

(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
4. November 2004 (04.11.2004)

PCT

(10) Internationale Veröffentlichungsnummer
WO 2004/095149 A2

(51) Internationale Patentklassifikation⁷: **G04F 5/00**

HOCHSCHULE ZÜRICH [CH/CH]; ETH Transfer,
Rämistrasse 101, CH-8092 Zürich (CH).

(21) Internationales Aktenzeichen: PCT/EP2004/004193

(22) Internationales Anmeldedatum:
21. April 2004 (21.04.2004)

(71) Anmelder und

(72) Erfinder: **DITTRICH, Philipp** [DE/CH]; Allen-
moosstrasse 60, CH-8057 Zürich (CH). **MONTEMEZ-
ZANI, Germano** [CH/CH]; Neunbrunnenstrasse 186,
CH-8046 Zürich (CH). **GÜNTER, Peter** [CH/CH];
Püntstrasse 17, CH-8173 Riedt b. Neerach (CH).

(25) Einreichungssprache: Deutsch

(26) Veröffentlichungssprache: Deutsch

(30) Angaben zur Priorität:
730/03 24. April 2003 (24.04.2003) CH

(74) Gemeinsamer Vertreter: **EIDGENÖSSISCHE TECH-
NISCHE HOCHSCHULE ZÜRICH**; ETH Transfer, HG
E 47-49, Rämistrasse 101, CH-8092 Zürich (CH).

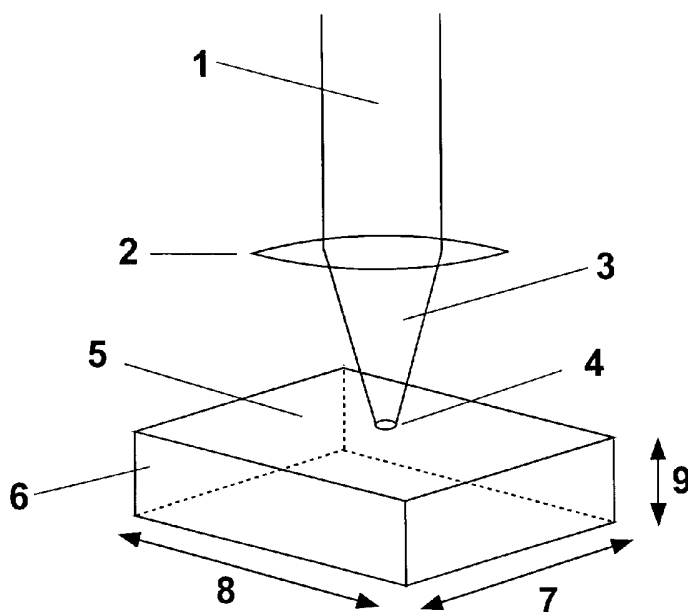
(71) Anmelder (für alle Bestimmungsstaaten mit Ausnahme
von US): **EIDGENÖSSISCHE TECHNISCHE**

(81) Bestimmungsstaaten (soweit nicht anders angegeben, für
jede verfügbare nationale Schutzrechtsart): AE, AG, AL,
AM, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BR, BW, BY, BZ, CA, CH,

[Fortsetzung auf der nächsten Seite]

(54) Title: METHOD FOR PRODUCING INTEGRATED OPTICAL ELEMENTS, AND A CORRESPONDING OPTICAL EL-
EMENT

(54) Bezeichnung: VERFAHREN ZUR HERSTELLUNG VON INTEGRIERTEN OPTISCHEN ELEMENTEN SOWIE OPTI-
SCHES ELEMENT



(57) Abstract: The invention relates to a method for producing and structuring electro-optical elements from electro-optical materi-
als, e.g. nonlinear optical organic crystals, particularly comprised of the organic salt DAST, by means of femtosecond laser ablation.
The invention also relates to applications of electro-optical elements produced in this manner.

[Fortsetzung auf der nächsten Seite]

WO 2004/095149 A2



CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DK, DM, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, HR, HU, ID, IL, IN, IS, JP, KE, KG, KP, KR, KZ, LC, LK, LR, LS, LT, LU, LV, MA, MD, MG, MK, MN, MW, MX, MZ, NA, NI, NO, NZ, OM, PG, PH, PL, PT, RO, RU, SC, SD, SE, SG, SK, SL, SY, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, YU, ZA, ZM, ZW.

EE, ES, FI, FR, GB, GR, HU, IE, IT, LU, MC, NL, 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 Rechenbericht und erneut zu veröffentlichen nach Erhalt des Berichts*

(84) Bestimmungsstaaten (soweit nicht anders angegeben, für jede verfügbare regionale Schutzrechtsart): ARIPO (BW, GH, GM, KE, LS, MW, MZ, SD, SL, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), eurasisches (AM, AZ, BY, KG, KZ, MD, RU, TJ, TM), europäisches (AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK,

Zur Erklärung der Zweibuchstaben-Codes und der anderen Abkürzungen wird auf die Erklärungen ("Guidance Notes on Codes and Abbreviations") am Anfang jeder regulären Ausgabe der PCT-Gazette verwiesen.

(57) Zusammenfassung: Die Erfindung betrifft ein Verfahren zur Herstellung und Strukturierung elektro-optischer Elemente aus elektro-optischen Materialien, bspw. nichtlinear-optischen, organischen Kristallen, insbesondere aus dem organischen Salz DAST, durch Femtosekunden-Laserablation. Die Erfindung bezieht sich ferner auf Anwendungen solchermaßen hergestellter elektro-optischer Elemente.

Verfahren zur Herstellung von integrierten optischen Elementen sowie optisches Element

Die vorliegende Erfindung betrifft ein Verfahren zur Herstellung integriert-optischer Elemente zur Führung und Manipulation von Lichtwellen, insbesondere Wellenleiter und Mikroresonatoren, aus organischen und anorganischen Kristallen und optischen Polymeren, insbesondere aus organischen Einkristallen, die nichtlinear-optische bzw. elektro-optische Eigenschaften besitzen, durch direkte Strukturierung mittels Femtosekunden-Laser-Ablation. Ferner bezieht sich die Erfindung auf optische Elemente, die mit einem solchen Verfahren herstellbar sind.

Der Kapazitätsbedarf der Kommunikationsnetze hat in den letzten Jahren stetig zugenommen, sowohl bezüglich übertragener Datenraten und Übertragungsgeschwindigkeit, als auch geographischer Abdeckung. Zunehmend werden elektronische Komponenten durch entsprechende optische ersetzt, da letztere eine sehr viel grössere Bandbreite erlauben. Hinsichtlich langer Distanzen ist optische Datenübertragung heute Standard. Die derzeitigen Bemühungen zur Vergrösserung der Kapazitäten der Datenübertragungsnetze zielen im wesentlichen darauf ab, optische Datenübertragung und -manipulation auch für kurze Distanzen zu implementieren und integrierte-optische Elemente zu entwickeln.

Wesentliche Elemente, die dafür benötigt werden, sind elektro-optische Modulatoren, elektrisch und optische steuerbare Schaltverteiler (engl.: cross connect) und wellenlängenselektive Optokoppler bzw. Filter. Um den Anforderungen zukünftiger ultraschneller Netzwerke mit breiter Bandbreite zu entsprechen, ist es daher sehr wichtig und von grossem Interesse, Materialien mit grossen optischen Nichtlinearitäten und elektro-optischen Eigenschaften herzustellen, um die Eigenschaften dieser optischen Elemente zu optimieren. Speziell entwickelte organische Materialien können in dieser Hinsicht den heutzutage meist verwendeten inorganischen Materialien, wie z.B. dem standardmässig verwendeten Lithium Niobat (LiNbO_3), wegen ihrer grossen und schnellen nichtlinearen Eigenschaften, die eine Folge der rein elektronischen Natur der Nichtlinearitäten sind, weit überlegen sein.

Zwei unterschiedliche Gruppen organischer Materialien wurden in den vergangenen Jahren umfangreich untersucht: elektro-optische Polymere und Einkristalle. Polymere sind potentiell sehr billig, besonders geeignet zur Herstellung dünner Filme und bieten darüber hinaus eine relativ grosse Freiheit zur unabhängigen Optimierung der optischen und mechanischen Eigenschaften. Ihre aktiven nichtlinearen optischen Eigenschaften sind allerdings limitiert durch die maximale Konzentration der nlo Phore, d.h. der molekularen Einheiten, welche elektrooptische Eigenschaften besitzen, ihre räumliche Verteilung und durch Relaxation ihrer Ausrichtung. Organische Einkristalle hingegen haben bessere optische Eigenschaften und eine grössere Stabilität, sind aber schwierig herzustellen, vor allem einkristalline dünne Filme, die kompatibel zu Fertigungsverfahren der Mikroelektronik sind.

Der organische Kristall DAST (4-N, N-dimethylamino-4'-N'-methyl stibazolim tysolate) ist wegen seiner grossen nichtlinearen und elektro-optischen Eigenschaften im Telekommunikationswellenlängenbereich eines der interessantesten Materialien für integriert-optische Anwendungen [1]. Die Strukturierung von DAST ist jedoch sehr schwierig, da standard-photolithographische Prozesse wegen der Löslichkeit des Kristalles in Wasser oder gebräuchlichen organischen Lösungsmitteln nicht angewendet werden können.

Alle bisher bekannten und verwendeten Methoden zur Strukturierung von DAST weisen Nachteile auf. Zwar wurden unlängst Wellenleiter in DAST strukturiert, zum einen durch einen "serially-graft" Prozess [2], zum anderen durch Bleichen [3]. Jedoch ist der "serially-graft" Prozess sehr komplex und besteht aus vielen unterschiedlichen Fabrikationsschritten, was ihn besonders für die Herstellung komplexerer Strukturen, wie z.B. Mikroresonatoren, ungeeignet erscheinen lässt. Beim Bleichen hingegen wird der Brechungsindex von DAST lokal durch Beleuchtung mit sichtbarem oder ultraviolettem Licht so verändert, dass eine Wellenleiterstruktur entsteht. Allerdings ändert sich durch das Bleichen auch die Kristallzusammensetzung, wodurch sich andererseits auch die nichtlinearen optischen Eigenschaften ändern.

Die Strukturierung organischer Kristalle mittels Beleuchtung durch eine Maske wurde in [4] vorgeschlagen.

Ziel dieser Erfindung ist es, ein Verfahren zur Verfügung zu stellen, mit dem integrierte-optische Elemente aus elektro-optischen Materialien, insbesondere aus organischen Kristallen, wie bspw. aus DAST, präzise mikrostrukturiert werden können ohne dabei die

Kristallstruktur bzw. das Substratmaterial unter den strukturierten Mikrostrukturen zu beschädigen oder zu zerstören.

Gemäss der vorliegenden Erfindung wird ein Verfahren zur direkten, kontaktlosen Strukturierung integriert-optischer Elemente aus elektro-optischen Materialien, insbesondere organischen Kristallen, die nichtlinear-optische bzw. elektro-optische Eigenschaften besitzen, mittels Femtosekunden-Laser-Ablation vorgestellt. Unter 'Laser-Ablation' versteht man hier die Strukturierung mittels Bestrahlung durch Laserlicht in einer solchen Intensität, dass Ablationsprozesse bewirkt werden. Mit 'Femtosekunden-Laser-Ablation' ist die Ablation mittels Laserlicht gemeint, welches gepulst ist, und zwar in Pulsen mit einer Pulslänge von kleiner als 1ps ($1 \text{ fs} = 10^{-15} \text{ s}$). Vorzugsweise wird Laserlicht mit Pulslängen kleiner als 500 fs, bspw. sogar kleiner als 300 fs, 250 fs, 200 fs, 100 fs oder sogar 10 fs Pulslänge verwendet.

Vorteil des erfindungsgemässen Verfahrens ist, dass bei der Verwendung von Femtosekunden-Laserpulsen ($1 \text{ fs} = 10^{-15} \text{ s}$) zur Materialstrukturierung durch die kurze Dauer der Wechselwirkung das zu bearbeitende Material nur ablatiert bzw. strukturiert, nicht aber seine Struktur im nicht ablatierten Volumen beschädigt oder zerstört wird.

Ein weiterer Vorteil des erfindungsgemässen Verfahrens ist die präzise Herstellung optischer Elemente mit glatten Oberflächen, welche zur Einkopplung und zur möglichst verlustfreien Führung von Lichtwellen nötig sind.

Ferner bezieht sich die Erfindung auf solchermassen herstellbare optische Elemente, die bspw. zur Führung und Manipulation von Lichtwellen verwendbar sind, insbesondere Wellenleiter zum Führen und zur Manipulation von Lichtwellen und Mikroresonatoren zum Filtern und Koppeln von simultan geführten Lichtwellen verschiedener Wellenlänge.

Besonders vorteilhaft ist das erfindungsgemässe Verfahren für die Strukturierung von nichtlinear-optischen, organischen Kristallen. Die Strukturierung solcher Kristalle ist wie eingangs erwähnt mit konventionellen Verfahren nur schwierig machbar. Es wurde nun überraschend gefunden, dass das erfindungsgemässe Verfahren die präzise Herstellung feiner und glatter Strukturen solcher Kristalle ermöglicht, d.h. dass bei einer nur kurzen Wechselwirkung der Strahlung mit dem Material das Material lediglich ablatiert wird, ohne dass bspw. mit zeitlicher Verzögerung Kristall-Gitterschwingungen eintreten würden, welche die Kristallstruktur lokal beschädigen könnten. Die deponierte Energie bleibt daher

im Wesentlichen auf das durch den Fokusbereich des Laserstrahls definierte Volumenelement beschränkt.

Das erfindungsgemässe Verfahren verwendet einen fokussierten Femtosekunden-Laserstrahl zur Strukturierung von elektro-optischen Materialien, insbesondere von nichtlinear-optischen, organischen Kristallen. Im Falle von nichtlinear-optischen Kristallen wird durch die kurze Wechselwirkungszeit von bspw. weniger als 250 Femtosekunden des Laserpulses mit dem zu strukturierendem Material die ganze Energie des Pulses durch Anregung elektronischer Zustände der organischen Moleküle und durch Ionisation von Elektronen in einem durch den Laserfokus wohl definierten und kleinen Volumenelement deponiert. Es wurde gefunden, dass dabei nicht wesentlich ist, ob die verwendete Wellenlänge stark oder nur schwach vom Material absorbiert wird. Selbst bei geringer Einphotonen-Absorption ist die Intensität des Lichtpulses im Fokus so stark, dass dort elektronische Zustände sehr effektiv durch Multiphotonen-Absorption angeregt bzw. Atome und Moleküle mehrfach ionisiert werden können. Gute Ablationsresultate wurden erzielt mit einer Wellenlänge von mindestens 400 nm und höchstens 1500 nm, vorzugsweise in den Bereichen von 500 nm bis 620 nm bzw. von 750 bis 800 nm.

Überschreitet nun die Energiedichte einen bestimmten Grenzwert innerhalb dieses Volumenelementes, so wird das Volumen ablatiert, d.h. seine molekularen Bestandteile lösen sich vom Kristallgitter ab. Physikalische Mechanismen für diese Ablation sind einerseits das Brechen chemischer Bindungen und die starke Anregung von elektronischen Zuständen bis hin zur Erzeugung eines lokalen Plasmas hoher Temperatur, welches zur Verdampfung des Materials führt. Andererseits führt die, durch die starken Lichtintensitäten verursachte Mehrfachionisation und die damit verbundene starke Coulombabstossung der remanenten atomaren bzw. molekularen Systeme zum explosionsartigen Ausstoss dieses ionisierten Materials. In der Regel ist eine Kombination all dieser Mechanismen für die Ablation des Materials verantwortlich und die genaue physikalische Beschreibung sehr komplex und schwierig, sowie abhängig vom Material. Allen Mechanismen ist jedoch gemein, dass die Kristallstruktur des zurückbleibenden, nicht ablatierten organischen Materials nicht beschädigt oder zerstört wird, wodurch die herausragenden elektro-optischen Eigenschaften erhalten bleiben.

Mit Hilfe des erfindungsgemässen Verfahrens lassen sich so durch Scannen des Laserstrahls, bzw. durch Scannen des Kristalles unter dem festgehaltenen Fokus des Laserstrahls, an der Oberfläche von organischen Kristallen optische bzw. elektro-optische

Strukturen präzise herstellen, die zur Führung und Manipulation von Lichtwellen verwendet werden können. Insbesondere sind dies Wellenleiter zur verlustfreien Führung von Lichtwellen, elektro-optische Modulatoren zur Phasen- oder Amplitudenmodulation dieser Lichtwellen, sowie Mikroresonatoren zum Filtern und Koppeln von simultan geführten Lichtwellen verschiedener Wellenlänge, sowie Kombinationen all dieser Elemente.

Weiter können durch das erfindungsgemässe Verfahren präzise optische Elemente mit glatten Oberflächen hergestellt werden, welche zur Einkopplung und zur möglichst verlustfreien Führung von Lichtwellen nötig sind.

Nachstehend wird die Erfindung anhand von Zeichnungen näher erläutert. Es zeigt:

Fig. 1 Die Darstellung der einer Ausführungsform der erfindungsgemässen Methode.

Fig. 2 Die Darstellung einer Ausführungsform der erfindungsgemässen Methode am speziellen Beispiel der Strukturierung eines linearen Wellenleiters.

Fig. 3 Die Darstellung einer Ausführungsform der erfindungsgemässen Methode am speziellen Beispiel der Strukturierung eines Mikroresonators.

Fig. 4 Die Darstellung einer Ausführungsform der erfindungsgemässen Methode am speziellen Beispiel der Strukturierung eines Mikroresonators welcher zwei lineare Wellenleiter miteinander koppelt.

Fig. 5 Kopplung zweier lineare Wellenleiter durch mehrere hintereinander geschaltete Mikroresonatoren als spezielles Beispiel eines erfindungsgemäss hergestellten integriert-optischen Elementes.

Fig. 6 Filter für mehrere simultan geführte Wellenlängen als spezielles Beispiel eines erfindungsgemäss hergestellten integriert-optischen Elementes.

Fig. 7 Optischer Koppler als spezielles Beispiel eines erfindungsgemäss hergestellten integriert-optischen Elementes.

Fig. 8 Mach-Zehnder Interferometer als spezielles Beispiel eines erfindungsgemäss hergestellten integriert-optischen Elementes zur optischen Signalmodulation.

Das Prinzip der erfindungsgemässen Methode ist in Fig. 1A dargestellt. Ein Femtosekunden-Laserstrahl 1 mit geeigneter Wellenlänge und mit, für zerstörungsfreie Ablation benötigter, geeigneter Energiedichte wird durch eine Linse bzw. ein Objektiv 2

fokussiert 3 und der Fokus 4 selbst so justiert, dass er knapp unterhalb der zu strukturierenden Oberfläche 5 des organischen Kristalles 6 zu liegen kommt. Der organische Kristall 6 wird sodann in einer oder mehreren der drei Raumachsen, d.h. der x-Achse 7, der y-Achse 8 und der z-Achse 9 bezüglich des Fokuses 4 mit einer geeigneten Scan-Geschwindigkeit bewegt. Eine solche Translation kann z.B. durch einen Computer-gesteuerten XYZ-Verschiebetisch submikrometer-genau durchgeführt werden. Dies ist nicht in der Abbildung gezeigt. Alternativ kann auch der Laserstrahl bzw. der Fokus 4 hinsichtlich des Kristalles 6 durch geeignete Ablenkung verschoben werden. Durch geeignetes Scannen – ggf. mehrfach, um Strukturiefen zu erzeugen – und geeignete Ablation von Material können so beliebige Strukturen an der Oberfläche des organischen Kristalles geformt werden.

Fig. 1B zeigt detailliert das Prinzip der Ablation anhand eines Ausführungsbeispiels der erfindungsgemässen Methode. Durch das Fokussieren des Laserstrahles 3 überschreitet die Energiedichte des Laserpulses in einem gewissen Bereich 10 nahe der Fokusebene 11 den Schwellenwert für Ablation und Material wird abgetragen. Der fokussierte Strahl 3 wird dabei so justiert, dass die Fokusebene 11 in einem Abstand 12 unterhalb der Kristalloberfläche 5 zu liegen kommt. Dies führt zu besserer Qualität der zurückbleibenden ablatierten Ober- und Seitenflächen.

Fig. 2 zeigt eine Ausführungsform der erfindungsgemässen Methode am speziellen Beispiel der Strukturierung eines linearen Wellenleiters. Durch geeignetes Scannen des Kristalls 6 bezüglich des Fokus 4 des Laserstrahls 3 entlang der drei Raumachsen 7, 8 und 9 (bzw. umgekehrt) wird ursprünglich vorhandenes Material 13 vom Kristall 6 so ablatiert bzw. entfernt, dass ein linearer Wellenleiter 14 zwischen der beidseitig ablatierten Fläche 15 stehen bleibt. Über die beiden Endflächen 16 und 17 kann Licht in den Wellenleiter ein- bzw. ausgekoppelt werden.

In Fig. 3 ist die Anwendung der erfindungsgemässen Methode am speziellen Beispiel der Strukturierung eines Mikroresonators gezeigt. Durch geeignetes Scannen des Kristalls 6 bezüglich des Fokus 4 des Laserstrahls 3 entlang der drei Raumachsen 7, 8 und 9 (bzw. umgekehrt) wird ursprünglich vorhandenes Material 13 vom Kristall 6 so ablatiert bzw. entfernt, dass ein Mikroresonator 18 auf der ablatierten Fläche 15 stehen bleibt. Die Wandstärke des Mikroresonators beträgt typischerweise einige wenige Mikrometer, der Durchmesser ist in der Grössenordnung von ca. 10 - 50 Mikrometer.

Fig. 4 zeigt die Anwendung der erfindungsgemässen Methode am speziellen Beispiel der Strukturierung zweier Wellenleiter 19 und 20, die durch einen Mikroresonator 18 miteinander gekoppelt sind. Die Strukturierung erfolgt dabei analog zu den in Fig. 2 und Fig. 3 gezeigten Anordnungen. Wird nun Licht 21 in einen der beiden Wellenleiter 20 eingekoppelt, so wird es in dem Wellenleiter geführt und tritt am anderen Ende 22 wieder aus. Stimmt die Wellenlänge des im Wellenleiter 20 geführten Lichtes allerdings mit einer Wellenlänge überein, für die der Mikroresonator eine konstruktive Resonanzbedingung erfüllt, so wird durch Kopplung über die evaneszenten Felder ein Teil der Energie der Lichtwelle vom Wellenleiter 20 über den Mikroresonator 18 in den zweiten Wellenleiter 23 übertragen und tritt bei 23 aus. Da die Resonanzbedingung des Mikroresonators idealerweise nur für einen sehr schmalbandigen Wellenlängenbereich erfüllt ist, lässt sich auf diese Weise ein Wellenlängenfilter realisieren. Durch Abstimmen der Resonanzbedingung, z.B. durch elektro-optische Änderung des Brechungsindex im Mikroresonator, lässt sich die Zentralwellenlänge der Resonanzbedingung in einen gewissen Wellenlängenbereich variabel einstellen. Damit ist die in Fig. 4 gezeigte Anordnung geeignet zur Selektion einer bestimmten Wellenlänge aus einem Band simultan geführter Wellenlängen, sofern die Resonanzbedingung des Mikroresonators schmalbandiger ist als der Abstand zwischen zwei benachbarten Wellenlängen aus dem Band der simultan geführten Wellen.

Darüberhinaus lassen sich mit dem erfindungsgemässen Verfahren zahlreiche unterschiedliche integrierte-optische Elemente strukturieren, wie in Fig. 5-8 in Aufsicht auf die strukturierte Oberfläche des Kristalles gezeigt.

Fig. 5 zeigt in Aufsicht zwei lineare Wellenleiter 24 und 25, die über mehrere gleiche, hintereinander geschaltete Mikroresonatoren miteinander gekoppelt sind. Durch diese Kopplung mehrerer Mikroresonatoren wird die Resonanzbedingung für die übertragbare Wellenlänge sehr viel schärfer und die Bandbreite des Filters damit sehr viel schmaler.

In Fig. 6 ist in Aufsicht eine mögliche Anordnung zur gleichzeitigen und selektiven Filterung verschiedener Wellenlängen aus einem Band simultan geführter Wellenlängen gezeigt. An einen linearen Wellenleiter sind mehrere Mikroresonatoren 29 gekoppelt, welche unterschiedliche Dimensionen und damit auch unterschiedliche Resonanzbedingungen für unterschiedliche Wellenlängen besitzen. Werden diese Resonanzbedingungen so abgestimmt, dass jeweils ein Mikroresonator eine passende Resonanzbedingung für eine Wellenlänge aus einem Band simultan geführter Wellenlängen 30, welche in den linearen

Wellenleiter 28 eingekoppelt werden, besitzt, so können die einzelnen Wellenlängen durch elektro-optisches Verstimmen der Resonanzbedingung der Resonatoren (z.B. durch Anlegen eines elektrischen Feldes über den Resonatoren und der damit verbundenen Änderung des Brechungsindex, was nicht gezeigt ist in Fig. 6) einzeln und simultan gefiltert, in Wellenleiter 31 übertragen und bei 32 ausgekoppelt werden.

Als weiteres Beispiel für ein erfindungsgemäss hergestelltes integriert-optisches Element ist in Fig. 7 ein optischer Koppler in Aufsicht gezeigt. Zwei Wellenleiter 33 und 34 verlaufen in einem gewissen Bereich in sehr nahem Abstand nebeneinander, so dass Energie von einem Wellenleiter in den anderen übertragen werden kann. Ob und wieviel Energie übertragen wird hängt ab von der Phasenfehlانpassung zwischen den beiden Wellenleitern, welche z.B. wie in Fig. 7 gezeigt durch Anlegen eines elektrischen Feldes über die Elektroden 39 und 40 und der damit induzierten Änderung des Brechungsindex in einem oder in beiden Wellenleitern verändert werden kann. So ist es z.B. möglich Licht 35 oder 36 in Abhängigkeit der Phasenfehlانpassung in einen der Ausgänge 37 und 38 zu koppeln.

Als letztes Beispiel für ein erfindungsgemäss hergestelltes integriert-optisches Element ist in Fig. 8 ein Mach-Zehnder Interferometer in Aufsicht gezeigt. Ein Wellenleiter 41 wird in zwei Arme 42 und 43 aufgespalten, die nach einer gewissen Strecke wieder zusammengeführt werden. Tritt Licht 44 in den Wellenleiter ein, so kommt es am Punkt 45 in Abhängigkeit der Phasendifferenz zwischen den beiden Armen 42 und 43 zu konstruktiver oder destruktiver Interferenz und entsprechend kann Licht 45 aus dem Wellenleiter ausgekoppelt werden oder nicht. Die Phasendifferenz zwischen den beiden Wellenleiterarmen kann nun beliebig eingestellt werden, z.B. wie in Fig. 8 gezeigt, durch Anlegen eines elektrischen Feldes über die Elektroden 47 und 48 und der damit induzierten Änderung des Brechungsindex in einem oder in beiden Wellenleitern.

Wie gezeigt bietet die vorliegende Erfindung ein einfaches Verfahren zur präzisen Strukturierung von elektro-optischen Elementen aus organischen Kristallen und Polymeren, welche grosse und vor allem schnelle, nichtlineare und elektro-optische Eigenschaften besitzen. Solche Elemente sind unabdingbar für die weitere Entwicklung und Verbesserung der integrierten Optik und der optischen Datenübertragung, weshalb vorliegende Erfindung eine besondere Bereicherung in dem einschlägigen, technischen Gebiet darstellt.

Referenzen:

1. F. Pan, M.S. Wong, Ch. Bosshard, P. Günter, Adv. Mater. 8, 592 (1996)
2. K. Komatsu, K. Takayama, B. Cai, T. Kaino, IEICE Trans. Electron. E85-C, 1258 (2002)
3. L. Mutter, U. Meier, M. Jazbinsek, M. Zgonik, Ch. Bosshard, P. Günter, submitted to J. Appl. Phys. (2003), to be published
4. Ch.P. Yakymyshyn, Y.S. Liu, R. Guida, Patent Document US 5,396,362

Patentansprüche:

1. Verfahren zur Erzeugung von integrierten optischen Elementen aus elektro-optischen Materialien, dadurch gekennzeichnet, dass die optischen Elemente durch direkte Strukturierung mittels Femtosekunden-Laser-Ablation hergestellt werden.
2. Verfahren gemäss Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass ein elektro-optischer Kristall zur Strukturierung verwendet wird.
3. Verfahren gemäss Anspruch 2, dadurch gekennzeichnet, dass ein organischer, elektro-optischer Kristall zur Strukturierung verwendet wird
4. Verfahren gemäss Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass ein elektro-optisches Polymer zur Strukturierung verwendet wird.
5. Verfahren gemäss Anspruch 3, dadurch gekennzeichnet, dass als organischer Kristall DAST (4-N, N-dimethylamino-4'-N'-methyl stibazolium tosylate) verwendet wird.
6. Verfahren gemäss Anspruch 3, dadurch gekennzeichnet, dass als organischer Kristall M2-MDB (4-{2-[1-{2-hydroxyethyl}-4-pyridylidene]-ethylidene}-cyclohexa-2,5-dien-1-one) - (methyl 2,4-dihydroxybenzoate) verwendet wird.
7. Verfahren gemäss Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass ein organisches Polymer zur Strukturierung verwendet wird.
8. Verfahren gemäss der Ansprüche 1 bis 7, dadurch gekennzeichnet, dass die Strukturen der erzeugten integrierten optischen Elemente durch Scannen des ablatierenden Femtosekunden-Laserstrahls geschrieben werden.
9. Verfahren gemäss der Ansprüche 1 bis 7, dadurch gekennzeichnet, dass die Struktur der erzeugten integrierten optischen Elemente durch Scannen des zu ablatierenden Kristalls geschrieben wird.

10. Verfahren gemäss der Ansprüche 1 bis 9, dadurch gekennzeichnet, dass zur Ablation ein Femtosekunden-Laserstrahl mit einer Wellenlänge zwischen 250 nm und 1500 nm verwendet wird.
11. Verfahren gemäss der Ansprüche 1 bis 10, dadurch gekennzeichnet, dass der Femtosekunden-Laserstrahl eine Pulslänge kleiner als 500 fs besitzt.
12. Verfahren gemäss Anspruch 11, dadurch gekennzeichnet, dass der Femtosekunden-Laserstrahl eine Pulslänge kleiner als 100 fs, bspw. kleiner als 10 fs besitzt.
13. Verfahren gemäss der Ansprüchen 1 bis 12, dadurch gekennzeichnet, dass der Femtosekunden-Laserstrahl eine Energiedichte grösser als 1 mJ/cm^2 besitzt.
14. Verfahren gemäss der Ansprüchen 1 bis 12, dadurch gekennzeichnet, dass der Femtosekunden-Laserstrahl eine Energiedichte kleiner als 400 mJ/cm^2 besitzt.
15. Optisches Element, herstellbar mit einem Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 14, aufweisend elektro-optisches Material, welches an einer Oberfläche eine durch Ablation beigebrachte spezifische Struktur aufweist.
16. Optisches Element nach Anspruch 15, dadurch gekennzeichnet, dass die Struktur so ausgebildet ist, dass das optische Element einen Wellenleiter bildet.
17. Optisches Element nach Anspruch 15 oder 16, dadurch gekennzeichnet, dass die Struktur so ausgebildet ist, dass das optische Element einen Mikroresonator bildet.
18. Optisches Element nach den Ansprüchen 16 und 17, dadurch gekennzeichnet, dass ein oder mehrere Mikroresonatoren in Kombination mit einem oder mehreren Wellenleitern vorhanden sind.

19. Optisches Element nach Anspruch 18, dadurch gekennzeichnet, dass ein oder mehrere Mikroresonatoren in Kombination mit einem oder mehreren Wellenleitern vorhanden und so angeordnet sind, dass Lichtwellen aus den Wellenleitern in den oder die Mikroresonatoren, bzw. von den Mikroresonatoren in einen Wellenleiter gekoppelt werden können.
20. Optisches Element nach Anspruch 19, dadurch gekennzeichnet, dass die Struktur so ausgebildet ist, dass mehrere simultan geführte Lichtwellen verschiedener Wellenlänge mittels Kopplung über einen oder mehrere Mikroresonatoren aus den Wellenleitern in den oder die Mikroresonatoren, bzw. von den Mikroresonatoren in einen Wellenleiter gekoppelt werden können.
21. Optisches Element nach einem der Ansprüche 15 bis 20, gekennzeichnet durch einen durch die Struktur gebildeten optischen Koppler.
22. Optisches Element nach einem der Ansprüche 15 bis 21, gekennzeichnet durch ein durch die Struktur gebildetes Mach-Zehnder Interferometer.

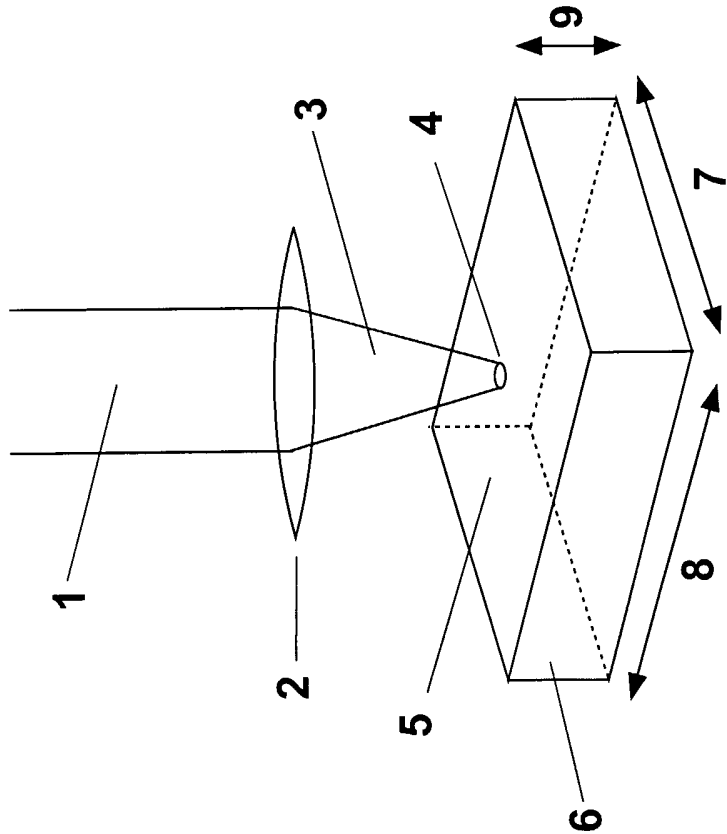


Fig. 1A

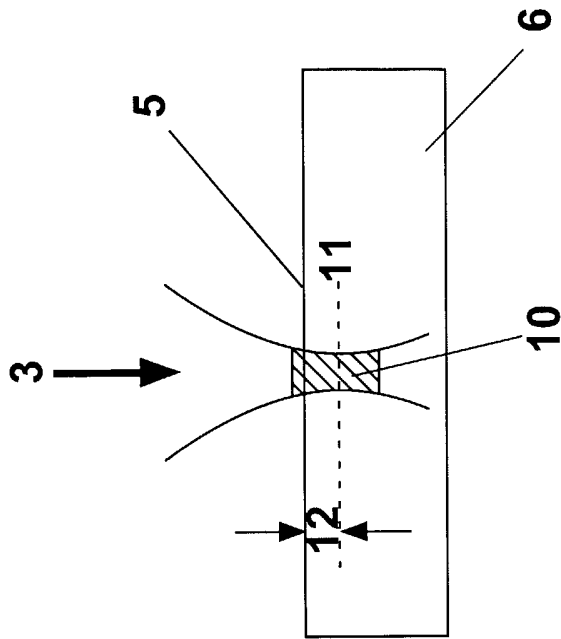


Fig. 1B

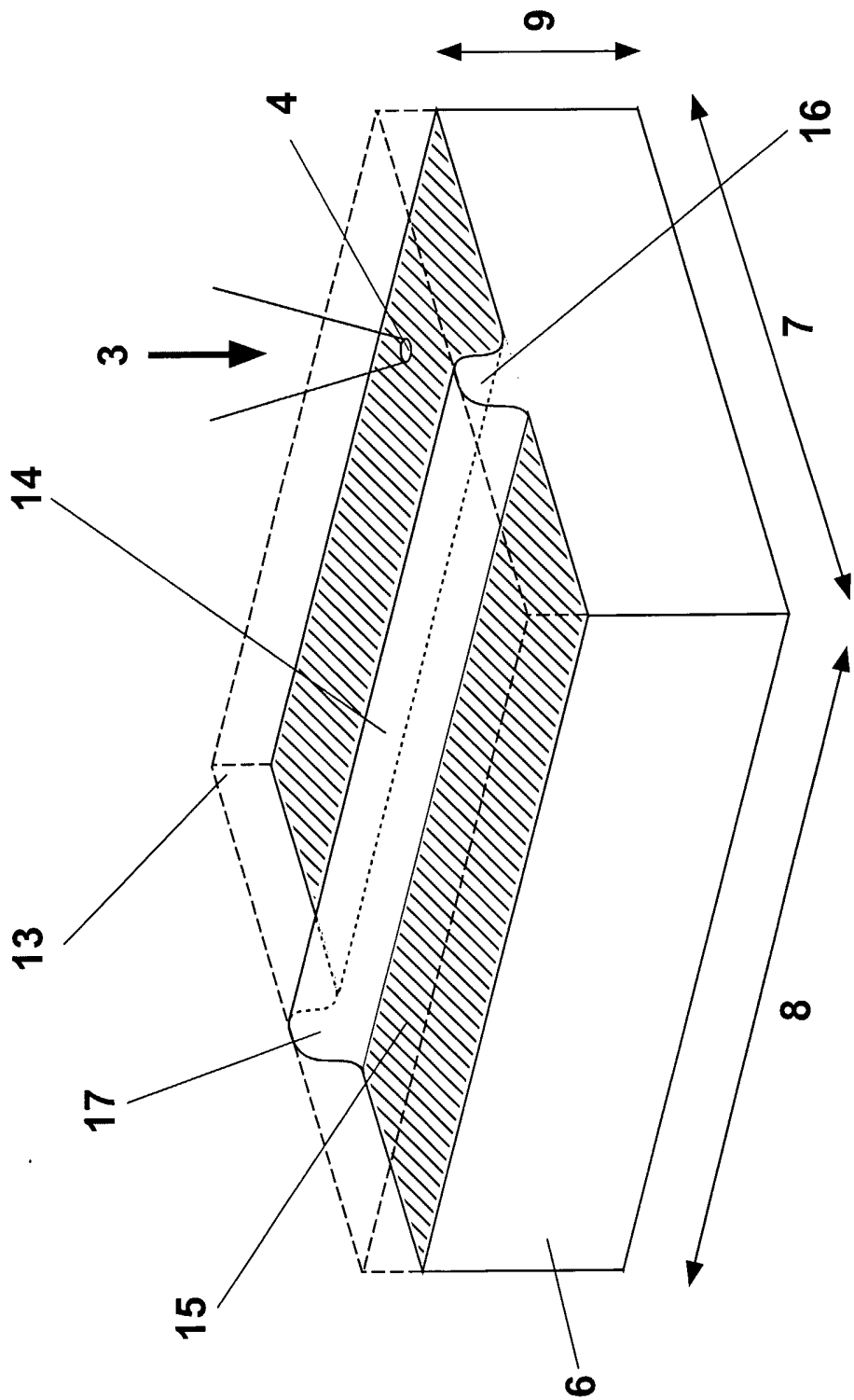


Fig. 2

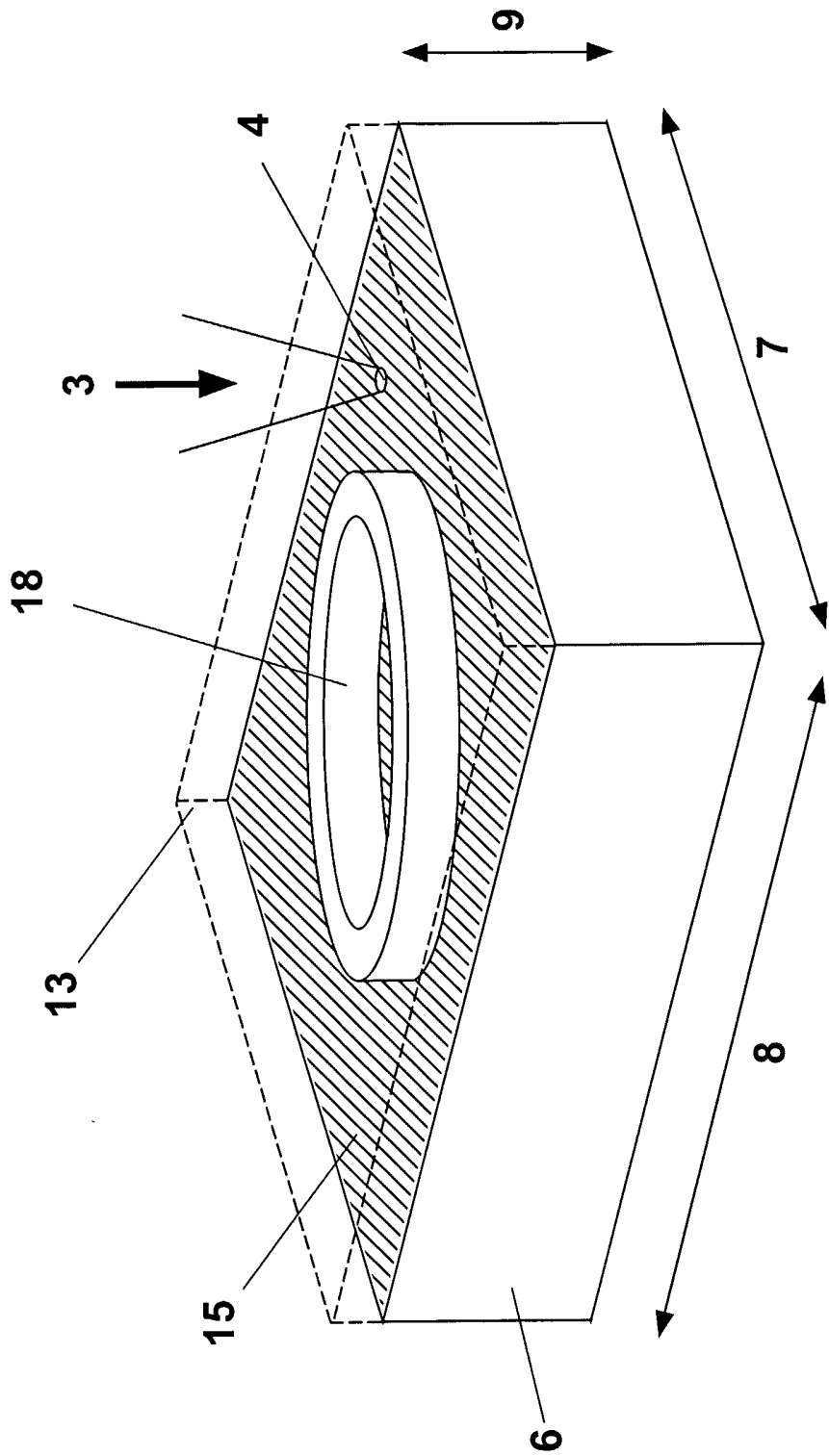


Fig. 3

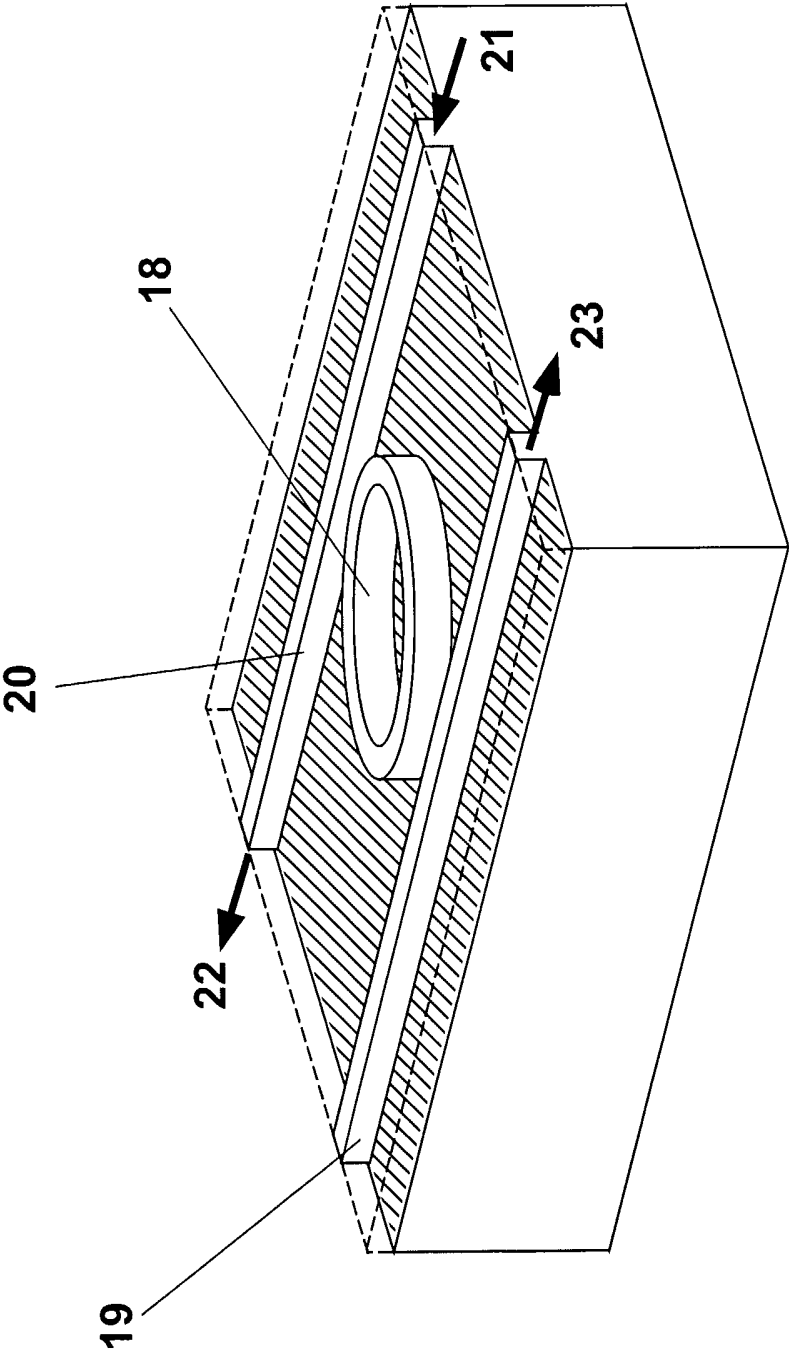


Fig. 4

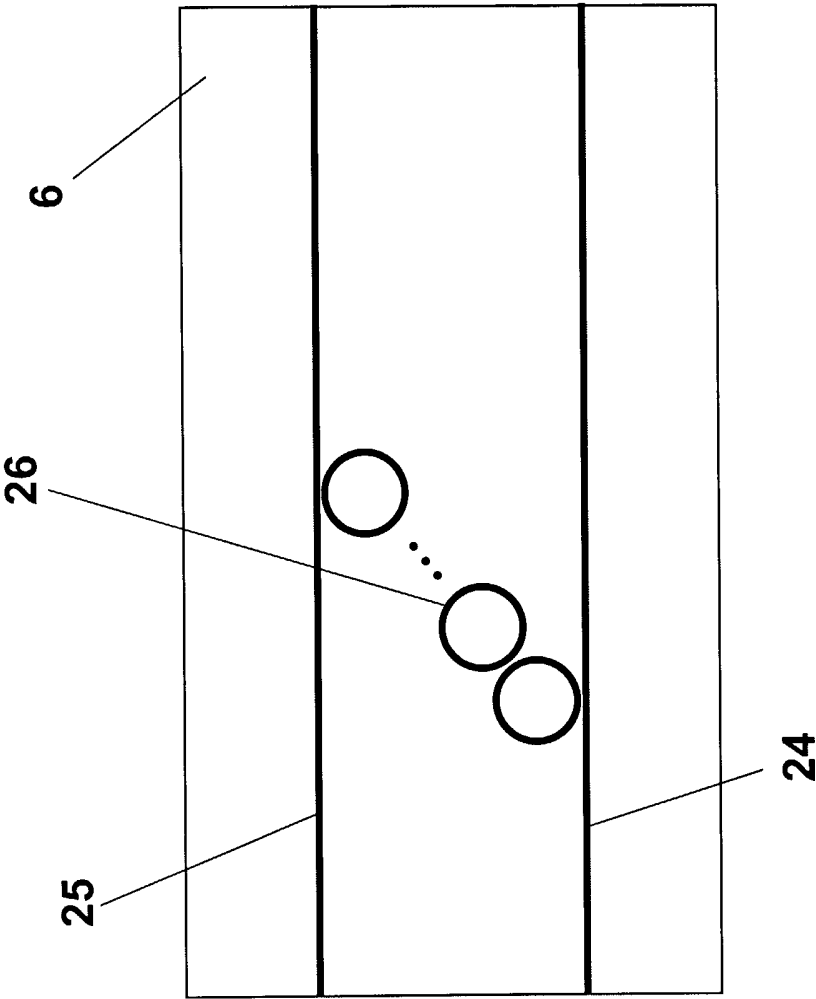


Fig. 5

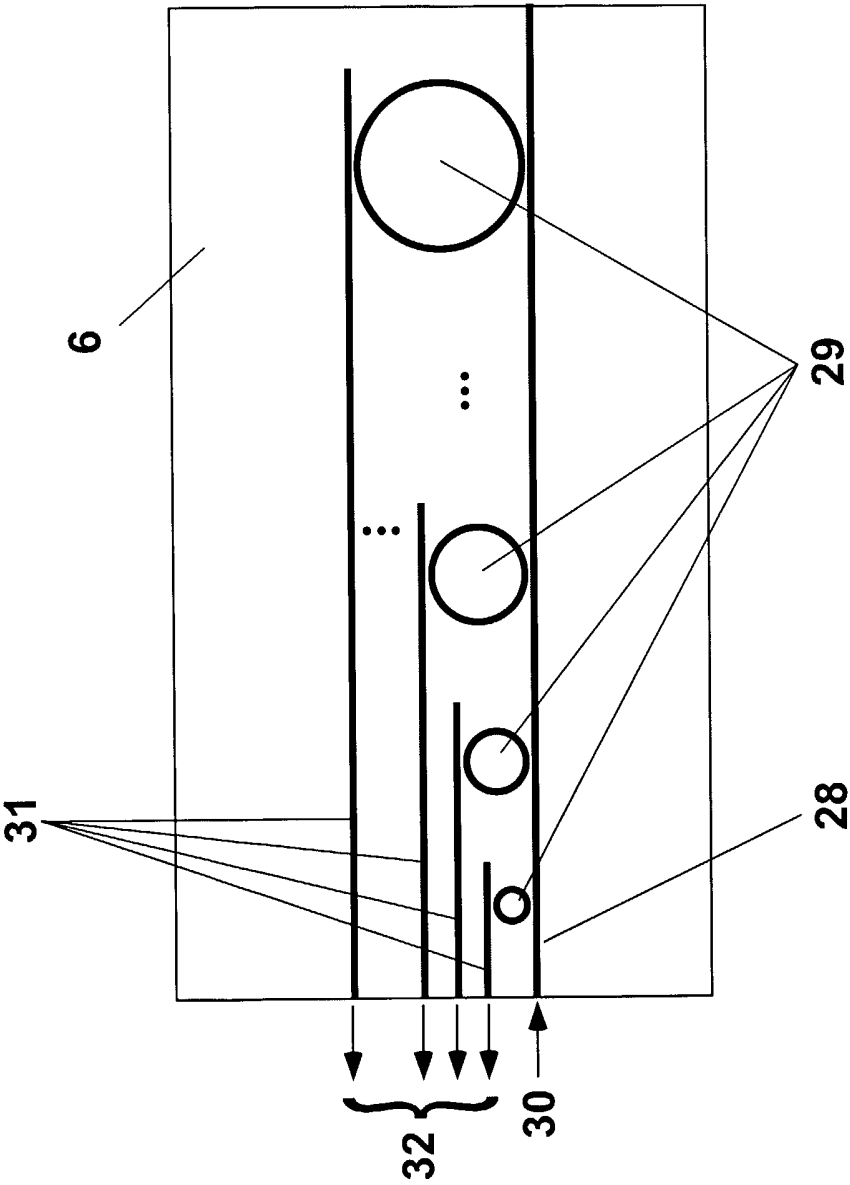


Fig. 6

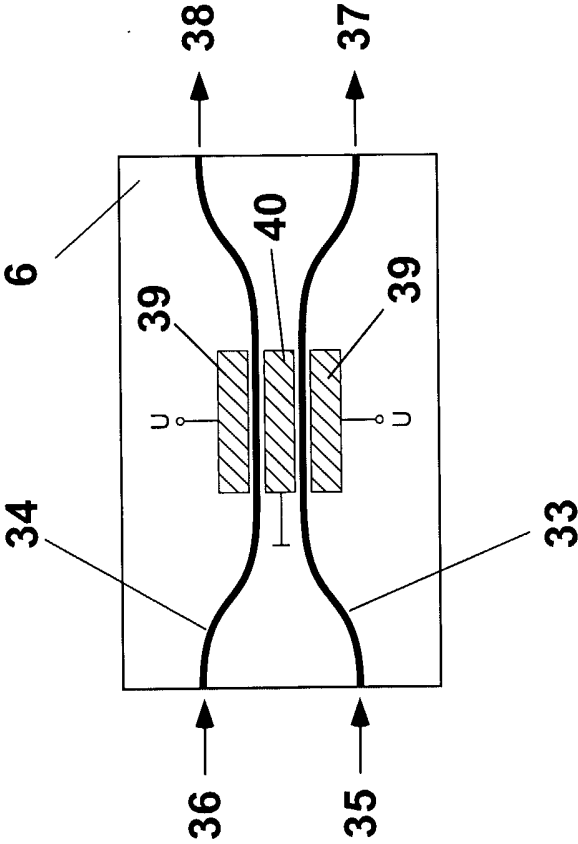


Fig. 7

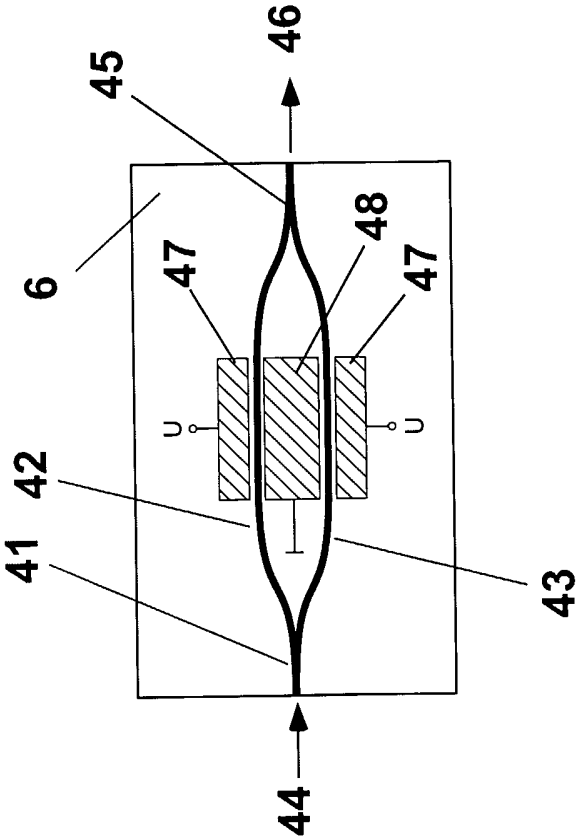


Fig. 8