff, Kohlenstoff-Nano-Röhrchen usw.), oder auch die direkte Anwendung von leitfähigen Polymeren in einer Elastomer-Matrix als Elektrodenmaterial ist möglich, gegebenenfalls auch dehnbare metallische Schichten sowie Techniken zum Einschreiben von Elektroden wie die Ionenimplantation. Dieses Material kann direkt aufgetragen werden. Die elektrischen Zuleitungen der (Hoch-)Spannung zu den Elektrodenbereichen werden in der genannten konkreten Ausführungsform direkt mittels klebender Metallfolien erstellt. Andere Methoden zur Zuführung von Ladungsträgern in den Elektrodenbereichen stehen selbstverständlich ebenfalls zur Verfügung, wie z. B. die kontaktlose Ladungsträgerinjektion. Auf diesem Substrat wird der DFB-Laser wie folgt hergestellt: Ein Oberflächenreliefgitter wird auf übliche Weise hergestellt, beispielsweise durch Einschreiben des Gitters mittels holographischer Belichtung in einen azobenzehaltigen Film. Das Relief kann im Querschnitt eine beliebige Form besitzen, z. B. sinusförmig, gegebenenfalls aber auch z. B. rechteckig oder trapezförmig sein. Diese Gitterstruktur wird in die Oberfläche eines weichen Gummifilms (z. B. aus Polydimethylsiloxan, PDMS) abgeformt, beispielsweise durch Übertragung der Gitterstruktur mit Hilfe von Replica Molding. Es ist wichtig, dass der gepragte Elastomerfilm eine hydrophile Oberfläche besitzt. Dies lässt sich vorzugsweise durch eine Plasmabehandlung erreichen. Anschließend wird das laseraktive Material aus einer Lösung auf die Gummischicht aufgebracht, z. B. aufgeschleudert. Bei diesem Material kann es sich z. B. um ein Polymer, das mit einem Laserfarbstoff dotiert ist, ein konjugiertes Polymer wie z. B. Poly[2-methoxy-5-(2'-ethyl-hexyloxy)-1,4-phenylene vinylene] (MEHPPV), eine Mischung aus MEHPPV und F8BT (F8BT ist Poly[(9,9-dioctylfluorenyl-2,7-diyl)-alt-co-(1,4-benzo{2,1',3}-thiadiazol)], ein konjugiertes Polymer, das im UV absorbiert und im blau-grünen Spektralbereich emittiert) oder dergleichen handeln. Eine Mischung aus MEHPPV und F8BT ist übrigens wegen ihrer niedrigen Laserschwelle beispielsweise zur Anregung mit LEDs, Blitzlampen etc. geeignet. Beim Aufschleudern bildet sich eine sehr dünne laseraktive Schicht (2). Das Schichtsystem kann auf dem elektroaktiven Substrat oder separat hergestellt werden, muss im zweiten Fall jedoch noch auf das elektroak-

tive Substrat aufgebracht werden. Damit ist die Herstellung abgeschlossen.

[0037] Die Erfindung betrifft in dieser Ausgestaltung demnach ein Laserbauteil, bestehend aus einem elektroaktiven Substrat mit einer integrierten Gitterstruktur sowie einer elastischen laseraktiven Schicht, die auf eine optische Anregung mit Pumplicht einer gewissen Wellenlänge hin kohärentes Licht mit geringer Bandbreite emittiert. Die Wellenlänge des Lichts kann durch das Anlegen einer elektrischen Spannung an das elektroaktive Substrat kontinuierlich über den gesamten Verstärkungsbereich der laseraktiven Schicht verschoben werden. Sofern sich die laseraktive Schicht auf denjenigen Bereichen des Substrats befindet, die sich beim Anlegen einer elektrischen Spannung zusammenziehen (siehe z. B. 400, 420, 440 oder 450 in Fig. 9), wird die Wellenlänge des Laserlichts dabei zu kleineren Wellenlängen hin verschoben. Wenn die laseraktive Schicht auf den Bereichen angeordnet wird, auf denen sich die Elektroden befinden (siehe zum Beispiel 410, 425, 430, 435 der Fig. 9) oder wenn sich der DFB-Laser auf einem gestapelten Aktor (siehe Fig. 2) befindet, bei dem keine vorgestreckten elektroaktiven Polymerfilme nötig sind, wird die Laserwellenlänge beim Anlegen der Spannung zu höheren Wellenlängen hin verschoben. Gegebenenfalls können Teile des Lasers auf den Elektroden und andere Teile des Lasers neben den Elektroden angeordnet sein, so dass beim Anlegen von Spannung an die Elektroden ein Teil des Lasers höhere Wellenlängen emittiert, ein anderer dagegen niedrigere (siehe z. B. die Beispiele 415, 470 oder 500 in Fig. 9).

[0038] Neben der voranstehend beschriebenen Ausführungsform ist eine Vielzahl weiterer Ausführungsformen der Erfindung möglich. Beispielsweise kann der "inaktive" Bereich des Elastomersubstrats nicht nur in seinem Mittelbereich mit der Laserstruktur bedeckt sein, sondern diese kann sich im gesamten Raum zwischen den Elektroden erstrecken, siehe z. B. Variante 405 in Fig. 9. Diese Ausführungsform ermöglicht eine Miniaturisierung sowie eine Verbesserung des Dehnungsverhaltens.

[0039] Neben unterschiedlichen Geometrien des Feldes, auf dem sich der aktive Laser befindet, können auch unterschiedliche Elektrodengeometrien realisiert werden, z. B. eine zirkuläre Elektrodengeometrie oder eine kompakte quadratische Geometrie. Beispiele hierfür können ebenfalls der Fig. 9 entnommen werden.

[0040] Die Elektroden müssen sich dabei nicht unbedingt in einem äußeren Bereich des Substrats befinden, sondern sie können auch mittig oder das Substrat in einer Länge teilend angeordnet werden, siehe z. B. die Variante 410. Es sollte klar sein, dass die Varianten der Fig. 9 in jedem Falle nur Beispiele

sind, denen der Fachmann durch Kombinieren viele weitere Möglichkeiten der geometrischen Ausgestaltung entnehmen kann.

[0041] In einer besonderen Ausführungsform der Erfindung können mehrere DFB-Laser nebeneinander auf dem elektroaktiven Substrat angebracht sein (dies ist in [Fig. 3](#) und den Varianten 450 und 470 der [Fig. 9](#) gezeigt). Dabei können diese Laser entweder identische Eigenschaften aufweisen, um z. B. eine Vielzahl von Proben gleichzeitig auf bestimmte Analyte untersuchen zu können, was im bioanalytischen Bereich von Interesse sein kann. Alternativ können sie unterschiedliche Eigenschaften besitzen. Hier gibt es wiederum eine Vielzahl von Variationsmöglichkeiten. So können unterschiedliche laseraktive Materialien, Gitterperioden oder dergleichen genutzt werden, um unterschiedliche optische Eigenschaften der einzelnen Laser zu bewirken. Dabei können die einzelnen Laserelemente elektrisch und optisch einzeln angesteuert werden, so dass eine Kombination mehrerer Spektralbereiche in einem Bauteil sowie eine gleichzeitige Emission mehrerer Lichtwellenlängen möglich wird.

[0042] Auch die Ordnung der Laser kann variiert werden. Die Erfindung umfasst Laser-Bauteile, in denen Laser mit DFB erster Ordnung (bei denen der Mode in der Filmebene genutzt wird), DFB zweiter Ordnung (bei denen das senkrecht zur Filmebene ausgekoppelte Licht genutzt wird) und DFB höherer Ordnungen (mit unter verschiedenen Winkeln ausgekoppeltem Licht) zur Anwendung kommen. Bei Laser-Bauteilen mit mehreren Laserelementen kann auch diese Eigenschaft unter den einzelnen Elementen variiert werden. [Fig. 8](#) zeigt verschiedene Emissionsrichtungen eines DFB-Lasers (DFB zweiter Ordnung) senkrecht und parallel zur Gitterebene; das untere Bild stellt die Auskopplung einer Emissionsrichtung des kohärenten Lichts (310) in eine Faseroptik (320, 330) dar.

[0043] Die Laser-Bauelemente der vorliegenden Erfindung können mit weiteren optischen Elementen zur Strahlführung und/oder -formung (Linsen, (Beugungs-)Gitter, Wellenleiter etc.) kombiniert werden. Diese Elemente können entweder außerhalb des elektroaktiven Substrats oder auf diesem angebracht sein, so dass sie entweder optisch unveränderlich bleiben oder aber wie der Laser selbst ihre Form aufgrund der Dehnung oder Stauchung des Aktors ändern und damit auch in ihren optischen Eigenschaften variiert werden können.

[0044] Die Laser der vorliegenden Erfindung können von verschiedenen Pumplatern (Festkörperlasern, Farbstofflasern, Laserdioden etc.), statt dessen aber auch von einer beliebigen anderen möglichen Pumplichtquelle (LED, Blitzlampe etc.) angeregt werden. Auch eine elektrische Anregung ist denkbar.

[0045] Sofern die laseraktive Schicht flexibel ist, kann sie in beliebiger Weise wie aus dem Stand der Technik aufgebaut sein. Beispielsweise kann sie aus einem lichtdurchlässigen flexiblen Polymer gebildet sein, das mit einem Laserfarbstoff dotiert ist. Statt dessen kann sie aus einem konjugierten Polymer aufgebaut sein und dabei insbesondere ein Forster-System darstellen, bei dem ein Farbstoff (insbesondere ein konjugiertes Polymer) optisch angeregt wird und daraufhin seine Energie auf einen zweiten Farbstoff (z. B. ebenfalls ein konjugiertes Polymer) überträgt, welches dann seinerseits die Laseremission zeigt. Die laseraktive Schicht kann auch Quantenpunkte, z. B. metallische Nanopartikel, aufweisen. Diese Variante ist für alle Arten von Gittern möglich.

[0046] Die Gitterstruktur der weichen, dehnbaren Schicht, auf der sich die Schicht mit dem laseraktiven Material befindet, kann durch geeignete Maßnahmen direkt in diese Schicht eingeschrieben werden, bevor oder nachdem sie auf dem elastomeren Substrat befestigt wurde. Sie kann stattdessen dadurch erzeugt werden, dass ein unvernetztes Vorläufermaterial in eine Master-Form gefüllt und darin zu dem elastomeren Material verfestigt wird. Auf diese Weise kann eine Vielzahl von Bauteilen schnell und einfach hergestellt werden. Die Master-Form wird in bekannter Weise beispielsweise durch holographisches Belichten eines Azogruppen enthaltenden Materials hergestellt.

[0047] In einer zweiten Ausgestaltung der Erfindung wird ein Oberflächengitter nicht in einer separaten Schicht auf dem elastomeren Material, sondern direkt auf der Oberfläche des elastomeren Materials ausgebildet. Dies gelingt, indem ein Vorläufermaterial des elektroaktiven Materials in flüssiger Form (z. B. in Lösung) in die Form eines Oberflächengitters eingefüllt wird. Durch Vernetzung des Vorläufermaterials, beispielsweise unter langsamem Verdunsten des Lösungsmittels, bildet sich ein festes elektroaktives Substrat, in das das gewünschte Oberflächengitter bereits eingeschrieben ist. Auf der dieser Gitter aufweisenden Oberfläche wird sodann das laseraktive Material aufgebracht. Diese Ausgestaltung der Erfindung kann in allen voranstehend beschriebenen Ausführungsformen realisiert werden, mit Ausnahme derjenigen, die Merkmale der elastomeren, auf das Substrat aufgetragenen Schicht betreffen. Sie ist besonders für die Verwendung in Kombination mit der zweiten Substratvariante geeignet, da sich die wie oben beschrieben mit dem Gitter präparierte Schicht als oberste Schicht einer Stapelung von Elastomerfilmen sehr gut eignet.

[0048] Eine spezifische, dritte Ausgestaltung der Erfindung ähnelt der zweiten, unterscheidet sich jedoch von dieser dadurch, dass auf das Gitter in der Oberfläche des elektroaktiven Substrats kein laseraktives Material aufgebracht werden muss. Stattdessen wird

das Polymer, aus dem das elektroaktive Substrat aufgebaut ist, direkt mit einem Laserfarbstoff dotiert. Wie bei der zweiten Ausgestaltung wird das elektroaktive Material auch in diesem Falle in flüssiger Form in die Master-Form eines Oberflächengitters eingefüllt mit der Abwandlung, dass die Flüssigkeit bereits mit Laserfarbstoff versetzt ist. Der Laserfarbstoff kann ein eingemischter Dotand sein, gegebenenfalls aber auch kovalent an die oligomeren oder monomeren Vorläufer des Polymers angebunden werden, aus dem das elastomere Substrat aufgebaut ist. Für diese Ausgestaltung ist darauf zu achten, dass das elastomere Substrat eine ausreichende Lichtdurchlässigkeit aufweist; da jedoch eine Vielzahl von Elastomeren in dünner Schicht lichtdurchlässig ist, gibt es hier nur wenige Beschränkungen.

[0049] In einer besonderen Ausführungsform, die unabhängig von den drei vorgenannten Ausgestaltungen ist, wird das flüssige Material der elektroaktiven Schicht vor der Verfestigung mit einem Flüssigkristallmaterial gemischt. Durch das Aufbringen eines elektrischen Feldes (mit Hilfe der Aktorelektroden, oder mit Hilfe weiterer Elektroden) können die Flüssigkristalle ausgerichtet werden. Dann kann nur noch Licht mit einer bestimmten Polarisationsrichtung passieren. Da das Laserlicht eines DFB-Lasers stark polarisiert ist, kann dann, wenn die Richtung der Lichtpolarisation und die der Flüssigkristalltransmission senkrecht zueinander ausgerichtet sind, das Laserlicht den Aktor nicht passieren. Ohne das Anlegen einer Spannung sind die Flüssigkristalle zufällig orientiert und lassen das Laserlicht durch das Substrat hindurchtreten. Eine geringe Spannung an den Flüssigkristallen führt zur Ausrichtung eines bestimmten Anteils aller Flüssigkristalle, wodurch ein Teil des Laserlichts passieren kann. Durch das Anlegen einer Spannung und deren Variation kann damit die Intensität des emittierten Laserlichts moduliert werden. Auch die Lichtpolarisation lässt sich über diesen Weg gezielt modulieren.

[0050] Durch die Veränderung der mechanischen Spannung lassen sich im Übrigen auch nichtlineare optische Effekte ändern. Die Modulation solcher Effekte kann der erfindungsgemäße Laser ebenfalls bewirken.

[0051] Das nachstehende Ausführungsbeispiel erläutert die erste Ausgestaltung näher, ohne beschränkend zu sein.

[0052] Eine handelsübliche dielektrische Elastomerfolie (VHB4910 von 3M) wurde in einen Rahmen mit Abmessungen von 5 × 5 cm eingespannt. An zwei einander gegenüberliegenden Seiten der Folie wurde beidseitig (siehe [Fig. 1](#)) über eine Fläche von 4,0 × 1,0 cm Elektrodenmaterial aufgebracht, das aus einer Mischung von Silikonöl und leitfähigen Kohlenstoffpartikeln (Ketjenblack) bestand. Ein kommerzielles

sinusförmiges Oberflächengitter (von Thorlabs) mit den obigen Parametern wurde mittels PDMS kopiert. Aus dieser "Masterform" wurde ein Gitter aus Polydimethylsiloxan (PDMS) abgeformt. Die Dicke der PDMS-Schicht betrug etwa 70 µm. Die PDMS-Schicht wurde mit Abmessungen von 1,0 × 1,0 cm mit der Gitterseite nach oben zeigend mittig auf die freie Fläche der Elastomerfolie aufgebracht. Auf diese Fläche wurde anschließend eine laseraktive Schicht aus 5 Gew.-% Pyrromethen 567 in Polyvinylacetat in Form einer Lösung in Toluol aufgeschleudert. Nach Abdampfen bzw. Verdunsten des Lösungsmittels betrug die Dicke dieser Schicht 750 nm. Das System wurde mit Laserlicht der Wellenlänge 532 nm und einer Pumpimpulswiederholrate von 100 Hz optisch angeregt. Die Laserschwelle war bei einer eingestrahelten Pumpenergie von ca. 300 µJ/cm² zu messen.

[0053] [Fig. 6](#) zeigt die spektrale Position der Emissionswellenlänge λ [nm] dieses DFB-Lasers für verschiedene Aktorspannungen. [Fig. 7](#) zeigt die relative Wellenlängenverschiebung $d\lambda$ des Lasers in Abhängigkeit von der verwendeten elektrischen Aktorspannung U für den „Stauchungs“-Modus für zwei aufeinanderfolgende Zyklen. Die Abweichungen der beiden Durchläufe beruhen auf einer geringen Veränderung der Laserschicht. Die erste Messung wurde direkt nach dem Auftragen der Schicht zu einem Zeitpunkt durchgeführt, an dem die Schicht noch weicher/elastischer war. Die zweite Messung erfolgte einen Tag später, als mögliche weichmachende Lösemittelreste aus der Schicht abgedampft waren. Spannungsgesteuerte Aktoren auf Basis des hier verwendeten industriellen Elastomers VHB4910 können 1 Million Zyklen bei 50% Aktuationsverformung und sogar 10 Millionen Zyklen bei 5% Aktuationsverformung erreichen, so dass der Laser eine extrem lange Lebensdauer besitzen sollte, die am ehesten noch durch die Lebensdauer des Farbstoffs begrenzt sein dürfte, da dieser unter optischer Anregung degradiert. Erfindungsgemäß wurden bisher Lebenszeiten mit konjugierten Polymeren von bis zu 5 Millionen Anregungspulsen gemessen.

[0054] Wie sich aus den Figuren ergibt, hängen die Wellenlängenänderung und auch die Gitterperiodenänderung quadratisch von der angelegten Spannung ab. Wellenlänge und Verformung sind proportional zueinander. Insgesamt konnte eine Stauchung um maximal 8% erreicht werden, wobei anzumerken ist, dass das hier untersuchte System noch nicht optimiert wurde. Stauchungswerte von bis zu 20% erscheinen sinnvoll, da mit solch einer Verformung der gesamte Verstärkungsbereich eines Farbstoffs abrufbar ist.

ZITATE ENHALTEN IN DER BESCHREIBUNG

Diese Liste der vom Anmelder aufgeführten Dokumente wurde automatisiert erzeugt und ist ausschließlich zur besseren Information des Lesers aufgenommen. Die Liste ist nicht Bestandteil der deutschen Patent- bzw. Gebrauchsmusteranmeldung. Das DPMA übernimmt keinerlei Haftung für etwaige Fehler oder Auslassungen.

Zitierte Patentliteratur

- US 2008/0240174 A1 [0003]
- WO 2010/78666 [0004]
- WO 2010/78662 [0004]
- EP 2239792 [0004]
- WO 2007/090842 A2 [0006]

Zitierte Nicht-Patentliteratur

- M. Ozaki et al. in Advanced Materials 15 (12), S. 974 (2003) [0003]
- S. Klinkhammer et al. zeigten in Applied Physics B 97, S. 787 (2009) [0003]
- J. L. Wilbur et al. in Chem. Mater. 8, S. 1380 (1996) [0005]
- M. Aschwanden et al., Optics Letters 31 (17), S. 2610 (2006) [0006]
- M. Aschwanden et al., IEEE Photonics Technology Letters 19 (14), S. 1090 (2007) [0006]
- Z. Li, Z. Zhang et al., Optics Express 14 (22), S. 10494 (2006) [0007]
- B. Wenger et al. beschreiben in Applied Physics Letters 97 (19), S. 3303 (2010) [0007]
- M. R. Weinberger et al., Advanced Materials 16 (2), S. 130 (2004) [0007]
- D. Pisignano et al. in Physical Review B 70 (20), S. 5206 (2004) [0007]
- K.-J. Kim et al. entwickelt, siehe Optics Express 18 (8), S. 8392 (2010) [0007]
- G. Kovacs, L. During, S. Michel, G. Terrasi, "Stacked dielectric elastomer actuator for tensile force transmission", Sensors and Actuators A: Physical, 155, (2), Oktober 2009, S. 299–307 [0026]

Patentansprüche

1. Laserbauteil, umfassend

(a) ein elastomeres, dielektrisches Substrat (5), das mit mindestens einem flächigen, entgegengesetzt gepolten Elektrodenpaar (4) derart versehen ist, dass eine Oberfläche (6) des Substrats (5) bei Anlegen einer Spannung an das Elektrodenpaar gedehnt und/oder gestaucht wird,

(b) ein optisches Gitter, das als Resonatorstruktur des Lasers dient und sich über eine Fläche mit einer Länge (L) auf oder in der genannten Oberfläche des Substrats (5) erstreckt,

sowie

(c) ein laseraktives Medium,

wobei das optische Gitter (b) und das laseraktive Medium (c) zusammen die Funktion eines DFB-Lasers besitzen.

2. Laserbauteil nach Anspruch 1, worin das elastomere, dielektrische Substrat ein Flächensubstrat (5) ist, das auf einander gegenüberliegenden Teilflächen mit dem mindestens einen Elektrodenpaar (4) versehen ist, wobei das Flächensubstrat in Ruhestellung des Bauteils vorgespannt ist und das Anlegen einer Spannung zwischen dem Elektrodenpaar eine Entspannung von nicht mit dem Elektrodenpaar versehenen Teilflächen der Oberfläche (6) bewirkt.

3. Laserbauteil nach einem der voranstehenden Ansprüche, worin das elastomere Flächensubstrat in einen Rahmen (3) oder zwischen zwei Stegen eingespannt ist.

4. Laserbauteil nach Anspruch 1, worin sich innerhalb des elastomeren, dielektrischen Substrats (5) ein oder mehrere, parallel zueinander ausgerichtete Elektrodenpaare (4) befinden, die derart angeordnet sind, dass das Anlegen einer Spannung zwischen dem oder den Elektrodenpaar(en) eine Dehnung der genannten Oberfläche (6) des Substrats bewirkt.

5. Laserbauteil nach einem der voranstehenden Ansprüche, umfassend eine elastomere Schicht (1), die auf der Oberfläche (6) des Substrats (5) aufgebracht ist und das genannte optische Gitter aufweist.

6. Laserbauteil nach einem der Ansprüche 1 bis 4, worin das genannte optische Gitter integral in der Oberfläche (6) des Substrats (5) ausgebildet ist.

7. Laserbauteil nach einem der voranstehenden Ansprüche, worin das genannte optische Gitter ein Gitter mit einer Oberflächenmodulation in einer Raumrichtung (1D-Oberflächengitter) oder ein Gitter mit einer Oberflächenmodulation in zwei Raumrichtungen (2D-Oberflächengitter) ist.

8. Laserbauteil nach Anspruch 7, worin das genannte optische Gitter die Form einer Oberfläche mit

einer Höhenmodulation im Bereich von 5–500 nm und einer Periode von 100 nm bis 1 µm, vorzugsweise von 380–800 nm besitzt.

9. Laserbauteil nach einem der Ansprüche 7 oder 8, worin das laseraktive Medium (2) aus einem elastomeren Material gebildet und auf der oberen Oberfläche des optischen Gitters aufgebracht ist.

10. Laserbauteil nach Anspruch 9, worin das laseraktive Medium (2) ein zumindest teilweise lichtdurchlässiges Polymer ist, das mit einem Laserfarbstoff dotiert ist oder in das Moleküle eines Laserfarbstoffs einpolymerisiert sind, oder worin das laseraktive Medium ein konjugiertes Polymer oder eine Kombination zweier konjugierter Polymere in Form eines Förstermediums oder ein elastomeres Material ist, in dem metallische Nanopartikel (Quantenpunkte) dispergiert sind.

11. Laserbauteil nach einem der Ansprüche 1 bis 6, worin das genannte optische Gitter ein Volumengitter (3D-Gitter) ist.

12. Laserbauteil nach einem der Ansprüche 7, 8 und 10, worin das laseraktive Medium aus einem Laserfarbstoff oder metallischen Nanopartikeln (Quantenpunkten) besteht, wobei der Laserfarbstoff bzw. die metallischen Nanopartikel entweder in dem Material der auf dem elastomeren Flächensubstrat aufgetragenen elastomeren Schicht oder in dem Material des elastomeren Flächensubstrats vorhanden sind oder in das Material der auf dem elastomeren Flächensubstrat aufgetragenen Schicht bzw. in das Material des elastomeren Flächensubstrats einpolymerisiert sind.

13. Laserbauteil nach einem der voranstehenden Ansprüche, worin das optische Gitter so ausgestaltet ist, dass der Laser ein DFB-Laser erster Ordnung ist.

14. Laserbauteil nach einem der voranstehenden Ansprüche, worin das optische Gitter so ausgestaltet ist, dass der Laser ein DFB-Laser zweiter oder höherer Ordnung ist.

15. Laserbauteil nach einem der voranstehenden Ansprüche, worin der DFB-Laser auf einer Oberfläche (6) des elastomeren Flächensubstrats (5) angeordnet ist, die nicht mit Elektrodenmaterial beschichtet ist.

16. Laserbauteil nach einem der Ansprüche 1 bis 14, worin der DFB-Laser auf einer Oberfläche des elastomeren Flächensubstrats (5) angeordnet ist, die mit Elektrodenmaterial beschichtet ist.

17. Laserbauteil nach einem der voranstehenden Ansprüche, worin das elastomere Flächensubstrat

(5) mindestens in Teilbereichen ein Flüssigkristall-Material enthält.

18. Laserbauteil nach einem der voranstehenden Ansprüche, worin das optische Gitter in zwei oder mehr Teilbereiche unterteilt ist.

19. Laserbauteil nach Anspruch 18, worin alle Teilbereiche des optischen Gitters identisch aufgebaut sind.

20. Laserbauteil nach Anspruch 18, worin mindestens zwei der Teilbereiche einen unterschiedlichen Aufbau besitzen, wobei die Unterschiede in mindestens einem der folgenden Eigenschaften vorhanden sind:

- (A) dem laseraktiven Medium, insbesondere der Zusammensetzung des Farbstoffs,
- (B) der Art des optischen Gitters,
- (C) der Gitterperiode,
- (D) der Ordnung des DFB-Lasers,
- (E) der Anordnung des DFB-Lasers auf oder neben der Elektroden-Beschichtung,
- (F) dem Vorhandensein von Flüssigkristallmaterial im Flächensubstrat,
- (G) der Schichtdicke des Substrats (5).

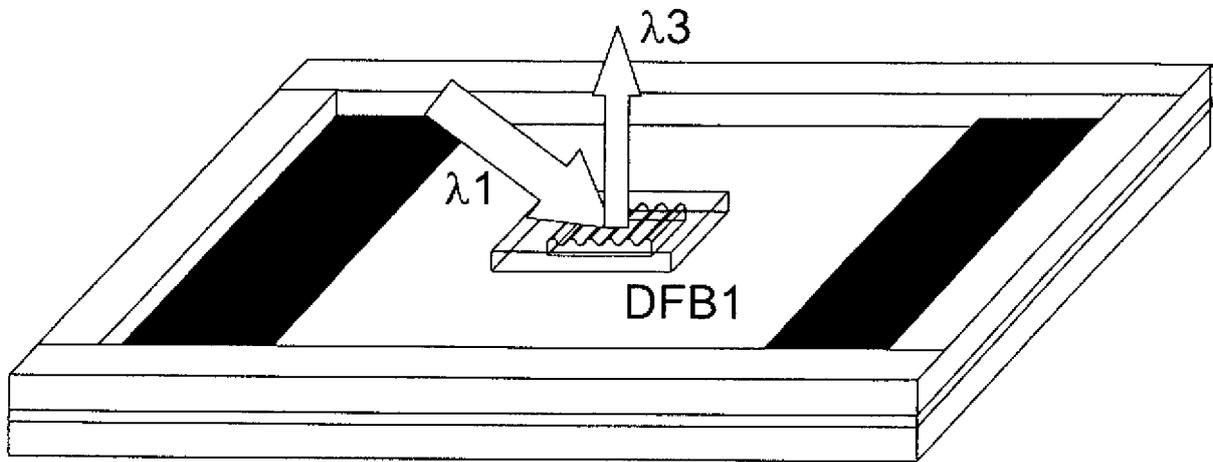
21. Laserbauteil nach einem der voranstehenden Ansprüche, weiterhin umfassend mindestens ein zusätzliches optisches Element.

22. Laserbauteil nach Anspruch 21, worin das Element ausgewählt ist unter Linsen, Gittern und Wellenleitern.

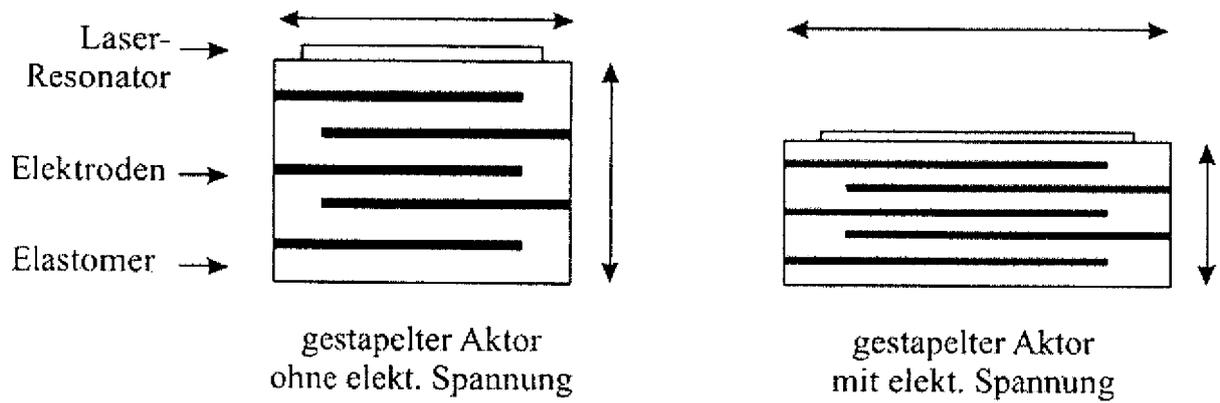
23. Laser-Bauteil nach einem der Ansprüche 21 oder 22, worin mindestens eines der zusätzlichen optischen Elemente aus einem elastischen Material besteht und derart auf dem elastomeren Flächensubstrat (5) angebracht ist, dass es bei dessen Verformung seine Form und damit gegebenenfalls mindestens eine seiner optischen Eigenschaften ändert.

Es folgen 6 Blatt Zeichnungen

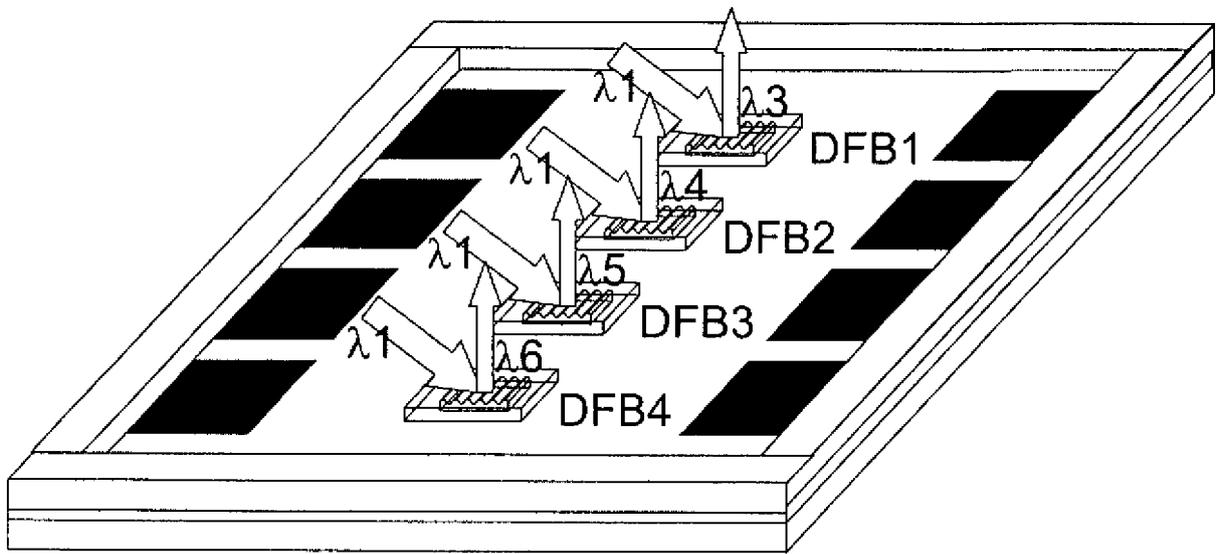
Anhängende Zeichnungen



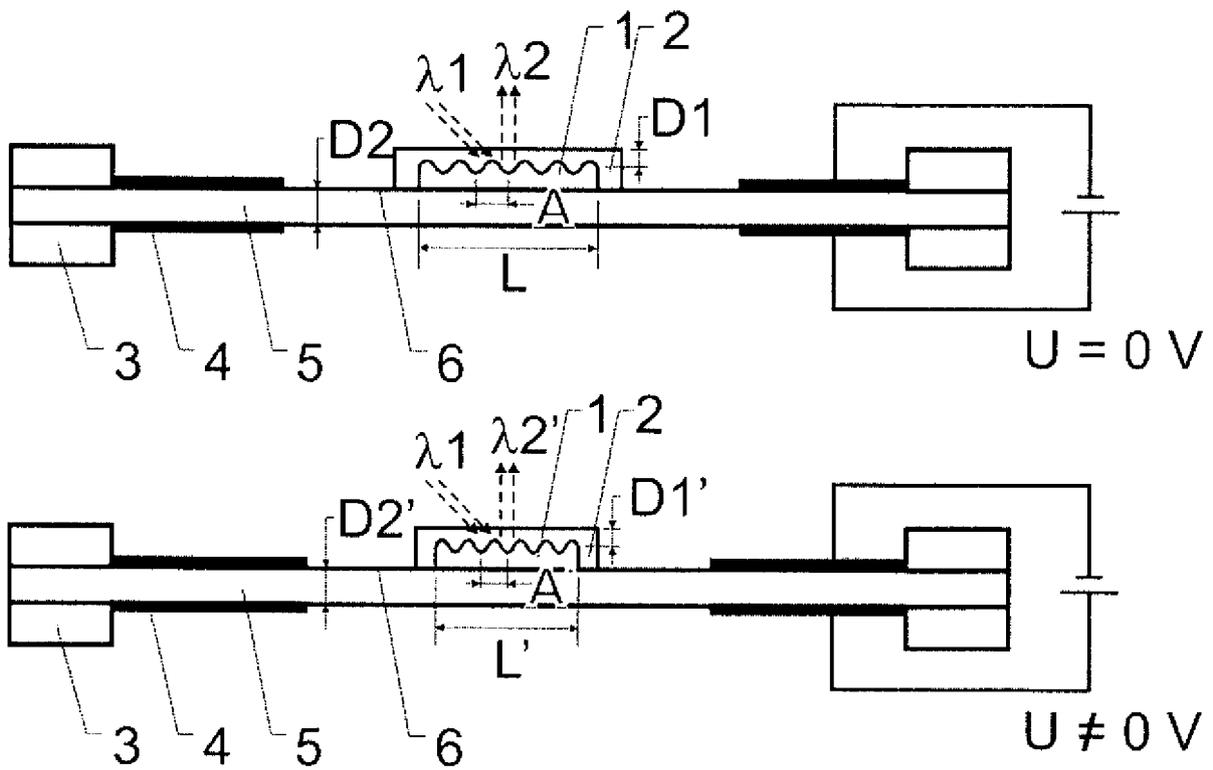
Figur 1



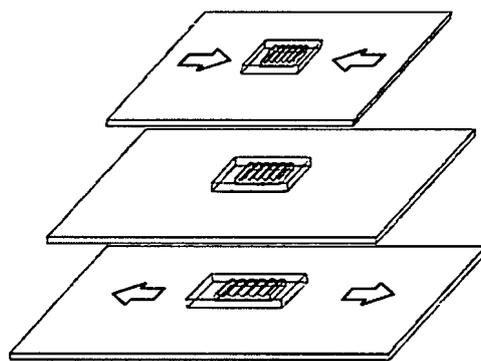
Figur 2



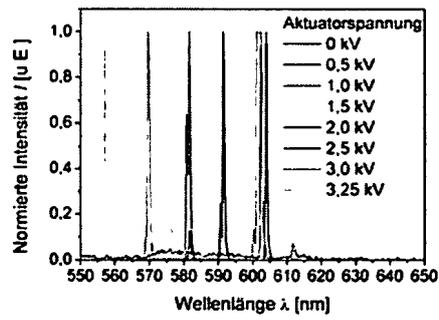
Figur 3



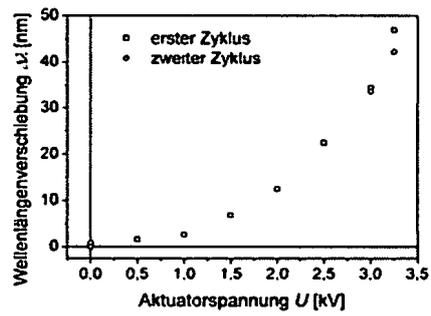
Figur 4



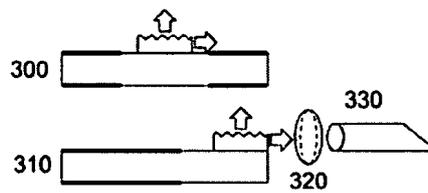
Figur 5



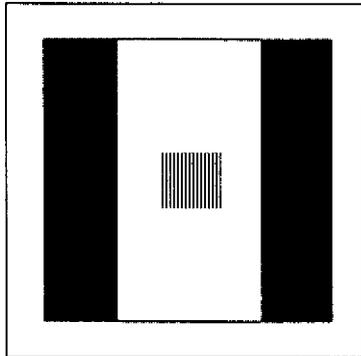
Figur 6



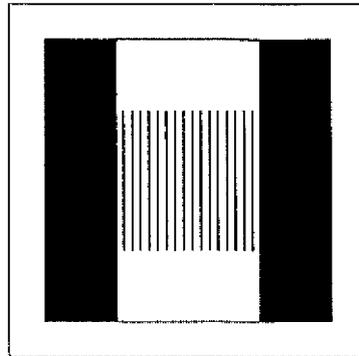
Figur 7



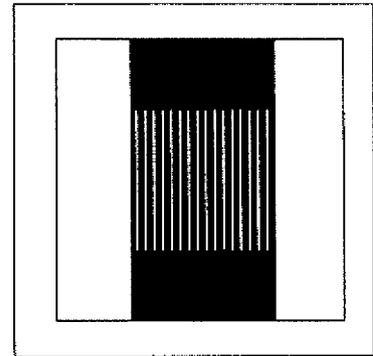
Figur 8



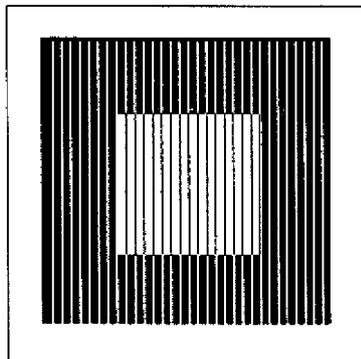
400



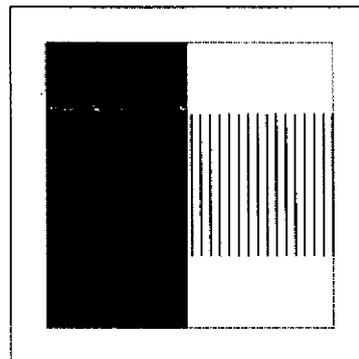
405



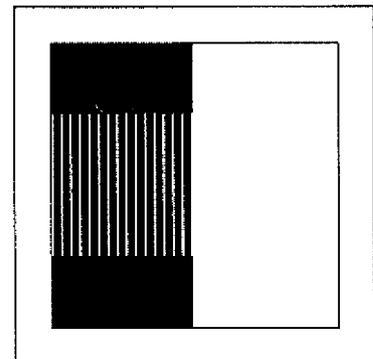
410



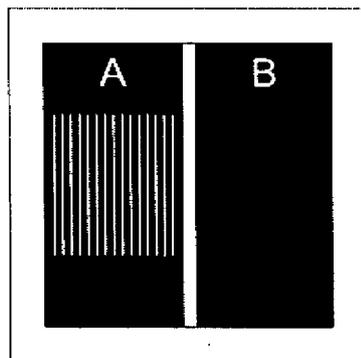
415



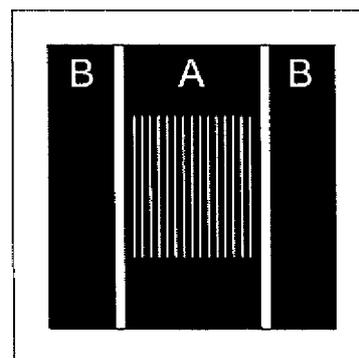
420



425

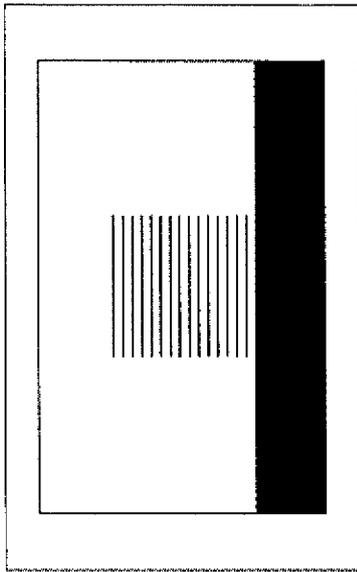


430

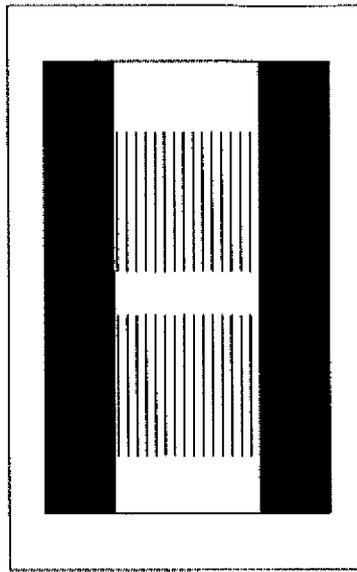


435

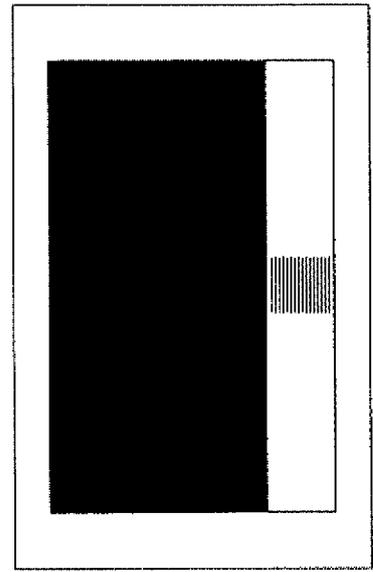
Figur 9.1



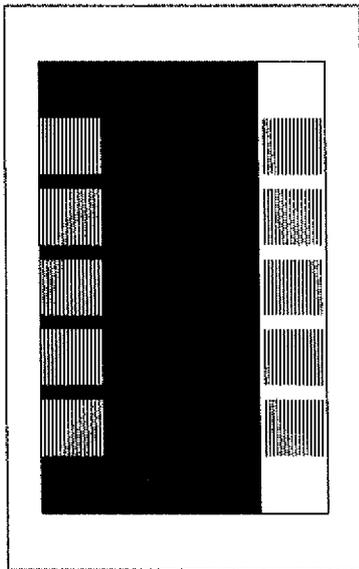
440



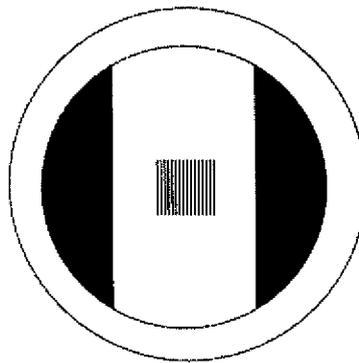
450



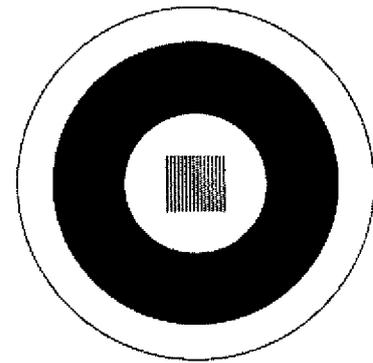
460



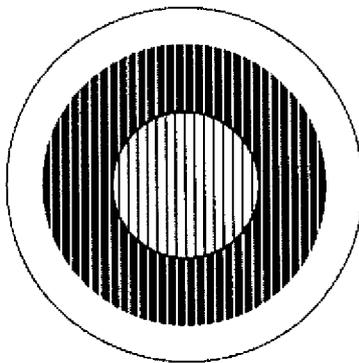
470



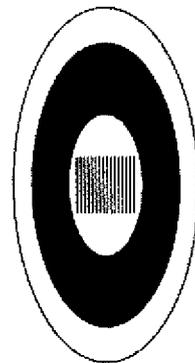
480



490



500



510

Figur 9.2