



19



SCHWEIZERISCHE EIDGENOSSENSCHAFT
EIDGENÖSSISCHES INSTITUT FÜR GEISTIGES EIGENTUM

11 CH 694 409 A5

Erfindungspatent für die Schweiz und Liechtenstein
Schweizerisch-liechtensteinischer Patentschutzvertrag vom 22. Dezember 1978

51 Int. Cl.⁷: G 02 B 006/12
G 02 F 001/295
G 02 F 001/03

12 PATENTSCHRIFT A5

21 Gesuchsnummer: 00267/99

22 Anmeldungsdatum: 11.02.1999

24 Patent erteilt: 31.12.2004

45 Patentschrift
veröffentlicht: 31.12.2004

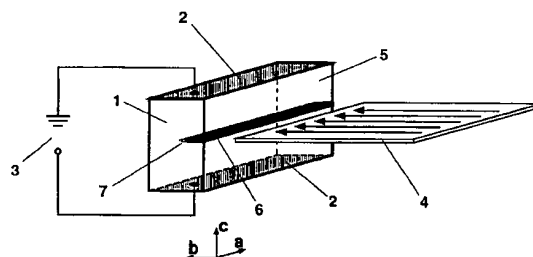
73 Inhaber:
Philipp Dittrich, Allenmoosstrasse 60
8057 Zürich (CH)
Prof. Dr. Peter Günter, Püntstrasse 17
8173 Riedt b. Neerach (CH)
Dr. Germano Montemezzani
Neunbrunnenstrasse 186
8046 Zürich (CH)
Dr. Pietro Bernasconi, via Campagnola
6852 Genestrerio (CH)

72 Erfinder:
Prof. Dr. Peter Günter, Püntstrasse 17
8173 Riedt b. Neerach (CH)
Philipp Dittrich, Allenmoosstrasse 60
8057 Zürich (CH)
Dr. Germano Montemezzani
Neunbrunnenstrasse 186
8046 Zürich (CH)
Dr. Pietro Bernasconi, via Campagnola
6852 Genestrerio (CH)

74 Vertreter:
Prof. Dr. Peter Günter
Laboratorium für Nichtlineare Optik
ETH Hönggerberg HPF E8
8093 Zürich (CH)

54 Verfahren zur Herstellung dynamischer, lichtinduzierter Wellenleiter und Anwendung dieses Verfahrens.

57 Die Erfindung betrifft ein Verfahren zur Herstellung dynamischer, rekonfigurierbarer Wellenleiter. Erfindungswesentlich ist, dass die Wellenleiterstruktur (7) durch die Intensitätsverteilung einer oder mehrerer Lichtwellen (4) an der Oberfläche (5) eines fotoleitenden und elektrooptischen Materials (1), welches unter elektrischer Spannung (3) steht, erzeugt wird. Mit den erfindungsgemässen Massnahmen wird erreicht, dass die Wellenleiterstruktur durch die sie erzeugende Lichtwelle beliebig rekonfiguriert werden kann. Die Erfindung bezieht sich ferner auf Anwendungen der Wellenleiterstrukturen, die durch das erfindungsgemässe Verfahren erzeugt werden.



Beschreibung

Die vorliegende Erfindung betrifft ein Verfahren zur Herstellung dynamischer, rekonfigurierbarer optischer Wellenleiter in fotoleitenden und elektrooptischen Materialien. Ferner bezieht sich die Erfindung auf Anwendungen dieses Verfahrens.

Zur Herstellung von optischen Wellenleitern in kristallinen Materialien existieren viele unterschiedliche Verfahren, die in der Regel auf einer dauerhaften Änderung der Struktur oder der Zusammensetzung des Materials beruhen, wie z.B. Ionenimplantation, Ionenaustausch, Ätzen oder Dünnschichtepitaxie. Für viele Anwendungen jedoch, wie z.B. für dynamische optische Verbindungen, sind rekonfigurierbare Wellenleiter, deren Struktur während des Betriebes gezielt verändert werden kann, von grossem Interesse. Ein solches Verfahren, bei dem die Erzeugung und Änderung der Wellenleiterstruktur auf optischem Wege erzielt wird, ist Gegenstand vorliegender Erfindung.

Um eine Wellenleiterstruktur optisch zu induzieren, muss durch Einwirkung von Licht lokal der Brechungsindex des Mediums geändert werden. Dies ist z.B. in elektrooptischen Materialien durch den fotorefraktiven Effekt möglich (Ref. 1).

Bislang wurden mehrere Verfahren demonstriert, um mittels des fotorefraktiven Effekts lichtinduzierte Wellenleiter herzustellen. Diese beruhen entweder auf der selbstinduzierten Brechungsindexänderung von Licht (Ref. 2) bzw. von räumlichen Solitonen (Ref. 3, 4) oder auf dem sequentiellen Abtasten und Schreiben der Wellenleiterstruktur mit dem Fokus eines fokussierten Laserstrahls (Ref. 5, 6).

Allen diesen Methoden ist gemein, dass die geführte Lichtwelle kollinear zu der den Wellenleiter induzierenden Welle ist. Solitoneninduzierte Wellenleiter hängen darüber hinaus sehr kritischen von den Strahlintensitäten und den Bedingungen für Selbstfokussierung ab und sind, abgesehen von kleinen Krümmungen infolge Ladungsdiffusionseffekten, im Wesentlichen gerade.

Bei dem erfindungsgemässen Verfahren hingegen können die den Wellenleiter induzierende und die im Wellenleiter geführte Welle senkrecht zueinander angeordnet sein. Das Verfahren ermöglicht die Herstellung von dynamischen Wellenleitern, deren Struktur beliebig verändert werden kann und deren wellenleitenden Eigenschaften unkritisch gegenüber der Intensität der geführten Welle sind.

Weiterhin machen alle bisher verwendeten Methoden Gebrauch vom konventionellen fotorefraktiven Effekt und sind daher mit relativ langsamen Antwortzeiten des Materials verbunden.

Das erfindungsgemässe Verfahren hingegen bietet den Vorteil, auch den interbandfotorefraktiven Effekt, der mit sehr viel schnelleren Antwortzeiten des Materials verbunden ist (Ref. 7), ausnützen zu können. Dadurch wird es möglich, die Wellenleiterkonfiguration in wenigen μs zu ändern.

Die vorliegende Erfindung zur Herstellung dynamischer lichtinduzierter Wellenleiter beruht auf dem fotorefraktiven bzw. dem interband-fotorefraktiven Effekt in fotoleitenden und elektrooptischen Materialien. In beiden Fällen wird dabei durch inhomogene Be-

leuchtung des Materials eine Änderung der Raumladungsverteilung im Material erzeugt. Im Unterschied jedoch zum konventionellen fotorefraktiven Effekt, bei dem die Ladungen von Störstellen aus in ein Leitungsband angeregt werden, werden die Ladungen beim interband-fotorefraktiven Effekt direkt über die Bandlücke angeregt, was zu den wesentlich schnelleren Antwortzeiten führt.

Legt man an einen elektrooptischen Kristall ein homogenes äusseres elektrisches Feld E an, so wird durch dieses Feld wegen des linearen elektrooptischen Effekts der Brechungsindex n im Kristall um einen konstanten Faktor Δn geändert. Durch geeignete Polarisierung des Kristalls und Richtung des Feldes lässt sich erreichen, dass diese Änderung negativ ist, der Brechungsindex also im gesamten Kristall den Wert $n - \Delta n$ annimmt. Werden nun durch Beleuchtung des Kristalls freie Ladungsträger im Kristall erzeugt, so werden die angeregten Elektron-Loch-Paare durch das angelegte äussere Feld getrennt und erzeugen ein dem äusseren Feld entgegengesetztes inneres Feld. Dieses schwächt das äussere Feld ab oder hebt es ganz auf und erhöht damit den Brechungsindex wieder auf n . Die Abschirmung ist dabei umso besser, je höher die Konzentration der freien Ladungsträger ist, d.h. überall dort, wo der Kristall beleuchtet wird. Eine inhomogene Beleuchtung des Kristalls führt so zu einer entsprechenden Modulation des Brechungsindex. Wählt man daher erfindungsgemäss eine geeignete Beleuchtung des Kristalls, so lassen sich gezielt Regionen mit höherem Brechungsindex n und mit niedrigerem Brechungsindex $n - \Delta n$ erzeugen, und auf diese Weise beliebige Wellenleiterstrukturen herstellen.

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

Fig. 1 die Darstellung der erfindungsgemässen Methode.

Fig. 2 die Darstellung der erfindungsgemässen Methode am speziellen Beispiel eines linearen, quasi 1-dimensionalen optischen Wellenleiters.

Fig. 3 CCD Aufnahmen der Intensitätsverteilung eines Probestrahls am Ausgang eines gemäss Fig. 2 hergestellten Wellenleiters, ohne (Fig. 3A) und mit (Fig. 3B) induziertem Wellenleiter.

Fig. 4 die Darstellung der erfindungsgemässen Methode mit einem vor strukturierten planaren Wellenleiter im Kristall.

Fig. 5 Beispiele verschiedener Anwendungen erfindungsgemäss hergestellter Wellenleiter.

Das Prinzip der erfindungsgemässen Methode ist in Fig. 1 dargestellt. An einen fotoleitenden und elektrooptischen Kristall 1 wird durch zwei Elektroden 2 ein homogenes, äusseres elektrisches Feld 3 angelegt. Durch geeignete, inhomogene Beleuchtung 4 einer der zur angelegten Feldrichtung parallel stehenden Kristalloberfläche 5 wird durch den interband-fotorefraktiven Effekt die Wellenleiterstruktur unterhalb der beleuchteten Oberfläche 5 induziert.

Fig. 2 zeigt die erfindungsgemässe Herstellung eines linearen Wellenleiters. An einen reinen Kalium-Niobat(KNbO_3)-Kristall 1, der entlang den Achsen des orthorhombischen Systems geschnitten ist,

werden die zur c-Achse senkrecht stehenden Flächen 2 mit Elektroden versehen, sodass an diese Elektroden ein äusseres elektrisches Feld 3 parallel zur c-Achse angelegt werden kann ($E=4,8 \text{ kV/cm}$). Dadurch wird bei geeigneter Wahl der Feldrichtung der Brechungsindex des Kristalls von $n = 2,1687$ um $\Delta n = 1,34 \times 10^{-4}$ erniedrigt. Eine der zur b-Achse senkrecht stehenden Oberfläche 5 wird mit Licht 4 eines Ar^{++} -Lasers, mit der Wellenlänge $\lambda_{\text{UV}}=364 \text{ nm}$ und parallel zur c-Achse polarisiert, durch Abbildung eines Spaltes inhomogen beleuchtet, derart, dass auf der Kristalloberfläche ein Lichtstreifen 6 auftritt, der eine Breite von $25 \mu\text{m}$ (entlang der c-Achse) besitzt und parallel zur a-Achse ausgerichtet ist. Wegen der starken Absorption von ultraviolett Licht in reinem Kalium-Niobat (Ref. 7) dringt das UV-Licht nur ca. $150 \mu\text{m}$ in den Kristall ein. Es wird also auf diese Weise eine Art 1-dimensionaler Kanal 7 ausgeleuchtet, der eine Breite von $25 \mu\text{m}$, eine Tiefe von ca. $150 \mu\text{m}$ besitzt und dessen Länge der Länge des Kristalls in Richtung der a-Achse entspricht.

In dem so erzeugten Lichtkanal wird das äussere elektrische Feld durch die lichtinduzierten freien Ladungsträger abgeschirmt. Im Bereich des Lichtkanals 7 wird dadurch die durch das angelegte äussere elektrische Feld und wegen des linearen elektrooptischen Effekts hervorgerufene Brechungsindexerniedrigung aufgehoben. Es entsteht auf diese Weise ein Kern 7 mit Brechungsindex n , der räumlich mit dem induzierten Lichtkanal übereinstimmt. Dieser Kern ist von einem Mantel mit Brechungsindex $n-\Delta n$ umgeben, sodass eine Art 1-dimensionaler Wellenleiter erzeugt wird, in den über die Stirnseite, d.h. die Kristalloberfläche senkrecht zur a-Achse, Licht eingekoppelt werden kann.

In Fig. 3 ist eine Stirnseite des Kristalls (senkrecht zur a-Achse) mittels einer CCD-Kamera abgebildet, während ein entsprechend fokussierter HeNe-Laser von der anderen Stirnseite in den Wellenleiter eingekoppelt wird. Fig. 3A zeigt den Fall, wenn das elektrische Feld, die UV-Beleuchtung oder auch beide gleichzeitig ausgeschaltet sind, also kein Wellenleiter induziert wird und der HeNe-Strahl im Kristall normal gebeugt und aufgeweitet wird. In Fig. 3B hingegen ist das elektrische Feld und auch die inhomogene Beleuchtung 4 der Kristalloberfläche 5 gemäss der in Fig. 2 dargestellten Konfiguration eingeschaltet, und man erkennt die Führung des HeNe-Lasers in Richtung der c-Achse.

Dieser erfindungsgemäss hergestellte Wellenleiter, der den interband-fotorefraktiven Effekt ausnutzt, hat die vorteilhafte Eigenschaft, dass seine Struktur durch das geführte Licht nicht beeinflusst wird, falls dieses Licht keine Ladungsträger über die Bandkante anregen kann.

Die Aufbau- und die Zerfallszeiten des erfindungsgemäss hergestellten Wellenleiters liegen im Bereich weniger μs . Sie sind abhängig von der Intensität des Lichtes, welches den Wellenleiter induziert. Die Struktur des Wellenleiters kann daher innerhalb dieser kurzen Zeiten rekonfiguriert werden, was einen grossen Fortschritt gegenüber den bisher bekannten Methoden zur Herstellung von dynamischen, lichtinduzierten Wellenleitern bedeutet.

Die dynamische Rekonfiguration des Wellenleiters

selbst ist erfindungsgemäss sehr einfach, da dazu nur die räumliche Intensitätsverteilung des UV-Lichtes, welches auf die Oberfläche des Kristalles trifft, verändert werden muss. Dies lässt sich durch selektive, veränderbare Beleuchtung der Kristalloberfläche bewerkstelligen, z.B. durch lithographische Masken, durch Mikrospiegelarrays, oder durch ein Pixelfeld aus Flüssigkristallen.

Die Restriktion auf quasi 1-dimensionale Wellenleiter wird dadurch überwunden, dass der Kristall 1, z.B. durch Ionenimplantation, mit einem planaren Wellenleiter 2 vorstrukturiert wird, unterhalb derjenigen Oberfläche 3, die mit UV-Licht beleuchtet wird, wie in Fig. 4A gezeigt. Die Überlagerung dieses planaren Wellenleiters 2 mit der lichtinduzierten Wellenleiterstruktur führt zu 2-dimensionalen Wellenleitern, was in Fig. 4B am Beispiel eines linearen Wellenleiters 4 gezeigt ist.

Weiterhin lassen sich mit dem erfindungsgemässen Verfahren zahlreiche unterschiedliche Wellenleiterstrukturen in fotoleitenden und elektrooptischen Kristallen 1 herstellen, wie in Fig. 5 demonstriert ist. So z.B. ein Wellenleiter 3 zur optischen Signalübertragung zwischen zwei Lichtträgern 2 und 4 (Fig. 5A) oder Wellenleiterstrukturen 3 zur Verteilung eines optischen Signals 2 auf mehrere Lichtträger 4 (Fig. 5B). Aber auch dynamische optische Verbindungen 3 zwischen mehreren Eingängen 2 und Ausgängen 4 (Fig. 5C) oder eine Mach-Zehnder-Anordnung 3 (Fig. 5D) können auf diese Weise realisiert werden.

Die vorliegende Erfindung bietet daher ein einfaches Verfahren zur lichtinduzierten Erzeugung von dynamischen Wellenleitern in fotoleitenden und elektrooptischen Kristallen. Die Wellenleiter selbst können innerhalb von Zeiten weniger μs durch blosse Änderung der Beleuchtung des Kristalls beliebig rekonfiguriert werden, weshalb vorliegende Erfindung eine besondere Bereicherung in dem einschlägigen technischen Gebiet darstellt.

Referenzen:

1. P. Günter und J. P. Huignard Eds., fotorefractive materials and their applications, Vol. I+II (Cambridge University Press, Cambridge, New York, 1990)
2. European Patent Application EP 0 689 067 A2 (Fujitsu Ltd)
3. M.-F. Shih, Z. G. Chen, M. Mitchell, M. Segev, H. Lee, R. S. Feigelson, und J. P. Wilde, J. Opt. Soc. Am. B 14, 3091 (1997)
4. M. Segev and G. Stegeman, Physics Today 51, 42 (1998)
5. K. Itoh, O. Matoba, and Y. Ichioka, Opt. Lett. 19, 652 (1994)
6. O. Matoba, T. Inujima, T. Shimura, und K. Kuroda, J. Opt. Soc. Am. B 15, 2006 (1998)
7. G. Montemezzani, P. Rogin, M. Zgonik, und P. Günter: Phys. Rev. B 49, 2484 (1994)

Patentansprüche

1. Verfahren zur Erzeugung dynamischer lichtinduzierter Wellenleiter in fotoleitenden und elektrooptischen Materialien, dadurch gekennzeichnet, dass die Wellenleiterstruktur durch die räumliche und zeitliche

Intensitätsverteilung einer oder mehrerer Lichtwellen an einer Oberfläche des unter elektrischer Spannung stehenden Materials erzeugt wird.

2. Verfahren gemäss Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass das Material ein elektrooptischer, fotorefraktiver Kristall ist.

5

3. Verfahren gemäss den Ansprüchen 1 und 2, dadurch gekennzeichnet, dass als elektrooptisches Material Kalium-Niobat (KNbO_3) verwendet wird.

4. Verfahren gemäss den Ansprüchen 1 bis 3, dadurch gekennzeichnet, dass das die Wellenleiterstruktur induzierende Licht eine Wellenlänge kürzer als die Bandkante des Materials besitzt.

10

5. Verfahren gemäss einem der Ansprüche 1 bis 4, dadurch gekennzeichnet, dass das verwendete Material bereits einen vorstrukturierten planaren Wellenleiter an derjenigen Oberfläche aufweist, an welcher der dynamische Wellenleiter durch Licht induziert wird.

15

6. Anwendung des Verfahrens nach einem der Ansprüche 1 bis 5, zur Führung, Beeinflussung oder Steuerung von Lichtwellen.

20

7. Anwendung gemäss Anspruch 6, dadurch gekennzeichnet, dass durch dynamische Rekonfiguration der induzierten Wellenleiterstruktur die im Wellenleiter geführten Lichtwellen räumlich oder zeitlich beeinflusst oder gesteuert werden.

25

8. Anwendung gemäss Anspruch 6, dadurch gekennzeichnet, dass die induzierte Wellenleiterstruktur zur optischen Signalübertragung, zur Verteilung eines optischen Signals auf mehrere Lichtträger oder zur dynamischen Kopplung verschiedener optischer Wellenleiter benutzt wird.

30

9. Anwendung gemäss Anspruch 6, dadurch gekennzeichnet, dass die induzierte Wellenleiterstruktur zur fiberoptischen Kommunikation verwendet wird, insbesondere zur Umleitung, zur Verteilung, zur Kopplung oder zur Modulation von optischen Signalen.

35

40

45

50

55

60

65

4

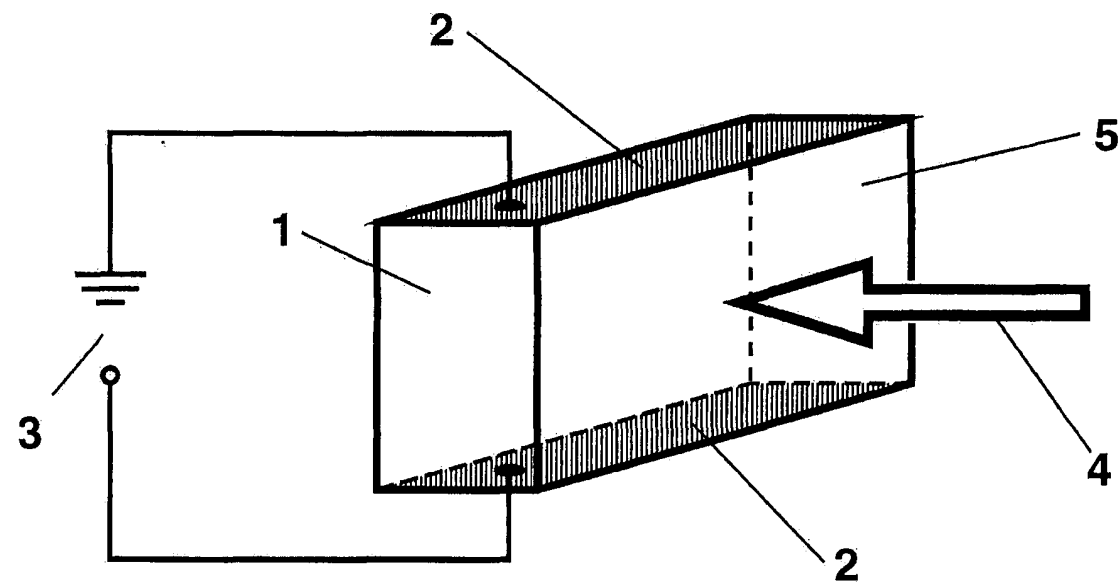


Fig. 1

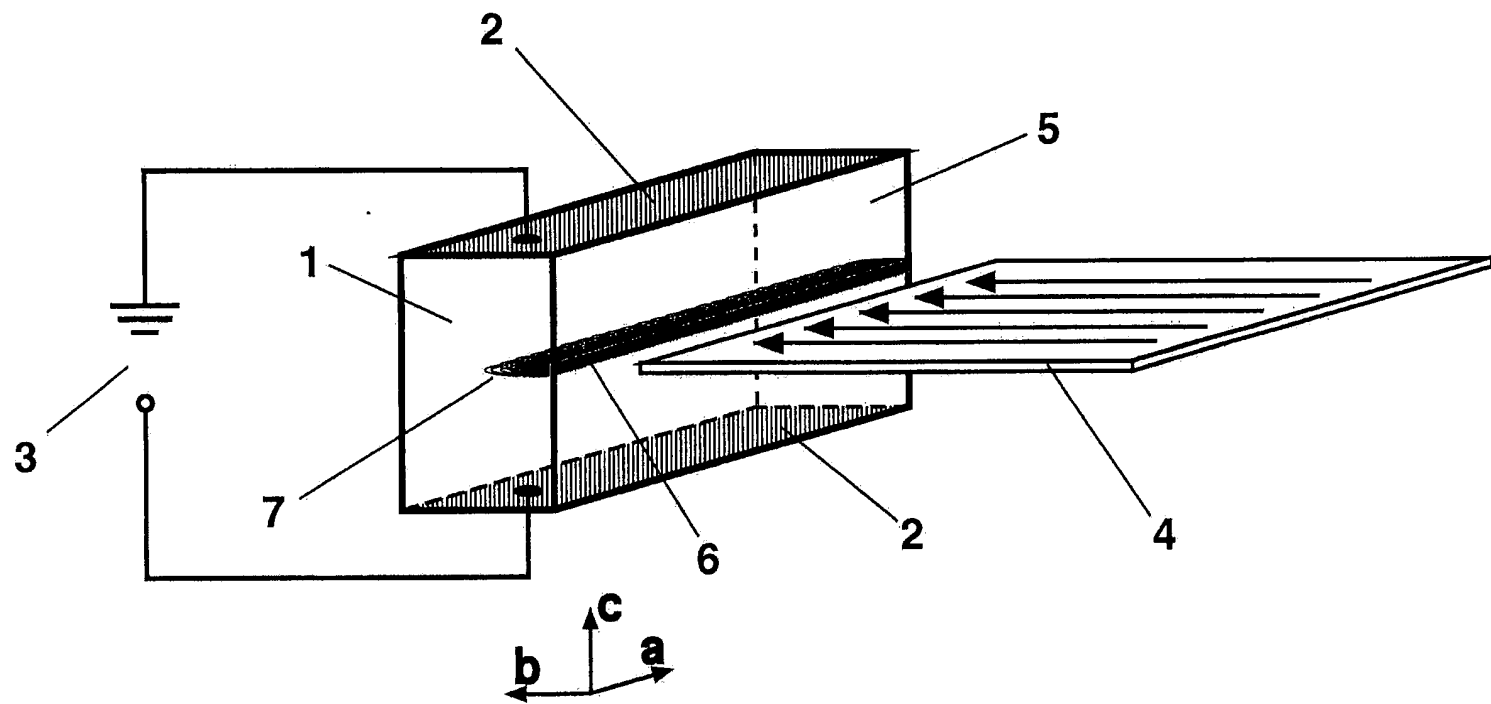


Fig. 2

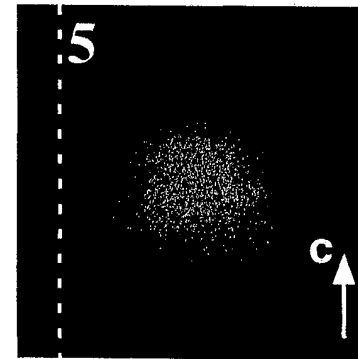


Fig.3A

CCD Image

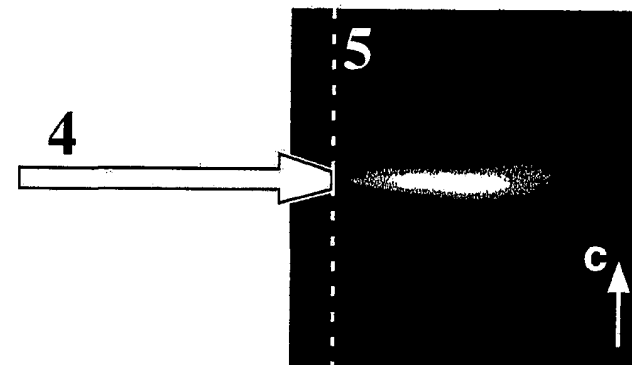


Fig.3B

CCD Image

Fig. 3

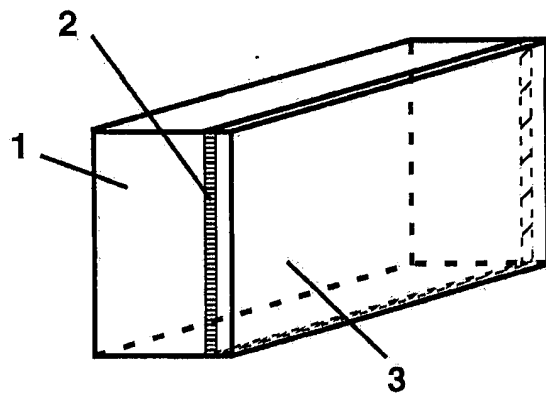


Fig.4A

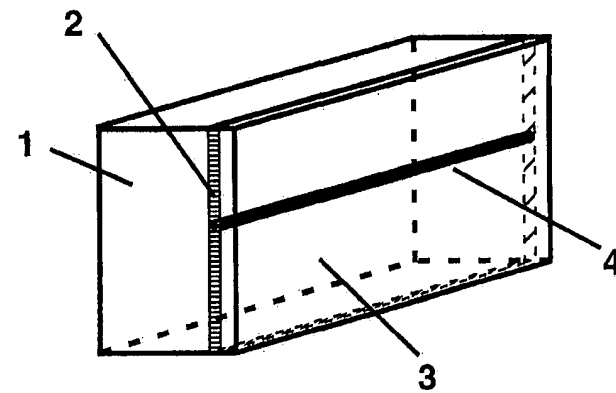


Fig.4B

Fig. 4

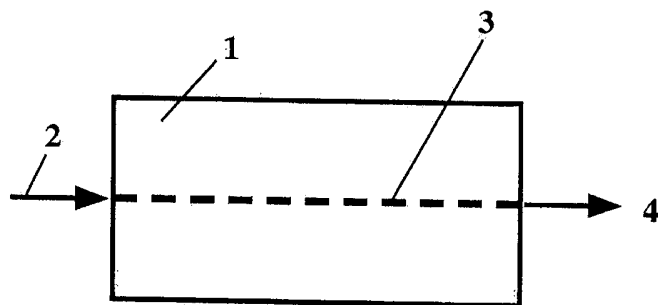


Fig.5A

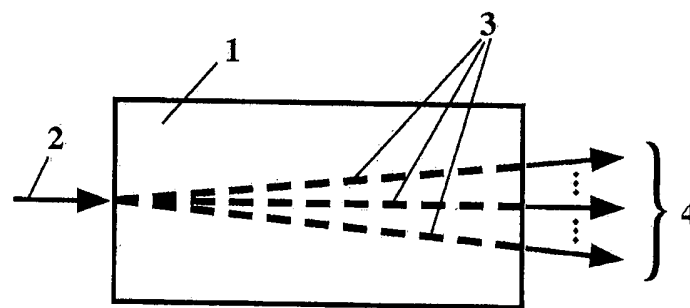


Fig.5B

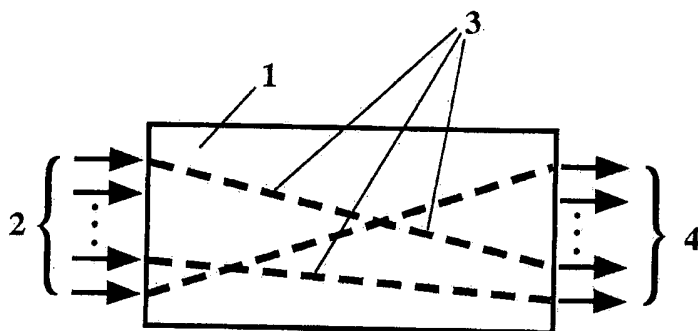


Fig.5C

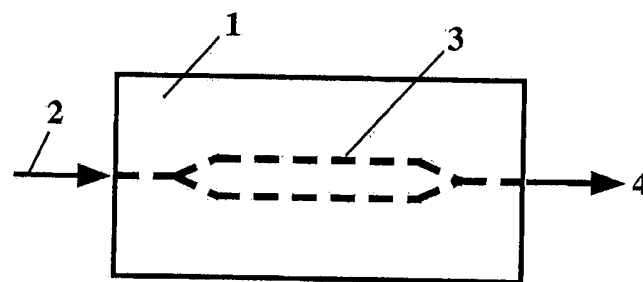


Fig.5D

Fig. 5