



(19)
Bundesrepublik Deutschland
Deutsches Patent- und Markenamt

(10) **DE 602 14 031 T2** 2007.03.15

(12) **Übersetzung der europäischen Patentschrift**

(97) **EP 1 451 628 B1**

(51) Int Cl.⁸: **G02B 26/02** (2006.01)

(21) Deutsches Aktenzeichen: **602 14 031.5**

(86) PCT-Aktenzeichen: **PCT/US02/13343**

(96) Europäisches Aktenzeichen: **02 784 888.6**

(87) PCT-Veröffentlichungs-Nr.: **WO 2003/007051**

(86) PCT-Anmeldetag: **25.04.2002**

(87) Veröffentlichungstag
der PCT-Anmeldung: **23.01.2003**

(97) Erstveröffentlichung durch das EPA: **01.09.2004**

(97) Veröffentlichungstag
der Patenterteilung beim EPA: **16.08.2006**

(47) Veröffentlichungstag im Patentblatt: **15.03.2007**

(30) Unionspriorität:

905769	13.07.2001	US
905736	13.07.2001	US

(84) Benannte Vertragsstaaten:

DE, GB

(73) Patentinhaber:

Rosemount Inc., Eden Prairie, Minn., US

(72) Erfinder:

FRICK, L., Roger, Hackensack, MN 56542, US;
WILLCOX, R., Charles, Eden Prairie, MN 55346, US

(74) Vertreter:

Meissner, Bolte & Partner GbR, 80538 München

(54) Bezeichnung: **OPTISCHER SCHALTER MIT EINEM BEWEGLICHEN HOLOGRAPHISCHEN OPTISCHEN ELEMENT**

Anmerkung: Innerhalb von neun Monaten nach der Bekanntmachung des Hinweises auf die Erteilung des europäischen Patents kann jedermann beim Europäischen Patentamt gegen das erteilte europäische Patent Einspruch einlegen. Der Einspruch ist schriftlich einzureichen und zu begründen. Er gilt erst als eingelegt, wenn die Einspruchsgebühr entrichtet worden ist (Art. 99 (1) Europäisches Patentübereinkommen).

Die Übersetzung ist gemäß Artikel II § 3 Abs. 1 IntPatÜG 1991 vom Patentinhaber eingereicht worden. Sie wurde vom Deutschen Patent- und Markenamt inhaltlich nicht geprüft.

Beschreibung

[0001] Die vorliegende Anmeldung beansprucht die Priorität der vorläufigen US-Anmeldung Nr. 60/223 503, angemeldet am 7. August 2001, der vorläufigen US-Anmeldung Nr. 60/223 508, angemeldet am 7. August 2000, und der vorläufigen US-Anmeldung Nr. 60/271 103, angemeldet am 23. Februar 2001.

Gebiet der Erfindung

[0002] Die vorliegende Erfindung betrifft allgemein optische Elemente und speziell optische Gitter und holografische optische Elemente, die zur Ausführung von optischen Schaltfunktionen verwendet werden.

Hintergrund des Stands der Technik

[0003] Beugungsoptische Systeme, die optische Elemente verwenden, die sich fortpflanzende Wellenfronten mittels Beugung beeinflussen, sind bekannt. US-B-6 212 314 zeigt eine optoelektronische mechanische Vorrichtung, die einen planaren Wellenleiter aufweist. Ein Gitter kann in den oder aus dem Bereich des starken abklingenden Feldes des sich in dem Wellenleiter ausbreitenden Signals bewegt werden, um selektiv eine bestimmte Wellenlänge zu reflektieren. Beispielhafte Strukturen von beugungsoptischen Elementen bzw. BOE sind Beugungsgitter, Zonenlinsen und holografische Spiegel. BOE, bei denen die Beugungselementgrößen nahe oder ungefähr gleich der Lichtwellenlänge sind, sind allgemein als holografische optische Elemente bzw. HOE bekannt. Ein Vorteil der Beugungsoptik ist, daß eine Struktur wie etwa eine BOE-Linse auf einer ebenen Oberfläche gebildet werden kann und somit kleiner, billiger und einfacher ausrichtbar ist als ein Gegenstück der Brechungsoptik. Ein Nachteil ist, daß Beugungsoptik-Strukturen aus Mustern von Beugungselementen gebildet sind, die gegenüber der Wellenlänge des verwendeten Lichts empfindlich sind.

[0004] Holografische optische Elemente können auf optischen Medien wie fotografischen Filmen aufgezeichnet werden, um optische Bauelemente wie Linsen und Prismen herzustellen. Die Hologramm-Muster sind Beugungsmuster, die durch Aufzeichnen des Interferenzmusters von zwei Laserstrahlen erstellt werden. Das resultierende Beugungsmuster hat Bestandteilelemente mit Dimensionen in der Größenordnung einer Wellenlänge. HOEs können auch mit mechanischen Mitteln wie etwa durch Gravieren mit einem Diamantwerkzeug, Fotolithografie oder Prägen mit einem Hartmetall-Master erzeugt werden.

[0005] HOEs sind auf bestimmten Anwendungsgebieten aus mehreren Gründen vorteilhaft. HOEs können ein sehr dünnes Profil haben, was die Herstellung zahlreicher optischer Elemente geringerer Größe als im Fall herkömmlicher Gegenstände erlaubt.

Da HOEs ferner planare Elemente sind, können komplexe optische Systeme auf vereinfachte Weise zusammengebaut werden und benötigen weniger Platz als typische optische Mehrelementsysteme. Tatsächlich können HOEs selbstpositionierend sein, wodurch die Ausrichtungsprobleme erheblich verringert werden, die mit optischen Systemen, speziell komplexen optischen Systemen, einhergehen.

[0006] Im allgemeinen sind die Beugungsmuster von HOEs so ausgelegt, daß einfallendes Licht in Moden oder Richtungen durchgelassen wird. Moden werden herkömmlich mit $m = 0 + 1, -1, +2, -2$ usw. ... entsprechend ihrem Ort in bezug auf das einfallende Licht bezeichnet. Wenn das HOE als Linse oder Spiegel verwendet werden soll, handelt es sich typischerweise um zwei primäre Moden, und zwar die $m = 0$ -Mode und die $m = -1$ -Mode. In der $m = 0$ -Mode erscheint einfallendes Licht unbeeinflusst durch das HOE, d. h. wenn das HOE ein Reflexionselement ist, wird Licht in die Mode nullter Ordnung reflektiert, als ob das Licht von einer ebenen Spiegelfläche reflektiert worden wäre, und wenn das HOE ein durchlässiges Element ist, tritt Licht aus dem Element aus, als ob es durch ein transparentes optisches Medium durchgelassen worden wäre. Die $m = -1$ -Mode ist ein direktes Ergebnis der durch die Konstruktion bestimmten optischen Funktion des HOE. Diese Mode ist im allgemeinen gegenüber der $m = 0$ -Mode versetzt. Bei typischen Vorrichtungen ist das HOE so gewählt, daß die Amplitude von Licht in der $m = 0$ -Mode durch Auslöschung minimiert wird und die Amplitude der gewünschten $m = -1$ -Mode durch Verstärkung maximiert wird. Der Winkel von einfallendem Licht und die Größe der Beugungselemente wird im allgemeinen so gewählt, daß andere Moden, welche die gewünschte optische Wirksamkeit stören könnten, nicht existieren.

[0007] Durch die Fähigkeit von HOEs, Licht von einem normalen Weg (d. h. koinzident mit einer $m = 0$ -Mode) in eine gebeugte Mode ($m = -1$) zu reflektieren, besteht der Wunsch, HOEs in Schaltvorrichtungen zu verwenden. Derzeitige Ausbildungen von HOEs begrenzen die Verwendung von HOEs als optische Schalter. HOEs werden im allgemeinen entweder innerhalb der Masse eines Materials oder an der Oberfläche eines Materials gebildet. Hologramme, die in dem Volumen eines holografischen Materials aufgezeichnet werden, haben geringe Verluste, sind aber sehr schwierig als Massenprodukt herzustellen. Beispiele sind dreidimensionale Strukturen, die im Volumen unter Verwendung von elektro-holografischen Materialien gebildet sind, die durch Anlegen eines elektrischen Feldes schaltbar sind. Andererseits können Hologramme mit Oberflächenrelief zwar massengefertigt werden, weisen aber den Nachteil eines geringen optischen Wirkungsgrads auf. Ein zusätzliches Problem bei diesen Oberflächenrelief-Hologrammen ist, daß sie nicht schaltbar sind.

[0008] Ungeachtet der genannten Nachteile von existierenden HOEs und BOEs ist es wünschenswert, HOEs und BOEs als Schalter mit optischen Medien zu verwenden.

Zusammenfassung der Erfindung

[0009] Gemäß der Erfindung wird ein optischer Schalter zum Übertragen eines optischen Signals gemäß dem Patentanspruch 1 angegeben.

[0010] Bevorzugte Ausführungsformen der Erfindung sind in den Unteransprüchen angegeben.

Kurze Beschreibung der Zeichnungen

[0011] [Fig. 1](#) ist eine Querschnittsansicht eines HOE bzw. holografischen optischen Elements, das Streifen in physischem Kontakt mit einer oberen Oberfläche eines optischen Substrats hat;

[0012] [Fig. 2](#) ist eine Querschnittsansicht eines alternativen HOE, bei dem das HOE bildende Streifen über dem optischen Substrat angeordnet und relativ dazu bewegbar sind, gemäß einer Ausführungsform eines optischen Schalters;

[0013] [Fig. 3](#) ist ein Diagramm der Luftspalthöhe eines HOE gegenüber dem HOE-Wirkungsgrad gemäß einem beispielhaften optischen Schalter;

[0014] [Fig. 4A](#) ist eine Perspektivansicht der Konstruktion von [Fig. 2](#) und zeigt das Schalten eines einfallenden Signals;

[0015] [Fig. 4B](#) ist eine Draufsicht auf die Struktur von [Fig. 2](#) und zeigt die Reflexion eines einfallenden Lichtsignals zu einem reflektierten Signal unter einem Winkel α ;

[0016] [Fig. 5](#) ist ein Diagramm eines Winkels θ_p gegen die Gitterperiode bzw. -konstante, dividiert durch die Wellenlänge für ein HOE in Übereinstimmung mit einem beispielhaften optischen Schalter;

[0017] [Fig. 6](#) ist ein Diagramm der HOE-Streifendicke gegen den HOE-Wirkungsgrad in Übereinstimmung mit einem beispielhaften optischen Schalter;

[0018] [Fig. 7](#) ist eine Seitenansicht einer beispielhaften Art und Weise der Einkopplung von Licht in das Substrat zur Totalreflexion in diesem gemäß einer Ausführungsform;

[0019] [Fig. 8](#) ist eine Seitenansicht einer alternativen Möglichkeit der Einkopplung von Licht in das Substrat zur Totalreflexion in diesem gemäß einer Ausführungsform;

[0020] [Fig. 9](#) ist eine Perspektivansicht des HOE

von [Fig. 2](#) und zeigt eine beispielhafte einseitig befestigte Anbringeinrichtung unter Verwendung eines Ankerbereichs, um die Streifen eines HOE bewegbar anzubringen;

[0021] [Fig. 10](#) ist eine Draufsicht auf das HOE von [Fig. 9](#) und zeigt eine über den Streifen des HOE angeordnete Elektrode zum Bewegen der Streifen relativ zu der oberen Oberfläche des Substrats in Übereinstimmung mit einem optischen Schalter;

[0022] [Fig. 11](#) ist eine beispielhafte teilweise Draufsicht auf ein anderes HOE gemäß einer Ausführungsform eines optischen Schalters;

[0023] [Fig. 12](#) ist eine Seitenansicht des HOE von [Fig. 11](#) und zeigt ferner eine Anbringstruktur und eine über den Streifen angeordnete Elektrode;

[0024] [Fig. 13](#) ist eine Perspektivansicht eines HOE, das ein Betätigungselement aus flexiblen Armen und Anbringfüße hat, gemäß einer bevorzugten Ausführungsform eines optischen Schalters; und

[0025] [Fig. 14](#) ist eine Draufsicht auf einen mit HOE gebildeten optischen 1×2 -Schalter gemäß einer Ausführungsform eines optischen $1 \times N$ -Schalters.

Beschreibung der bevorzugten Ausführungsform

[0026] Die vorliegende Erfindung löst die oben beschriebenen Probleme durch Bereitstellen eines holografischen optischen Elements bzw. HOE, das einfach herstellbar und mit einem optischen Substrat verwendbar ist, um einen optischen Schalter zu bilden. Bevorzugt sind die nachstehend beschriebenen holografischen optischen Elemente Gitterstrukturen, die relativ zu einem optischen Substrat, in dem sich ein Lichtsignal fortpflanzt, bewegbar sind. Die Bewegung des HOE bewirkt eine Kopplung und Entkopplung des HOE mit bzw. von dem Substrat, so daß dann, wenn sich ein Lichtsignal in dem Substrat fortpflanzt, das HOE selektiv mit dem Lichtsignal in Wechselwirkung gelangen kann. Um einen maximalen Wirkungsgrad zu erreichen, wird das Licht veranlaßt, sich in dem optischen Substrat unter Totalreflexion fortzupflanzen, was einen Bereich von Fortpflanzungswegen des in dem Substrat sich ausbreitenden Lichts einschließt. Die Totalreflexion ist ein wohlbekanntes Phänomen, die es Licht erlaubt, von der Grenzfläche zwischen zwei optischen Materialien verlustfrei reflektiert zu werden. Dies findet statt, wenn sich Licht in einem Material mit einer höheren Brechzahl als ein umgebendes optisches Medium fortpflanzt und das Licht unter einem Winkel auf die Grenzfläche trifft, der größer als ein kritischer Winkel ist, gemessen von der Normalen zu der Grenzfläche.

[0027] Die Totalreflexion erleichtert auch das Kopeln des HOE in die und aus der Position, und zwar

aufgrund des abklingenden Feldes, das unter Bedingungen der Totalreflexion an einer Reflexionsgrenze erzeugt wird. Ein HOE kann mit dem Substrat gekoppelt und davon entkoppelt werden durch Bewegen des HOE in eine Position in abklingende Feldkopplung bzw. außer abklingender Feldkopplung, und das Maß der Kopplung zwischen dem HOE und dem Substrat kann dadurch gesteuert werden, wie weit das HOE in das abklingende Feld hinein bewegt wird.

[0028] Als Hintergrund und zur Erläuterung der allgemeinen Funktion von mit optischen Substraten verwendeten holografischen optischen Elementen zeigt [Fig. 1](#) eine Querschnittsansicht eines HOE **100**. Das HOE **100** wird im einzelnen beschrieben in der gleichzeitig anhängigen Anmeldung mit dem Titel "Integrated Transparent Substrate and Diffractive Optical Element", veröffentlicht am 25. April 2002 als US-A-2002/0047129. Das HOE **100** ist an einem optischen Substrat **102** angeordnet, das bei der bevorzugten Ausführungsform im Infrarotbereich optisch durchlässig ist, und zwar zumindest um 1550 nm oder 1310 nm (Vakuumwellenlänge), wobei dies Übertragungswellenlängen sind, die für optische Nachrichtenübertragungen vorteilhaft sind. Das HOE **100** könnte jedoch bei jeder gewünschten Wellenlänge optisch durchlässig sein. Das Substrat **102** kann aus einem Quarzmaterial oder einem anderen Material bestehen, das für die Fortpflanzung eines Signals unter Totalreflexion und als Ätzstoppoberfläche für einen fotolithografischen Prozeß geeignet ist. Bei der bevorzugten Ausführungsform ist das Substrat **102** aus Saphir hergestellt.

[0029] Ein einfallender Lichtstrahl **104** durchläuft das Substrat **102** unter Totalreflexion, die, wie bekannt ist, oberhalb eines kritischen Einfallswinkels an der äußeren Oberflächengrenze des Substrats **102** auftritt. Ein Einfallswinkel θ ist in [Fig. 1](#) gezeigt und von einer Normalen zu einer oberen Oberfläche **106** und in das Substrat **102** verlaufend gemessen. Bei einem Saphirsubstrat **102**, das von einer mit der oberen Oberfläche **106** in Kontakt befindlichen Luftgrenze umgeben ist, ist der kritische Winkel ungefähr 35° , und somit soll θ bei diesem Wert oder darüber liegen. Der Lichtstrahl **104** kann aus Winkeln über dem kritischen Winkel zum Auftreffen auf die obere Oberfläche **106** gebracht werden und dennoch den Betrieb des HOE **100** erleichtern. Bei der bevorzugten Ausführungsform befindet sich zwar Luft über der oberen Oberfläche **106**, aber es können andere Materialien über dem Substrat **102** vorhanden sein, solange diese Materialien eine kleinere Brechzahl als das Substrat **102** haben, um die Bedingungen für die Totalreflexion herzustellen. Ferner bietet zwar die Totalreflexion an der oberen Oberfläche **106** und einer unteren Oberfläche **107** des Substrats **102** die wirkungsvollste Konstruktion mit dem geringsten Kostenaufwand, aber alternativ könnte die Totalreflexion an der oberen Oberfläche **106** erfolgen, und es könnten Spiegel

oder eine Reflexionsbeschichtung an der unteren Oberfläche **107** verwendet werden, um den Lichtstrahl **104** zu reflektieren. Ebenso könnte eine Ummantelungsschicht unter der unteren Oberfläche **107** verwendet werden.

[0030] Das HOE **100** weist Streifen **108** auf, die direkt an einer oberen Oberfläche **106** des Substrats **102** angeordnet sind. Die Streifen **108** bestehen aus einem optisch transparenten Material, und – wie bekannt ist – die Geometrie der Streifen **108** beeinflusst die Eigenschaften und die Funktionsweise des HOE **100**. Die Ausführungsform von [Fig. 1](#) zeigt die Streifen **108**, die in direktem physischem Kontakt mit der oberen Oberfläche **106** geformt sind. Die Streifen **108** können aus einem einkristallinen Silizium, Polysilizium oder anderen optisch durchlässigen Material gebildet sein. Nur wenige Streifen **108** sind beispielhaft gezeigt, aber im Gebrauch wäre typischerweise eine große Zahl solcher Streifen **108** vorhanden, um sicherzustellen, daß der Lichtstrahl **104** auf einen Teil des HOE **100** fällt. Ferner sind die Streifen **108** im Querschnitt gezeigt und verlaufen tatsächlich in die Darstellung und aus dieser heraus.

[0031] Die Streifen **108** haben eine Breite 'b' und sind um eine Breite 'c' voneinander beabstandet. Die Gitterkonstante 'a' ist gleich der Summe dieser beiden Werte. Das HOE **100** reflektiert einen einfallenden Lichtstrahl **104** zu einem Lichtstrahl **114**. Die Breite 'a' beeinflusst die Lichtwellenlänge, für dessen Reflexion das HOE **100** optimiert ist, sowie den Austrittswinkel des reflektierten Lichts. Bei der bevorzugten Ausführungsform ist die Breite 'b' gleich der Breite 'c', aber diese Breiten können, falls gewünscht, ungleich sein. Die Streifendicke und -breite können so eingestellt sein, dass die Stärke des reflektierten Lichts maximiert wird. Außerdem könnte eine Variation zwischen den Breiten vorgesehen sein, wobei die Breite 'b' variieren könnte (z. B. b_1, b_2, b_3 usw.) und die Breite 'c' variieren könnte (z. B. c_1, c_2, c_3 usw.). Beispielsweise könnte ein HOE mit unterschiedlichen 'a'-Werten (a_1, a_2, a_3 usw.) ausgebildet sein, wobei sich 'a' kontinuierlich ändert, so dass $a_1 > a_2 > a_3 > \dots$ usw. ist. Eine beispielhafte Vorrichtung könnte verwendet werden, um die Streuung in dem reflektierten Signal zu verringern oder das Maß der Streuung darin zu erhöhen, was bei Anwendungen zur Demultiplexierung nützlich sein kann. Da die Streifen **108** ein Gittermuster des HOE **100** bilden, ist eine exakte dimensionsmäßige Präzision nicht erforderlich, um eine funktionsfähige Vorrichtung herzustellen. Der Kombinationseffekt der Streifen **108** besteht darin, die Ungenauigkeit der Größenbemessung der einzelnen Streifen **108** zu minimieren. Es wird dennoch bevorzugt, daß das HOE **100** eine 'a'-Periodizität hat, d. h. daß 'a' in dem gesamten HOE **100** im wesentlichen gleich ist. Auf diese Weise ist 'a' in bezug auf die Funktion des HOE **100** einflussreicher als 'b' oder 'c'. Bei einer beispielhaften Struktur ist die Breite 'a' in

der Größenordnung von $1,5\ \mu\text{m}$, d. h. ungefähr die zweifache Wellenlänge des einfallenden Lichts in dem Medium.

[0032] Es folgt eine allgemeine Erläuterung der Funktionsweise des HOE **100**; die Streifen **108** wirken mit der oberen Oberfläche **106** zusammen und definieren ein Beugungsgittermuster. Das einfallende Licht **104** trifft auf das Beugungsgittermuster und wird, wie gezeigt und nachstehend beschrieben wird, reflektiert, wodurch HOE **100** als ein geneigtes reflexionsfähiges Spiegelement etabliert wird. Die Abstände 'c' zwischen den Streifen **108** bilden gemeinsam eine Grenzschicht **110**, die im vorliegenden Fall eine Luft-Substrat-Grenzschicht ist. Während der Lichtstrahl **104** unter Totalreflexion durch das Substrat **102** geht, wird ein Teil des Lichtstrahls **104** an der Grenzschicht **110** unter Totalreflexion gebeugt. Das heißt, ein erster Anteil des Lichtstrahls **104** trifft auf die Luft-Substrat-Grenzschicht und wird durch die Reflexionswirkung der Substratabstände zwischen den Streifen gebeugt. Da diese Abstände in der Größenordnung der Wellenlänge des einfallenden Lichts sind, findet eine Beugung anstelle einer ebenen Wellenreflexion statt. Ein zweiter Anteil des auf das HOE **100** fallenden Lichtstrahls **104** fällt auf denjenigen Bereich der oberen Oberfläche **106**, der unmittelbar unter den Streifen **108** liegt. Dabei absorbieren die Streifen **108** Lichtenergie von dem Substrat und wirken wie verlustarme Wellenleiterresonatoren, die an einer oberen Oberfläche **112** und seitlichen Oberflächen durch ein refraktives Material mit niedrigerer Brechzahl, und zwar Luft bei der bevorzugten Ausführungsform, begrenzt sind. In den Streifen **108** wird im wesentlichen eine Stehwelle erzeugt, und absorbiertes Licht tritt schließlich aus den Streifen **108** aus und tritt erneut in das Substrat **102** als gebeugtes Licht ein, das in bezug auf das Licht phasenverschoben ist, das an der Grenzschicht **110** zwischen den Streifen **108** gebeugt wird. Wenn die Streifen **108** eine höhere Brechzahl als das Substrat **102** haben, wird der Wirkungsgrad weiter verbessert, weil die Stehwellen ebenfalls von einer unteren Oberfläche mit einem Übergang zu einer niedrigeren Brechzahl begrenzt sind. Die Wirkung des Streifens **108** und der Grenzschicht **110** besteht darin, daß der Lichtstrahl **104** effizient in eine $m = -1$ -Mode gebeugt wird, die sich in dem Substrat **102** fortpflanzt. Der Lichtstrahl **114** stellt dieses reflektierte Signal dar. Der Weg **116** ist der derjenige Weg, den der Lichtstrahl innerhalb des Substrats **102** nehmen würde, wenn er von den Streifen **108** nicht beeinflusst werden würde. Die Eigenschaften der reflektierten Lichtstrahlen der angegebenen HOEs werden im einzelnen unter Bezugnahme auf die [Fig. 4A](#) und [Fig. 4B](#) erläutert. Die Streifen **108** sind in unmittelbarem physischem Kontakt mit der oberen Oberfläche **106** des Substrats **102** angeordnet. Bei anderen Ausführungsformen findet jedoch kein unmittelbarer physischer Kontakt statt.

[0033] [Fig. 1](#) und weitere zu erläuternde Figuren stehen im Gegensatz zu bekannten Vorrichtungen, welche die Totalreflexion nur in Wellenleitern zeigen, die unter Anwendung teurer Dotiertechniken und anderer Herstellungsverfahren separat in Substraten gebildet sind. Die Verwendung eines Substrats für die Signalfortpflanzung wird aus zahlreichen Gründen gegenüber derjenigen eines Wellenleiters bevorzugt. Signale, die sich in einem Substrat fortpflanzen, sind nicht wie im Fall von Wellenleitern begrenzt, was Flexibilität bei der Schalterkonstruktion erlaubt und die Kopplungsprobleme erheblich mindert, die Wellenleiterkonstruktionen eigen sind, bei denen beispielsweise ein Signal in einem Wellenleiter zur Fortpflanzung in einen anderen Wellenleiter umgeleitet werden mußte. Außerdem ermöglicht die Verwendung des Substrats für die Totalreflexion eine quasi-freie räumliche Fortpflanzung für Signale, was zu hoher Flexibilität beim Koppeln von umgeschalteten Ausgangssignalen in Ausgangslichtleiter, -multiplexer und andere optische Einrichtungen führt. Ferner eliminiert die Verwendung eines Substrats die gesonderte Fertigung, die zur Bildung von Wellenleitern in oder an einem Substratmaterial erforderlich ist, wodurch Schalterkonstruktion und -fertigung vereinfacht und die Kosten gesenkt werden. Auch angesichts dieser Vorteile und der bevorzugten Verwendung des Substrats mit einer Luft-Grenzfläche zur Fortpflanzung könnte das Substrat **102** dennoch so geändert werden, daß es Wellenleiter beispielsweise zum Koppeln optischer Signale mit optischen Lichtleitfasern aufweist.

[0034] [Fig. 1](#) zeigt ein HOE in physischem Kontakt mit einem Substrat; [Fig. 2](#) zeigt dagegen ein HOE **200**, das über einem Substrat **202** (d. h. außer physischem Kontakt mit diesem) angeordnet und relativ dazu aus einer entkoppelten (oder "Aus"-)Position, in der Licht **204** unbeeinflusst durch das Substrat **202** geht, und einer gekoppelten (oder "Ein"-) Position bewegbar ist, in der Licht **204** von dem HOE **200** beeinflusst wird. Somit kann das HOE **200** als Schalter wirksam sein.

[0035] Der Lichtstrahl **204** pflanzt sich in dem Substrat **202** unter Totalreflexion fort. Die Fortpflanzung unter Totalreflexion in dem Substrat **202** kann durch das Einkoppeln von Licht in das Substrat erreicht werden, siehe die folgenden [Fig. 7](#) und [Fig. 8](#). Ferner braucht ebenso wie im Fall von [Fig. 1](#) die Totalreflexion nur an einer oberen Oberfläche **206** des Substrats **202** etabliert zu werden, wenn Spiegel oder eine reflexionsfähige Schicht an einer unteren Oberfläche **207** des Substrats vorhanden sind, obwohl die Totalreflexion bevorzugt an beiden Oberflächen **206**, **207** stattfindet.

[0036] Das HOE **200** ist aus Streifen **208** gebildet, die bevorzugt über der oberen Oberfläche **206** des Substrats **202** positioniert sind. Die Streifen **208** wirken mit dem Substrat **202** ebenso wie die Streifen

108 in dem HOE **100** zusammen, wobei in [Fig. 2](#) der Unterschied darin besteht, daß die Streifen **208** nicht in direktem physischem Kontakt mit der oberen Oberfläche **206** zu sein brauchen, sondern statt dessen durch ein abklingendes Feld in Kopplungskontakt mit dem Substrat **202** sind. Wenn die Streifen **208** innerhalb des abklingenden Feldes sich über die obere Oberfläche **206** erstrecken (d. h. in der "Ein"-Position sind), wird ein Anteil des Lichtstrahls **204** in die Streifen **208** eingekoppelt. Dieses Koppeln der Streifen **208** kann als ähnlich der gestörten bzw. verhinderten Totalreflexion angesehen werden. Die Wirkung der Streifen stört die Totalreflexion des optischen Signals und bewirkt, daß das Signal zurückgeleitet wird. Wenn die Streifen **208** außerhalb der Kopplungsdistanz des abklingenden Feldes (d. h. in der "Aus"-Position) sind, wird der Lichtstrahl **204** nicht von den Streifen **208** beeinflusst, und der Lichtstrahl **204** fährt fort, sich als Signal **214** fortzupflanzen. Auf diese Weise erfolgt durch das Einstellen der Luftspalthöhe der Streifen **208** das Umschalten des ankommenden Lichtstrahls **204** aus dem Weg **214** in einen Reflexionslichtstrahlweg **216**.

[0037] Die Streifen **208** und das Substrat **202** können als Kombination zur Bildung eines Beugungsmusters des HOE **200** angesehen werden ähnlich dem, das von der Struktur von [Fig. 1](#) gebildet wird. Ein Anteil des Lichts **204** fällt auf eine Grenzschicht **210**, die an der oberen Oberfläche **206** vorhanden ist, aber nur über diejenigen Bereiche der oberen Oberfläche **206**, die mit den Zwischenräumen zwischen den Streifen **208** koinzident sind. Die Streifen **208** sind von einer oberen Oberfläche **212** begrenzt, über der eine Luftumgebung vorhanden ist. Die Resonatorfunktion der Streifen **208** ist ähnlich derjenigen der Streifen **108** von [Fig. 1](#), wobei jedoch in [Fig. 2](#) die Streifen **208** Energie durch abklingende Feldkopplung bei der bevorzugten Ausführungsform empfangen und nicht von einer In-Kontakt-Brechung an einer physischen Grenze. Die Wirkung der Streifen **208** und der Grenzschicht **210** besteht darin, den Lichtstrahl **204** kollektiv in eine $m = -1$ -Mode zu beugen, die in [Fig. 2](#) durch den Reflexionsweg **216** dargestellt ist. Die minimierte $m = 0$ -Mode ist koinzident mit dem Normalweglichtstrahl **204** und pflanzt sich, wenn von den Streifen **208** nicht beeinflusst, d. h. als Lichtstrahl **214** fort.

[0038] Die Tiefe des abklingenden Feldes über der oberen Oberfläche **206** bestimmt die Luftspalthöhe zwischen den Streifen **208** und der oberen Oberfläche **206**, welche die "Ein"- und "Aus"-Positionen bestimmen. [Fig. 3](#) ist ein Diagramm, das den Wirkungsgrad von Siliziumstreifen, die ein HOE über einem Saphirsubstrat bilden, für unterschiedliche Zwischenräume zwischen der oberen Oberfläche **206** des Substrats **202** und der Unterseite der Streifen **208** bezeichnet. Der Wirkungsgrad repräsentiert das Verhältnis von Leistung in der $m = -1$ -Mode der einfallenden

den Leistung. Für die folgenden Parameterbedingungen $a' = 1,5 \mu\text{m}$, Streifenhöhe $= 2,15 \mu\text{m}$, Wellenlänge $\lambda = 1,55 \mu\text{m}$, TE-Modenfortpflanzung, $\theta = 36^\circ$ und $\phi = 59,8^\circ$ (d. h. $\alpha = 60,4^\circ$) (einige dieser Parameter sind nachstehend, einige vorstehend erläutert) ist der Wirkungsgrad des als Gitter wirkenden HOE wie gezeigt. Im allgemeinen ist der HOE-Wirkungsgrad zu dem Luftspalt auf exponentielle Weise umgekehrt proportional. Das erlaubt es, den Schalter mit einem Minimum an Bewegung in eine vollständige "Aus"-Position zu stellen. Wie ersichtlich ist, wird der höchste Wirkungsgrad nahe der Luftspalthöhe von ungefähr 0,11 erreicht, und somit kann [Fig. 1](#) als eine Veranschaulichung eines bewegbaren HOE betrachtet werden, das in die Luftspalthöhe mit dem höchsten Wirkungsgrad bewegt ist.

[0039] Aufgrund von Haftreibung kann es aber erwünscht sein, daß Streifen nicht in physischem Kontakt mit den oberen Oberflächen der Substrate, sondern um eine bestimmte Strecke über dem Substrat gebildet werden. Das kann durch die Anwendung kleiner Höcker **218** erleichtert werden, die an den unteren Oberflächen der Streifen gebildet sind. Sie werden allgemein in solchen Strukturen verwendet, um die Kontaktfläche zu begrenzen, die Haftreibungskräften unterliegt.

[0040] [Fig. 3](#) zeigt ferner, daß das HOE oberhalb von $2 \mu\text{m}$ außer Kopplungskontakt ist, d. h. das HOE wäre dann in der "Aus"-Position. Bei der bevorzugten Ausführungsform von [Fig. 2](#) ist jedoch der Luftspalt für die "Aus"-Position mit ungefähr $12 \mu\text{m}$ vorgegeben, um sicherzustellen, daß Industriestandards wie etwa dem Standard Telecordia GR 1073 entsprochen wird. Diese Standards begrenzen wirksam die Signalmenge, die aus einem Schalter in einer "Aus"-Position austreten (lecken) kann. Da die Tiefe des abklingenden Feldes von zahlreichen Parametern abhängig ist, sind die Beispiele der Luftspalte in [Fig. 3](#) beispielhaft. Mit zunehmendem θ wird sogar das über dem Substrat sich erstreckende abklingende Feld flacher, wobei das maximale abklingende Feld bei oder nahe dem kritischen Winkel für die Totalreflexion bzw. TIR auftritt. Infolgedessen liegen bevorzugte Bereiche von θ für die hier angegebenen Ausführungsformen zwischen dem kritischen Winkel und ungefähr 10° über dem kritischen Winkel.

[0041] Ein Merkmal des HOE **200** ist, daß der reflektierte Lichtstrahl **216** in einer Ebene läuft, die unter einem Winkel α zu der Fortpflanzungsebene des Lichtstrahls **204** ist. Somit bewegt sich der reflektierte Lichtstrahl **216** in einer Ebene, die sich aus der Darstellung von [Fig. 2](#) hinaus erstreckt. Diese Fortpflanzung ist aus den [Fig. 4A](#) und [Fig. 4B](#) besser ersichtlich. Dieses Merkmal erleichtert die Verwendung des HOE **200** als optischer Schalter, da hierdurch ermöglicht wird, eine erste Detektor- oder Kopplungseinrichtung zum Empfang des nicht-geschalteten Sig-

nals **214** zu positionieren und eine zweite Detektor- oder Kopplungseinrichtung unter einem Winkel dazu für den Empfang des geschalteten Signals **216** zu positionieren.

[0042] Die Reflexionswinkel α oder θ_p , die von dem HOE **200** erzeugt werden, sind von zahlreichen Faktoren abhängig, unter anderem der Streifenkonstanten 'a', dem Einfallswinkel θ und der Lichtwellenlänge λ . Ein beispielhaftes Diagramm, das die Beziehung zwischen θ_p und diesen Variablen zeigt, ist in [Fig. 5](#) zu sehen. In [Fig. 5](#) ist der Winkel θ_p auf der X-Achse und 'a'/ λ auf der Y-Achse für verschiedene Einfallswinkel θ aufgetragen. Lambda (λ) ist die Wellenlänge von Licht, das sich im Inneren des Substratmaterials fortpflanzt, die gleich der Wellenlänge von Licht in einem Vakuum, dividiert durch die Brechzahl des Substratmaterials, ist. Im Fall von Saphir ist die Brechzahl ungefähr 1,74, was ein inneres λ von ungefähr 0,89 μm für den optischen Übertragungskanal von 1,55 μm ergibt. Wie ersichtlich ist, resultiert 'a'/ λ von 1,5 im Fall von $\theta = 35^\circ$ in einem θ_p von ungefähr 110° . Gleichermaßen resultiert ein 'a'/ λ von 1,5 im Fall von $\theta = 45^\circ$ in einem θ_p von ungefähr 125° . Das Diagramm zeigt auch, daß θ_p für die gegebenen Einfallswinkel θ in Abhängigkeit von den Parametern im Bereich zwischen ungefähr 90° und ungefähr 145° liegen kann. Das Diagramm geht davon aus, daß der umgeschaltete Strahl den gleichen Einfallswinkel in bezug auf die Substratoberfläche wie der einfallende Strahl hat, wenn auch in einer davon verschiedenen Fortpflanzungsebene. Das Diagramm zeigt außerdem beispielhafte Begrenzungen an 'a', obwohl 'a'-Bereiche sich im allgemeinen in Abhängigkeit von Parametern von ungefähr 0,5 λ bis 3 λ erstrecken. Das Diagramm von [Fig. 5](#) zeigt ferner einen verbotenen Bereich, der über einer Linie F verläuft und in dem Licht in mehr Moden als nur der $m = -1$ -Mode reflektiert wird.

[0043] Bei erneuter Bezugnahme auf [Fig. 4A](#) ist zu sehen, daß zum Reflektieren des einfallenden Lichtstrahls **204** in den Fortpflanzungsweg **216** die Streifen **208** nicht rechtwinklig zu der Fortpflanzungsebene des Lichtstrahls **204**, sondern statt dessen unter einem Winkel dazu verlaufen. Insbesondere sind die Streifen **208** senkrecht zu einer den Winkel θ_p halbierenden Linie. Wenn die Streifen **208** rechtwinklig zu der Fortpflanzungsebene des Lichtstrahls **204** wären, würde das Reflexionslicht in der Fortpflanzungsebene des Lichtstrahls **204** sein. Außerdem ist zu sehen, daß bei der bevorzugten Ausführungsform die Streifen **208** parallele, lineare Streifen sind. Andere Streifen wie etwa gekrümmte Streifen für die Fokussierung können ebenfalls verwendet werden. Tatsächlich können bekannte Gitter-Softwareprogramme angewandt werden, um zahlreiche Arten von Gitterauslegungen unter Berücksichtigung der gewünschten Bedingungen und Parameter, die hier angegeben sind, zu entwickeln.

[0044] Die Dicke der Streifen **208** bewirkt eine Phasenverschiebung zwischen dem von der Grenzschicht **210** reflektierten Licht und dem von den Resonatorstreifen **208** reflektierten Licht. Bei der bevorzugten Ausführungsform sind die Dicken der Streifen **208** identisch. Bevorzugt haben die Streifen **208** eine Dicke von mehr als 1 μm , so daß sichergestellt ist, daß die Streifen **208** eine ausreichende strukturelle Steifigkeit haben, um zwischen der "Ein"- und der "Aus"-Position bewegbar zu sein. Die Streifen **208** könnten geringere Dicke haben.

[0045] [Fig. 6](#) ist ein Diagramm, das den HOE-Wirkungsgrad über der Siliziumstreifendicke zeigt. In diesem beispielhaften Diagramm besteht das Substrat aus Saphir, der einfallende Strahl ist TE-polarisiert, 'a' = 1,5 μm , $\lambda = 1,55 \mu\text{m}$, die Luftspalthöhe ist 500 Å, $\theta = 36^\circ$ und $\phi = 59,8^\circ$ (d. h. $\alpha = 60,4^\circ$). Wie gezeigt wird, gibt es zahlreiche Streifendicken, die einen sehr hohen Wirkungsgrad erzeugen. Bei dem aufgetragenen Beispiel treten Wirkungsgrad-Maxima bei ungefähr 1,87 μm und 2,12 μm auf. Da die Dicke der Streifen **208** so gewählt werden soll, daß das absorbierte Licht eine geeignete Phasenverschiebung erfährt, würden tatsächlich auch eine Vielzahl Oberflächen einer bestimmten Dicke die gleiche Phasenverschiebung bewirken. Ein Vorteil der HOEs der bevorzugten Ausführungsformen ist, daß die Streifendicke so gewählt werden kann, daß der Wirkungsgrad des HOE-Schalters von dem Polarisationszustand des einfallenden Lichtstrahls im wesentlichen unabhängig ist. Dies ist ein Konstruktionsparameter, der als polarisationsabhängiger Verlust bezeichnet wird, wie in dem Standard Telecordia GR 1073 angegeben ist.

[0046] Ein anderes Merkmal des HOE **200** ist, daß das von ihm in die $m = -1$ -Mode reflektierte Licht unter einem Winkel reflektiert wird, so daß das reflektierte Licht **216** sich immer noch unter Totalreflexion in dem Substrat ausbreitet. Die Reflexion des einfallenden Lichtstrahls **204** in einen inneren Totalreflexionsweg wird erreicht, indem die Gitterkonstante 'a' eingestellt wird, wie das Diagramm von [Fig. 5](#) zeigt.

[0047] Unter erneuter Bezugnahme auf [Fig. 2](#) kann das Substrat **202** aus jedem der Materialien bestehen, die vorher in bezug auf das Substrat **102** beschrieben wurden, und ist bevorzugt ein Einkristall-Saphir. Saphir ist optisch durchlässig bei den für optische Kommunikationsanwendungen üblichen Infrarot-Wellenlängen, z. B. 1550 nm und 1310 nm. Außerdem ist Saphir ein hartes, ätzbeständiges Material, das geeignet ist, eine Bearbeitungsätzsperre für jedes Material zu bilden, das auf das Substrat **202** zur Bildung der Streifen **208** aufgebracht werden kann.

[0048] Die Streifen **208** und Höcker **218** sind bevorzugt aus Polysilizium gebildet, sie können aber auch aus anderen optisch durchlässigen Materialien be-

stehen wie etwa verschiedenen Formen von Silizium (kristallin und amorph), Aluminiumoxid, Saphir, Siliziumnitrid, Germanium-Silizium und anderen optisch durchlässigen Materialien, die für Bearbeitungstechniken mit mikroelektromechanischen Systemen (MEMS) geeignet sind.

[0049] Wie bereits erwähnt, gibt es zahlreiche Möglichkeiten zum Koppeln von Lichtsignalen in ein und aus einem Substrat **202**, wobei die TIR-Fortpflanzung angewandt wird; die einfachste dieser Möglichkeiten umfaßt entweder die Spaltung einer Eingangsfasers, die Spaltung einer Substratkante, die Bildung eines gespaltenen Elements zwischen der Lichtleitfaser und dem Substrat oder eine Kombination dieser Möglichkeiten. Der Vorteil der Spaltung der Lichtleitfaser besteht darin, daß diese Kopplungsmethode billig ist, obwohl auch die anderen Methoden kostensparend sind.

[0050] [Fig. 7](#) zeigt eine Möglichkeit der Kopplung des Lichtstrahls **204** in das oder aus dem Substrat **202**, wobei eine Lichtleitfaser **217** durch ein lichtbrechendes Element **220** mit dem Substrat **202** gekoppelt ist. Das lichtbrechende Element **220** besteht aus einem optisch durchlässigen Material mit einer Brechzahl, die niedriger als die des Substrats **202** ist. Das lichtbrechende Element **220** bricht den Lichtstrahl **204** zur Fortpflanzung unter Totalreflexion in dem Substrat **202**, und ein Kollimatorelement **219** dient dazu, den Lichtstrahl **204** zu kollimieren. Das Kollimatorelement **219** kann jede bekannte und geeignete HOE-Struktur sein oder kann entsprechend dem oben beschriebenen HOE **100** ausgebildet sein, wobei Streifen **221** im Querschnitt gezeigt sind. Die Ausbildung des Kollimatorelements **219** gleich dem des HOE **100** bietet den Vorteil, daß die Fertigung der Vorrichtung vereinfacht wird.

[0051] Eine alternative Konstruktion, die ein äußeres Kollimatorelement verwendet, etwa eine Gradientenindex- bzw. GRIN-Lichtleitfaseranordnung, ist in [Fig. 8](#) gezeigt. Dabei hat das Substrat **202** eine gespaltene seitliche Oberfläche **222**. Bei einem Schnitt von 45° empfängt die Oberfläche **222** das kollimierte Lichtsignal **204** von einem GRIN-Linsenelement **224** zur Totalreflexion innerhalb des Substrats **202**. Die GRIN-Linse **224** könnte ein Eingangssignal von einer Lichtleitfaserlinse **224** empfangen. Die GRIN-Linse **224** kann unmittelbar mit einem lichtbrechenden Element oder einer dünnen Schicht eines reflexmindernden Belags **226** gekoppelt sein, der Reflexionsverluste minimiert. Die in [Fig. 8](#) gezeigte Kopplung erlaubt die Verwendung von handelsüblichen Komponenten zum Kollimieren und Sammeln der Lichtstrahlen. Diese Kopplung erlaubt die seitliche Kopplung von ankommenden Lichtleitern anstelle einer Kopplung durch eine obere oder untere Oberfläche des Substrats, wie in [Fig. 7](#) gezeigt ist.

[0052] Was den Betrieb des Schalters betrifft, so gibt es verschiedene Möglichkeiten zum Schalten eines HOE aus der "Ein"-Position in die "Aus"-Position. Im allgemeinen kann das erforderliche Biegen zum Bewegen des HOE aus den Streifen des HOE resultieren, wobei die Streifen selber dazu gebracht werden, sich in die und aus der abklingenden Feldkopplung zu biegen. Alternativ kann die Konstruktion oder der Rahmen, der die Streifen des HOE abstützt, zum Biegen ausgebildet sein. In beiden Fällen sollte die Biegestruktur auch entweder in eine "Ein"- oder eine "Aus"-Position federnd vorgespannt sein, um die Schalterbetätigung zu vereinfachen.

[0053] Zur Erläuterung eines allgemeinen HOE-Betätigers zeigt [Fig. 9](#) eine beispielhafte Möglichkeit der beweglichen Anbringung der Streifen **208**. Dabei sind die Streifen **208** an einem steifen Ankerbereich **224** aufgehängt, der an der oberen Oberfläche **206** fest angebracht ist. Dies ist eine Konfiguration mit einseitiger Befestigung, wobei sich die Streifen **208** von dem Ankerbereich **224** nach außen erstrecken und frei über dem Substrat **202** stehen. Die Streifen **208** sind ausreichend nahe bei dem Substrat **202**, so daß das HOE **200** in die "Ein"-Position vorgespannt ist, d. h. die Streifen **208** sind innerhalb des abklingenden Feldes einer Lichtwelle von 1550 nm oder 1310 nm, die sich in dem Substrat **202** unter Totalreflexion fortpflanzt. Um den Streifen **208** zusätzliche Steifigkeit zu geben, sind zwischen ihnen Querverbindungen **226** gebildet. Durch die Querverbindungen **226** können die Streifen **208** dazu veranlaßt werden, sich gemeinsam zu bewegen, wodurch Verdrehkräfte vermieden werden, die Konstruktionen einer so geringen Größe beeinflussen könnten. Im Fall von längeren Streifen können zahlreiche Querverbindungen zwischen jeweils zwei Streifen vorgesehen sein. Es ist jedoch für die Designkonfigurationen wichtig, das Anordnen von Querverbindungen **226** auf eng ausgebildete periodische Weise zu vermeiden, weil die Querverbindungen **226** gemeinsam als Beugungsgitter wirken würden, das zu dem von den Streifen **208** gebildeten Beugungsgitter orthogonal orientiert ist.

[0054] Das die Streifen **208** bildende Polysilizium ist im IR-Bereich durchlässig und kann ohne weiteres mit fotolithografischen MEMS-Fertigungsverfahren mit einer Standardlinienbreite von 0,5 µm bis 1 µm gefertigt werden. Beispielsweise können die Streifen **208** gebildet werden durch Aufbringen einer Polysiliziumschicht auf das Saphirsubstrat **202** oder durch epitaxiales Aufwachsen von einkristallinem Silizium auf den Saphir **202**. Mit Standard-Lithografie kann das gewünschte Muster in einer Fotoresistschicht gebildet und das Muster mit Standard-MEMS-Ätztechniken wie etwa dem handelsüblichen Multi-User-MEMS-Verfahren (MUMPs™) in das Silizium geätzt werden. Bei der Fertigung wird eine verlorene Schicht oder Abstandsschicht auf die obere Oberfläche des Substrats zwischen dem Silizium und dem

Saphir aufgebracht. Diese Schicht ist typischerweise Siliziumdioxid und wird weggeätzt oder gelöst, um die Siliziumstruktur von dem Substrat zu trennen. Das Saphirsubstrat ist gegenüber Ätzverfahren beständig und erlaubt das Lösen der verlorenen Schicht, ohne daß das Substrat geätzt wird. Jedes Ätzen des Substrats würde ein schwaches HOE-Muster in dem Substrat bilden, was das geforderte vollständige Ausschalten des Schalters nicht zulassen würde. Es ist allgemein üblich, die kleinen Höcker an der Unterseite der Siliziumstruktur dadurch zu bilden, daß in die verlorene Schicht vor dem Aufbringen der Polysiliziumschicht kleine Vertiefungen eingebracht werden. Wie oben gesagt wird, minimieren diese Höcker die Anhaftung während des Trennvorgangs und während des anschließenden Schalterbetriebs. Die verlorene Schicht kann so dimensioniert sein, daß das Polysilizium-HOE in der "Ein"-Position angeordnet ist, oder die Vorrichtung kann so aufgebaut sein, daß sie mit Polysilizium-Federelementen in die "Ein"-Position vorgespannt ist. Bevorzugt sind die Streifen **208**, die Höcker **218**, der steife Ankerbereich **224** und die Querverbindungen **226** aus dem gleichen Material, am meisten bevorzugt einem Polysiliziummaterial, gebildet. Der steife Ankerbereich **224** und die Querverbindungen **226** könnten aus jedem der oben angegebenen Streifenmaterialien hergestellt sein.

[0055] Zum Bewegen des HOE **200** aus der vorgespannten "Ein"-Position in eine "Aus"-Position kann ein elektrisches Feld mittels einer über den Streifen **208** angeordneten Elektrode angelegt werden. Da die Streifen **208** teilweise leitfähig sind, werden sie beim Anlegen eines elektrischen Feldes von der oberen Oberfläche des Substrats **202** weg ausgelenkt. Da sich das abklingende Feld nicht weit über die obere Oberfläche **206** erstreckt bzw. insbesondere das abklingende Feld sich exponentiell verjüngt, brauchen die Streifen **208** nur um eine geringe Distanz ausgelenkt zu werden, um das HOE **200** in die "Aus"-Position zu bringen.

[0056] [Fig. 10](#) zeigt eine Methode zum Auslenken der Streifen **208** unter Verwendung einer Elektrode **230**, die zumindest über einem distalen Bereich der Streifen **208** positioniert ist und sich in die Zeichnung hinein und aus ihr heraus über sämtliche Streifen **208** erstreckt. Die Elektrode **230** ist an einer unteren Oberfläche einer isolierenden Anbringplatte **232** angebracht, die über einem Abstützelement **234** gebildet ist. Das Abstützelement **234** kann aus dem gleichen Material wie der Anker **224** bestehen und befindet sich in der Darstellung diesem gegenüber. Die Elektrode **230** empfängt Befehle von einer Treiberschaltung und legt als Reaktion darauf ein elektrisches Feld an die Streifen **208** an. Zur einfacheren Realisierung könnten die Streifen **208** mit einer Massespannung verbunden sein. Ferner könnte sich die Elektrode **230** in Längsrichtung über die Gesamtlänge der Streifen **208** erstrecken, wie gezeigt ist.

[0057] Die [Fig. 12](#) und [Fig. 13](#) zeigen eine alternative Einrichtung zum Betätigen eines HOE zum Zweck des Schaltens. Bei diesen Ausführungsformen ist die zum Schalten genutzte Biegsamkeit nicht in den das HOE bildenden Streifen vorhanden wie in [Fig. 10](#), sondern befindet sich statt dessen in der Struktur, welche die Streifen mit der oberen Oberfläche des Substrats verbindet. Beispielsweise kann die beispielhafte HOE-Struktur **300** von [Fig. 11](#), die Streifen **302**, Querverbindungen **303** und Seitenbereiche **304** und **306** hat und aus den gleichen Materialien und auf die gleiche Weise wie die in [Fig. 2](#) beschriebene HOE-Struktur **200** gebildet sein kann, so betätigt bzw. aktiviert werden, wie es in [Fig. 12](#) gezeigt ist. [Fig. 12](#) zeigt eine Anbringkonstruktion mit zwei Anbringbasen **308** und **310**, die auf einem Substrat **311** gebildet sind, und einer Anbringplatte **312**, die auf den Basen **308**, **310** gebildet ist. Das HOE **300** ist mit den Anbringbasen **308** und **310** über biegsame Verbindungen **314** gekoppelt. Die biegsamen Verbindungen **314** könnten jede beliebige Anzahl von MEMS-bearbeiteten Federn oder Strukturen sein, die ein Biegen zumindest in einer Aufwärtsrichtung zulassen. Die flexiblen Verbindungen **314** könnten alternativ eine bidirektionale Auf- und Ab-Auslenkung zulassen. Eine Elektrode **316** ist an der Anbringplatte **312** angebracht und verläuft bei dieser Ausführungsform quer und längs über die Streifen **302**, die geerdet sind. Bei einer solchen Konfiguration könnte das HOE **300** in die "Ein"-Position vorgespannt sein und unter einem elektrischen Feld von der Elektrode **316** in eine "Aus"-Position bewegbar sein. Alternativ könnte das HOE **300** in die "Aus"-Position vorgespannt sein, oder das HOE **300** könnte für eine Aufwärts- und Abwärtsbewegung unter Steuerung durch die Elektrode **316** vorgespannt sein. Das HOE **300** könnte an einer unteren Oberfläche ausgebildete Höcker **318** haben, um eine Haftung zwischen dem HOE **300** und dem Substrat **311** während des Betriebs zu verhindern.

[0058] [Fig. 13](#) zeigt eine alternative Betätigungsstruktur für ein HOE **400**. Das HOE **400** ist aus den gleichen Materialien und auf ähnliche Weise wie bereits erwähnt gebildet. Typische Querdimensionen für das HOE **400** sind 250 bis 1000 µm. Streifen **402** erstrecken sich entlang einer Länge des HOE **400**, und Querverbindungen **404** sind vorgesehen, um die strukturelle Steifigkeit zu erreichen. Eine Vielzahl von Federarmen **406** sind mit dem HOE **400** verbunden. Die Federarme **406** sind auch mit der oberen Oberfläche eines Substrats **408** verbunden, wobei das Substrat **408** den vorher beschriebenen Substraten gleicht. Insbesondere dienen Füße **410** als Stützen für die Federarme **406** und haben bei der bevorzugten Ausführungsform eine Höhe, die hinreichend klein ist, um das HOE **400** in die "Ein"-Position vorzuspannen. Geometrie und Größe der Federarme **406** sind so gewählt, daß das HOE **400** unter der Einwirkung eines elektrischen Feldes in die "Aus"-Position ausgelenkt werden kann. Wie der Fachmann er-

kennt, können viele andere Geometrien verwendet werden, um die gewünschte Biegsamkeit und Feder Vorspannung für den HOE-Schaltvorgang zu erreichen. Für die Betätigung könnte eine Elektrode über dem HOE **400** unter Verwendung einer geeigneten Anbringkonstruktion angebracht sein, und dafür ist die in [Fig. 12](#) gezeigte Konstruktion ein Beispiel.

[0059] Bei der bevorzugten Ausführungsform für die Bewegung des HOE **300** wird die elektrostatische Betätigung angewandt, aber die Betätigung kann alternativ thermisch, piezoelektrisch oder elektrooptisch erfolgen.

[0060] Wie [Fig. 13](#) zeigt, haben aufgrund der Mikrometermaße der dort verwendeten HOEs die zur Anwendung dienenden HOEs viele Streifen und viele Querverbindungen, falls solche verwendet werden. Daher sollten die obigen Figuren als beispielhaft angesehen werden und zeigen eine allgemeine Anzahl Streifen, wobei es sich versteht, daß in der Praxis viele Streifen wie etwa bei dem HOE **400** verwendet werden können.

[0061] [Fig. 14](#) zeigt eine Draufsicht auf einen beispielhaften optischen Schalter **500**, der jedes der oben beschriebenen HOEs verwenden kann, die allgemein durch ein HOE **502a** und ein HOE **502b** dargestellt sind, um einen optischen 1×2-Schalter zu bilden. Die Konzepte von [Fig. 14](#) können zur Bildung eines optischen 1×N-Schalters erweitert werden. Es sind zwei HOEs **502a**, **502b** gezeigt, und beide sind mit einem Fortpflanzungsweg eines ankommenden Lichtsignals **504** ausgefluchtet. Das ankommende Lichtsignal **504** pflanzt sich in einem Substrat **506** unter Totalreflexion ähnlich wie in den vorher beschriebenen Substraten fort. Die beiden HOEs **502a**, **502b** sind über dem Substrat **506** angeordnet und relativ dazu einzeln bewegbar zwischen einer "Ein"-Position und einer "Aus"-Position, und zwar über eine der vorher beschriebenen Betätigungskonstruktionen: Wenn dabei das HOE **502a** in der "Ein"-Position ist, wird das Lichtsignal **504** entlang einem ersten Reflexionsweg **508** reflektiert. Der Weg **508** ist nicht orthogonal zu der Fortpflanzungsebene des Signals **504**, sondern statt dessen unter einem Winkel α zu dieser Fortpflanzungsebene. Wenn das HOE **502a** in der "Ein"-Position ist, wird bevorzugt im wesentlichen das gesamte Lichtsignal **504** entlang dem Weg **508** reflektiert, so daß ein minimales $m = 0$ -Moden-Lichtsignal verbleibt, das auf das HOE **502b** fällt. Wenn der Schalter **502b** in der "Aus"-Position ist, setzt sich dieses minimale Lichtsignal entlang dem Weg **512** fort und wird durch geeignete Mittel absorbiert oder anderweitig daran gehindert, wieder in die Einrichtung zurückreflektiert zu werden. Es ist zu beachten, daß sich dieses $m = 0$ -Moden-Lichtsignal nicht zu dem Ausgangsweg **510** fortpflanzt, da der Schalter **502b** infolge der exponentiellen Beschaffenheit des abklingenden Feldes vollständig aus ist. Das ist ein wichti-

ger Parameter für gewerbliche Schalter, wie oben gesagt wird.

[0062] Wenn das HOE **502a** in der "Aus"-Position ist, bleibt das Lichtsignal **504** unbeeinflusst und pflanzt sich weiter unter Totalreflexion innerhalb des Substrats **506** fort, bis das Lichtsignal **504** das zweite HOE **502b** erreicht, wo dann, wenn das HOE **502b** in der "Ein"-Position ist, das Lichtsignal **504** in einen zweiten Reflexionsweg ebenfalls unter dem Winkel α zu der Fortpflanzungsrichtung des Lichtsignals **504** reflektiert wird. Bevorzugt sind das HOE **502a** und das HOE **502b** identisch, und die Wege **508** und **510** sind parallel. Ferner können die Wege **508** und **510**, obwohl das nicht gezeigt ist, zu Lichtleiterausgängen führen, um reflektiertes Licht zu koppeln, um die gezeigte Konstruktion als Lichtleiter zu einem Lichtleiterschalter zu verwenden. Die Einkopplung in andere optische Einrichtungen ist ebenfalls möglich, und wenn das HOE **502a** und das HOE **502b** beide in der "Aus"-Position sind, pflanzt sich das Lichtsignal **504** unverändert durch das Substrat **506** auf dem Signalweg **512** fort. Der Signalweg **512** könnte ebenfalls mit einer Ausgangsfaser gekoppelt sein und für Überwachungszwecke verwendet werden. Ein kleines Signal, das ein Eingangssignal darstellt, ist immer auf **512** anwesend infolge einer unvollständigen Unterdrückung der $m = 0$ -Mode. Die Vorrichtung könnte auch als variabler Strahlteiler oder Dämpfungselement konfiguriert sein durch Steuerung der HOE-Luftspalte in Positionen zwischen Ein und Aus. Beispielsweise könnte das HOE **502a** für einen Wirkungsgrad von 50 % positioniert sein, so daß 50 % des einfallenden Signals **504** verbleibt, um auf das HOE **502b** zu treffen, das für einen Wirkungsgrad nahe 100 % positioniert sein könnte. Diese Konstruktion wäre wie ein 1×2-Strahlteiler, wobei die Ausgangssignale entlang den Wegen **508** und **510** jeweils ungefähr 50 % der Energie des einfallenden Strahls haben.

[0063] Die oben gezeigten Konstruktionen haben HOEs, die aus Streifen gebildet sind; es versteht sich für den Fachmann, daß die Konstruktionen mehr allgemein BOE-Konstruktionen sein könnten, die größere Dimensionen als HOEs haben, beispielsweise eine Anzahl von Malen größer als die in [Fig. 5](#) aufgetragenen ' a/λ '-Werte sind. Daher sollen die vorliegende Offenbarung und die folgenden Patentansprüche auch BOE-Konstruktionen einschließen.

[0064] An den angegebenen Ausführungsbeispielen könnten viele weitere Änderungen und Modifikationen vorgenommen werden, ohne vom Umfang der Patentansprüche abzuweichen. Der Umfang einiger Änderungen wird vorstehend erläutert. Der Umfang anderer Änderungen ergibt sich aus den beigefügten Patentansprüchen.

Patentansprüche

Position zu bewegen.

1. Optischer Schalter, der aufweist:
ein Substrat (**202**) zum Übertragen eines optischen Signals innerhalb des Substrats;
ein optisches Beugungselement (**100, 200**), das über einer oberen Oberfläche des Substrats angeordnet und relativ dazu bewegbar ist zwischen einer ersten Position außer abklingender Feldkopplung mit dem optischen Signal, so dass sich das optische Signal weiterhin unverändert in einer ersten Richtung fortpflanzt, und einer zweiten Position in abklingender Feldkopplung mit dem optischen Signal, um die Fortpflanzung des optischen Signals in eine zweite Richtung zu ändern,

dadurch gekennzeichnet, dass
sich das optische Signal in dem Substrat in der ersten Fortpflanzungsrichtung entlang einer ersten Ebene, die zu dem Substrat senkrecht ist, unter innerer Totalreflexion fortpflanzt; und
das optische Beugungselement (**100, 200**) in seiner zweiten Position wirksam ist, um das optische Signal zu beugen, so dass
sich das optische Signal in dem Substrat in der zweiten Richtung entlang einer zu dem Substrat senkrechten zweiten Ebene fortpflanzt, die mit der ersten Ebene einen spitzen Winkel (α) bildet.

2. Optischer Schalter nach Anspruch 1, wobei das Substrat aus einem Material aus der Gruppe gebildet ist, die aus Quarz und Saphir umfasst.

3. Optischer Schalter nach Anspruch 1, wobei das optische Beugungselement ein holografisches optisches Element ist.

4. Optischer Schalter nach Anspruch 1, wobei das optische Beugungselement aus einer Vielzahl von Streifen gebildet ist, die ein Beugungsgitter bilden, wobei jeder Streifen eine im Wesentlichen gleiche Breite hat und wobei jeder von den Streifen um einen im Wesentlichen gleichen Abstand beabstandet ist.

5. Optischer Schalter nach Anspruch 4, wobei die Breite im Wesentlichen gleich dem Abstand ist.

6. Optischer Schalter nach Anspruch 4, wobei das Beugungsgitter eine Gitterperiode 'a' hat, die im Wesentlichen gleich der Wellenlänge des Lichts des optischen Signals in dem Substrat ist.

7. Optischer Schalter nach Anspruch 4, wobei das Beugungsgitter eine Gitterperiode 'a' hat, die zwischen 5λ und 3λ ist, wobei λ die Wellenlänge des optischen Signals in dem Substrat ist.

8. Optischer Schalter nach Anspruch 4, wobei die Streifen flexibel sind, um das optische Beugungselement zwischen der ersten Position und der zweiten

9. Optischer Schalter nach Anspruch 8, wobei die Streifen an einem Anker aufgehängt sind, der an dem Substrat fest angebracht ist.

10. Optischer Schalter nach Anspruch 4, wobei die Streifen an einem ersten Anker und einem zweiten Anker über flexible Elemente aufgehängt sind, wobei sowohl der erste Anker als auch der zweite Anker an dem Substrat fest angebracht sind und wobei die flexiblen Elemente eine Bewegung des optischen Beugungselements zwischen der ersten Position und der zweiten Position zulassen.

11. Optischer Schalter nach Anspruch 4, wobei die Streifen in die zweite Position vorgespannt sind und wobei eine Elektrode den Streifen benachbart angeordnet ist, um die Streifen in die erste Position zu bewegen.

12. Optischer Schalter nach Anspruch 4, wobei die Streifen linear und zu einer Linie im Wesentlichen senkrecht sind, die einen Winkel θ_p zwischen der die erste Richtung enthaltenden Ebene und der die zweite Richtung enthaltenden Ebene in zweiteilt.

13. Optischer Schalter nach Anspruch 4, der ferner Querverbindungen aufweist, die zwischen den Streifen gebildet sind.

14. Optischer Schalter nach Anspruch 4, wobei die Streifen aus einem Material gebildet sind, das aus der Gruppe ausgewählt ist, die aus amorphem Silicium, kristallinem Silicium und Polysilicium besteht.

15. Optischer Schalter nach Anspruch 4, wobei die Streifen aus einem Material gebildet sind, das aus der Gruppe ausgewählt ist, die aus Aluminiumoxid, Saphir, Siliciumnitrid und einer Polysilicium-/Polygermaniumlegierung besteht.

16. Optischer Schalter nach Anspruch 4, wobei die Streifen eine Brechzahl haben, die höher als diejenige des Substrats ist.

17. Optischer Schalter nach Anspruch 4, wobei die Streifen eine Dicke von mehr als $1\ \mu\text{m}$ haben.

18. Optischer Schalter nach Anspruch 17, wobei die Streifen eine Dicke haben, die so gewählt ist, dass die Intensität des optischen Signals in der zweiten Richtung maximiert wird.

19. Optischer Schalter nach Anspruch 4, wobei die Streifenbreite so gewählt ist, dass die Intensität des optischen Signals in der zweiten Richtung maximiert wird.

20. Optischer Schalter nach Anspruch 1, wobei

das optische Beugungselement, wenn es sich in der zweiten Position befindet, in physischem Kontakt mit der oberen Oberfläche des Substrats ist.

21. Optischer Schalter nach Anspruch 1, wobei das sich in der zweiten Richtung fortpflanzende optische Signal sich unter innerer Totalreflexion fortpflanzt.

22. Optischer Schalter nach Anspruch 1, wobei das optische Signal von der oberen Oberfläche des Substrats unter innerer Totalreflexion reflektiert wird.

23. Optischer Schalter nach Anspruch 1, wobei das optische Signal von der oberen Oberfläche und einer unteren Oberfläche des Substrats unter innerer Totalreflexion reflektiert wird.

24. Optischer Schalter nach Anspruch 1, wobei das optische Beugungselement aus einem im Wesentlichen transparenten optischen Material besteht.

25. Optischer Schalter nach Anspruch 1, wobei das optische Beugungselement wirksam ist, indem es die innere Totalreflexion beeinflusst.

26. Optischer Schalter nach Anspruch 1, wobei das optische Beugungselement aus einer Vielzahl von Streifen gebildet ist, die ein Beugungsgitter bilden, wobei jeder Streifen eine solche Breite und eine dieser zugeordnete Abstandsdistanz hat, dass die Breiten und die Abstandsdistanzen für die Streifen variieren.

27. Optischer Schalter nach Anspruch 12, wobei θ_p zwischen ungefähr 90° und ungefähr 145° ist.

Es folgen 13 Blatt Zeichnungen

FIG. 1

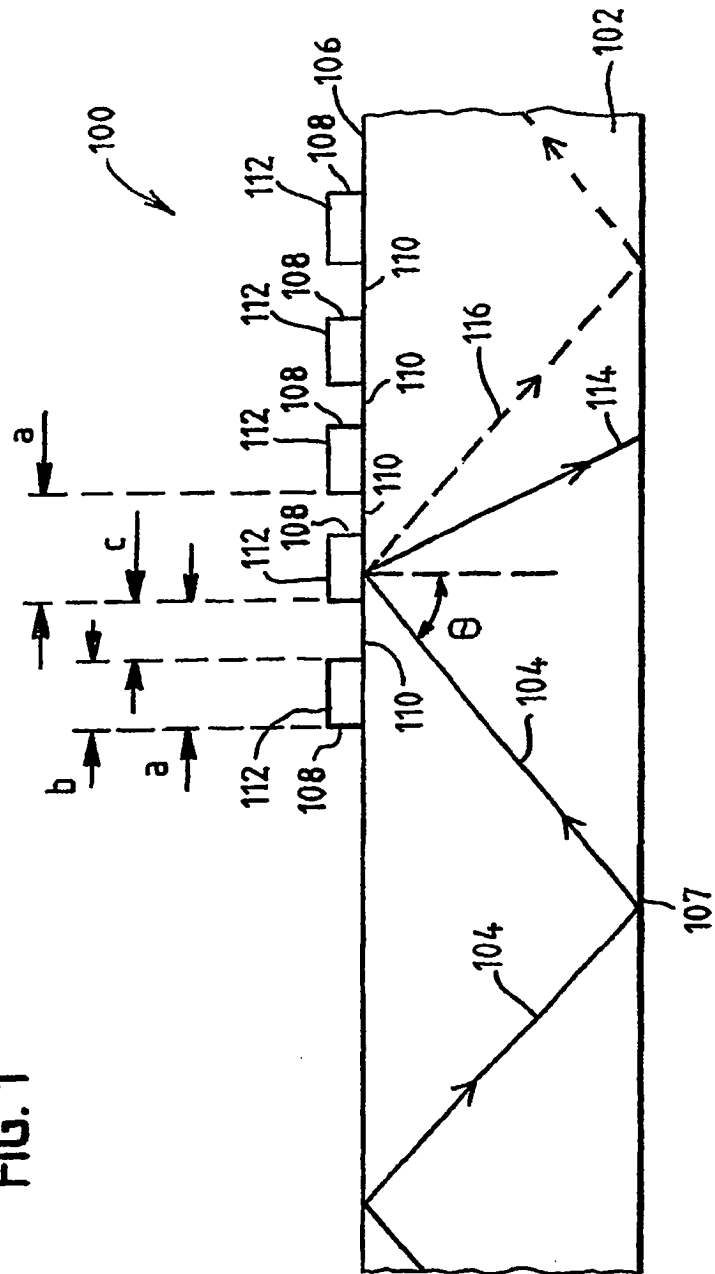
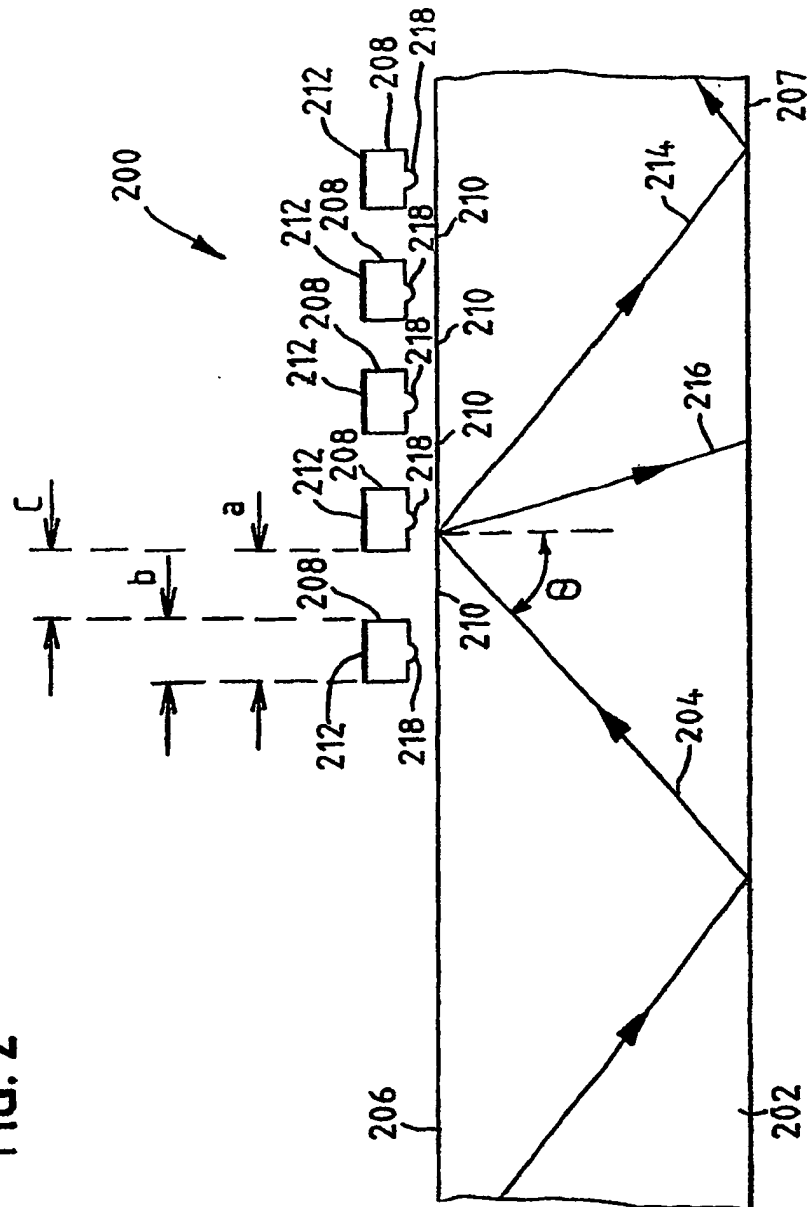


FIG. 2



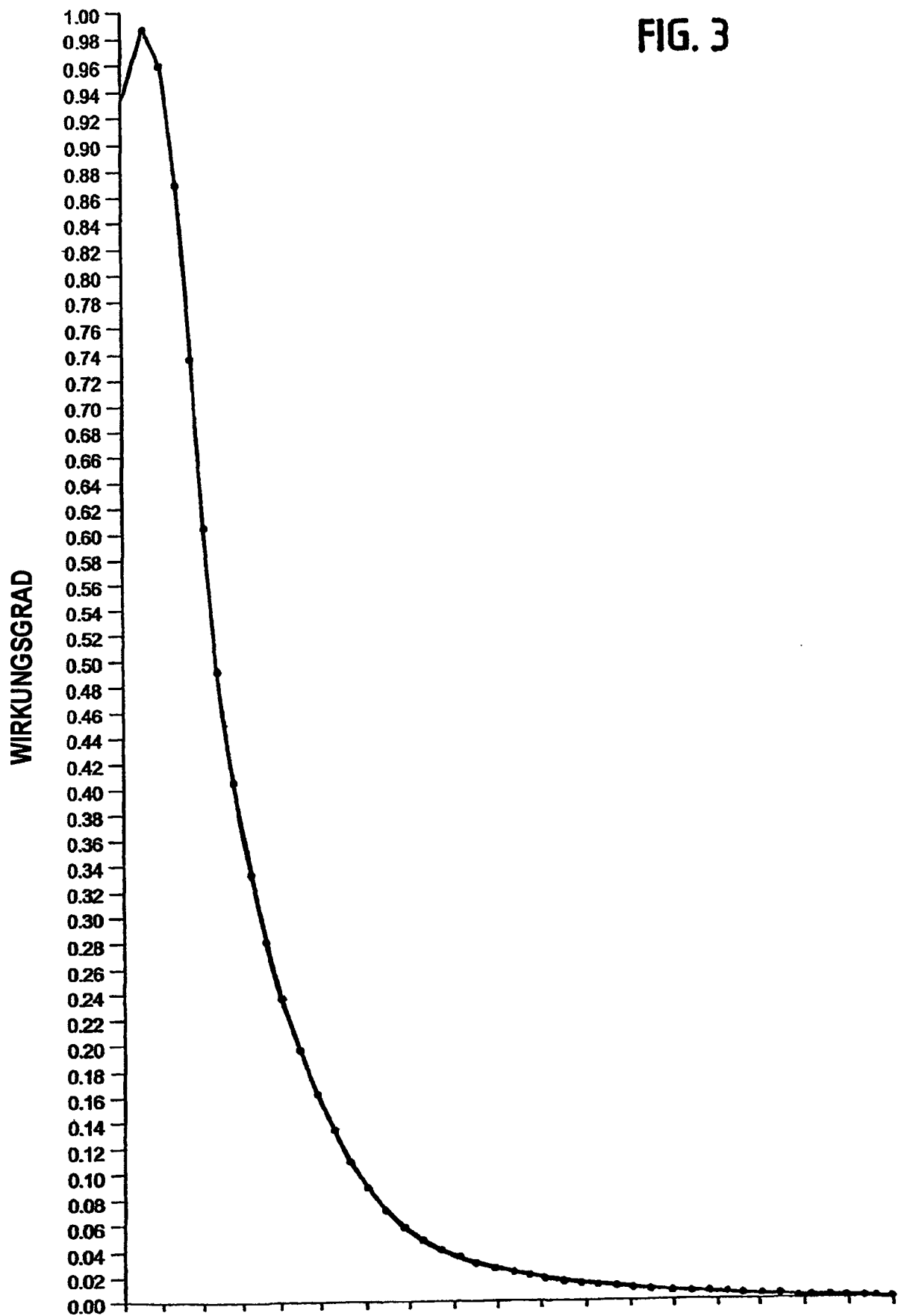


FIG. 4A

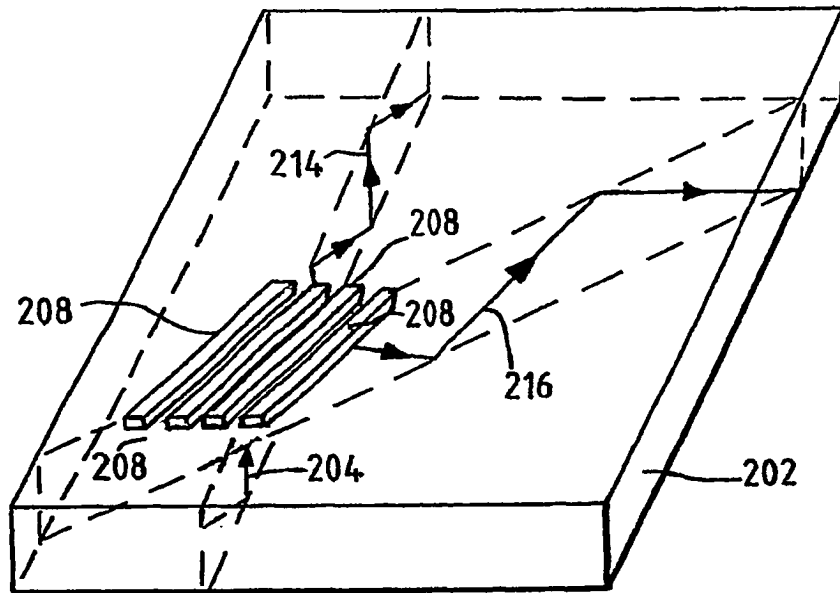


FIG. 4B

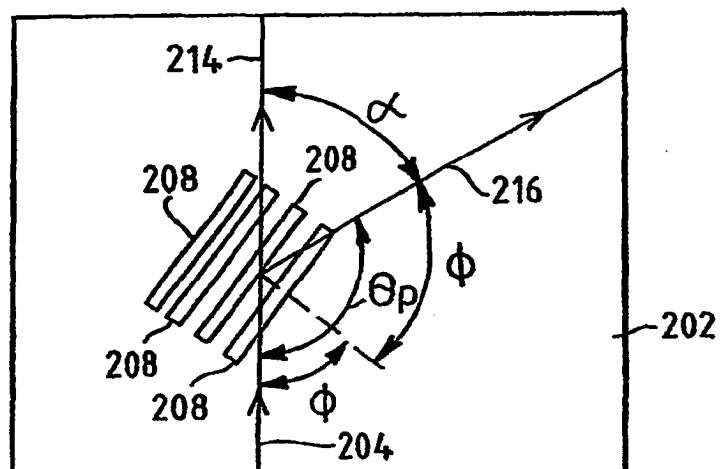


FIG. 5

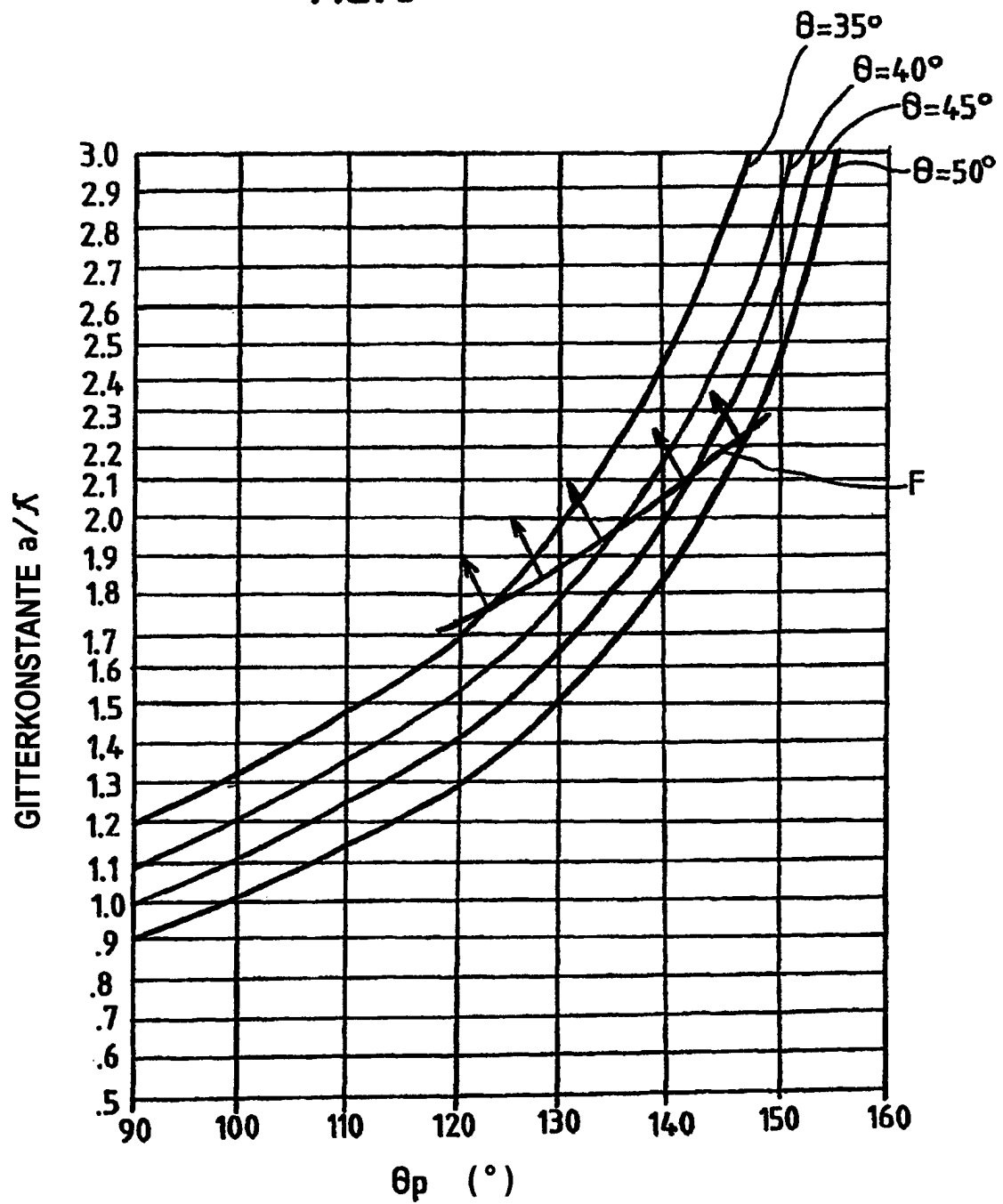


FIG. 6

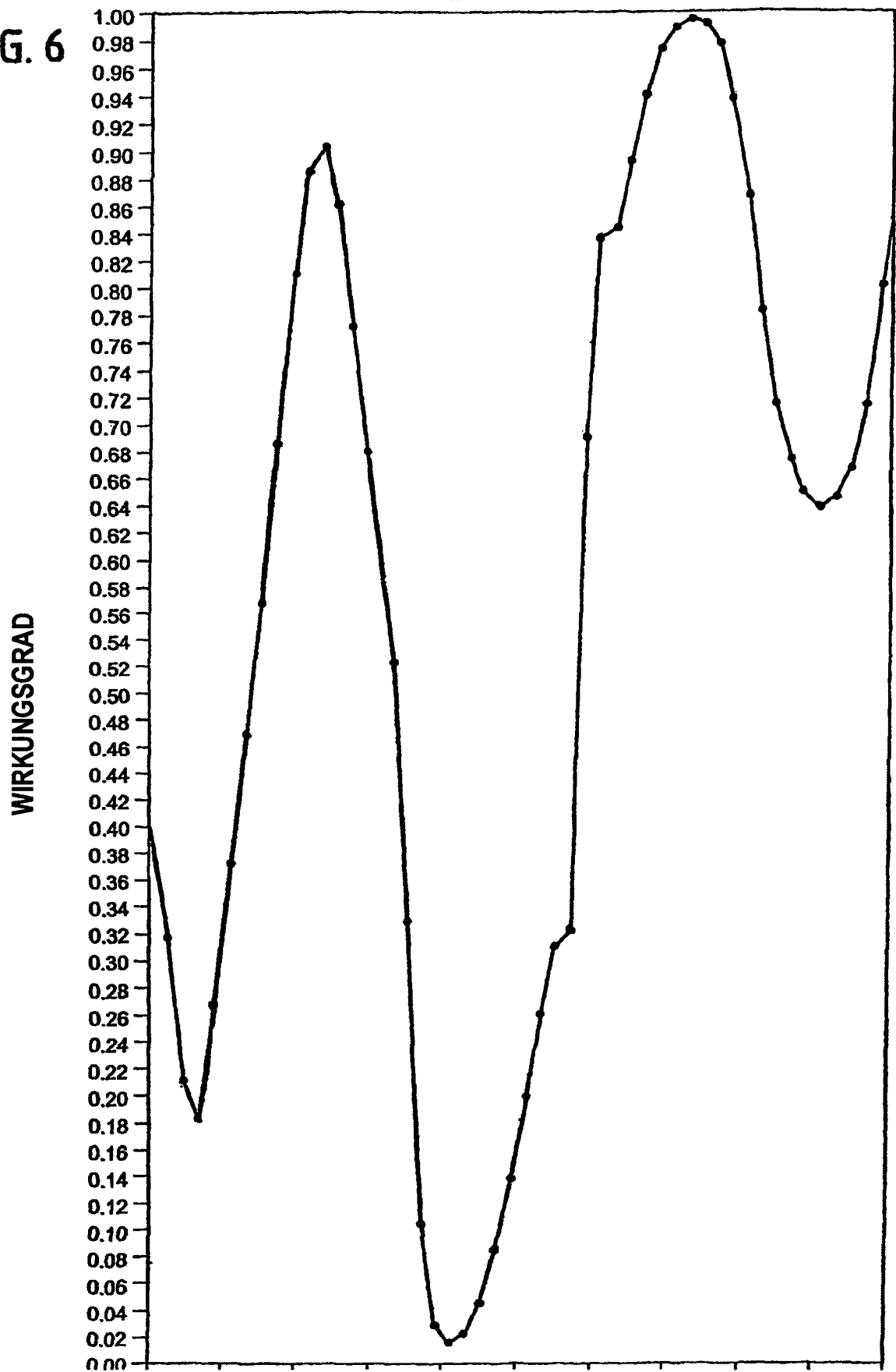


FIG. 7

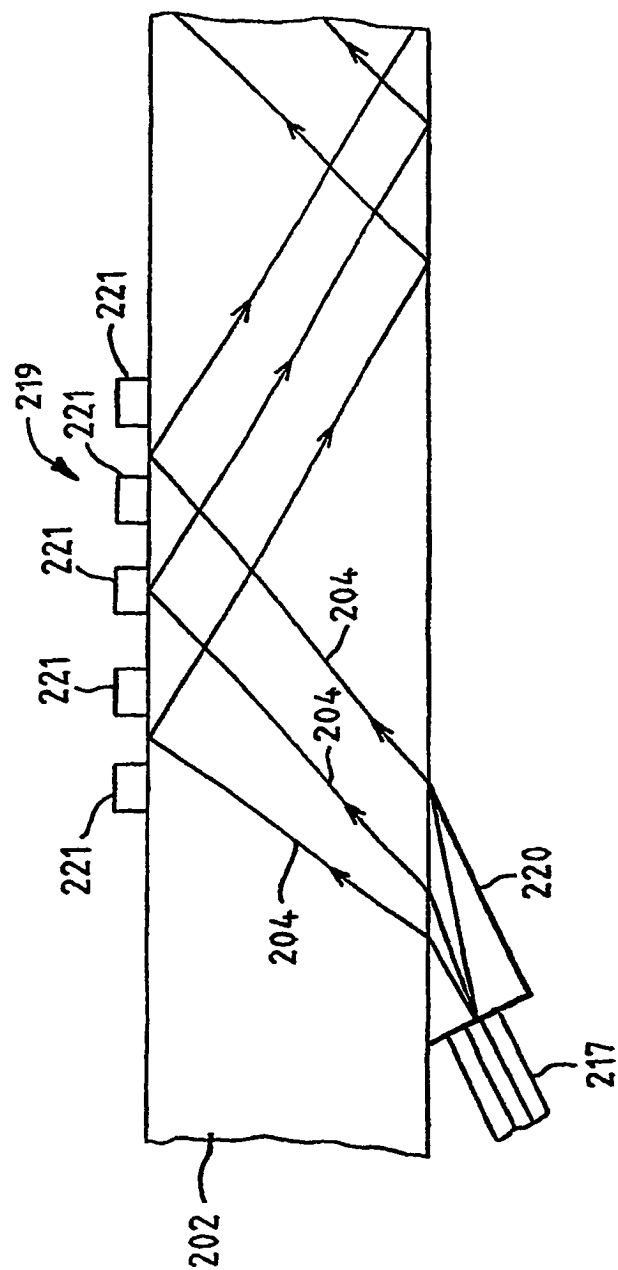


FIG. 8

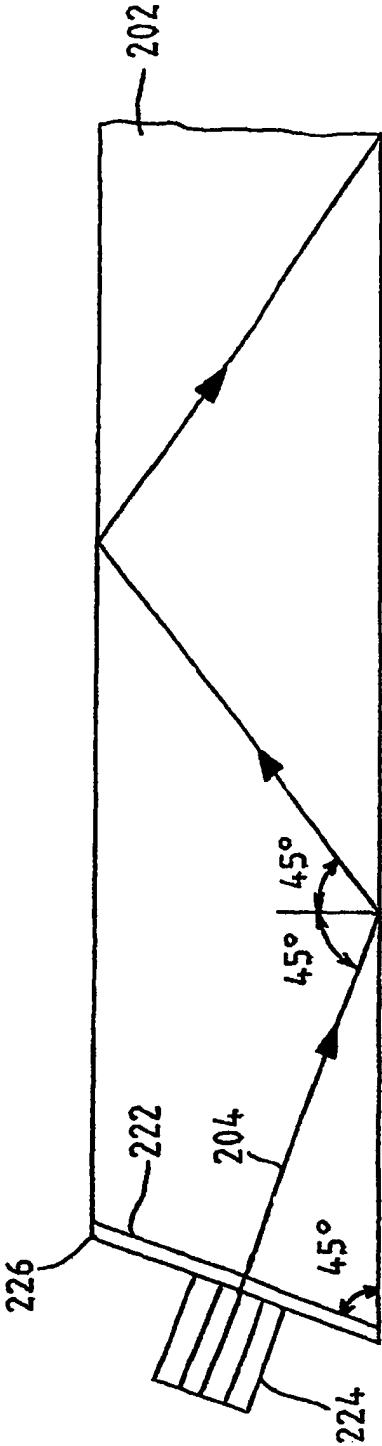


FIG. 9

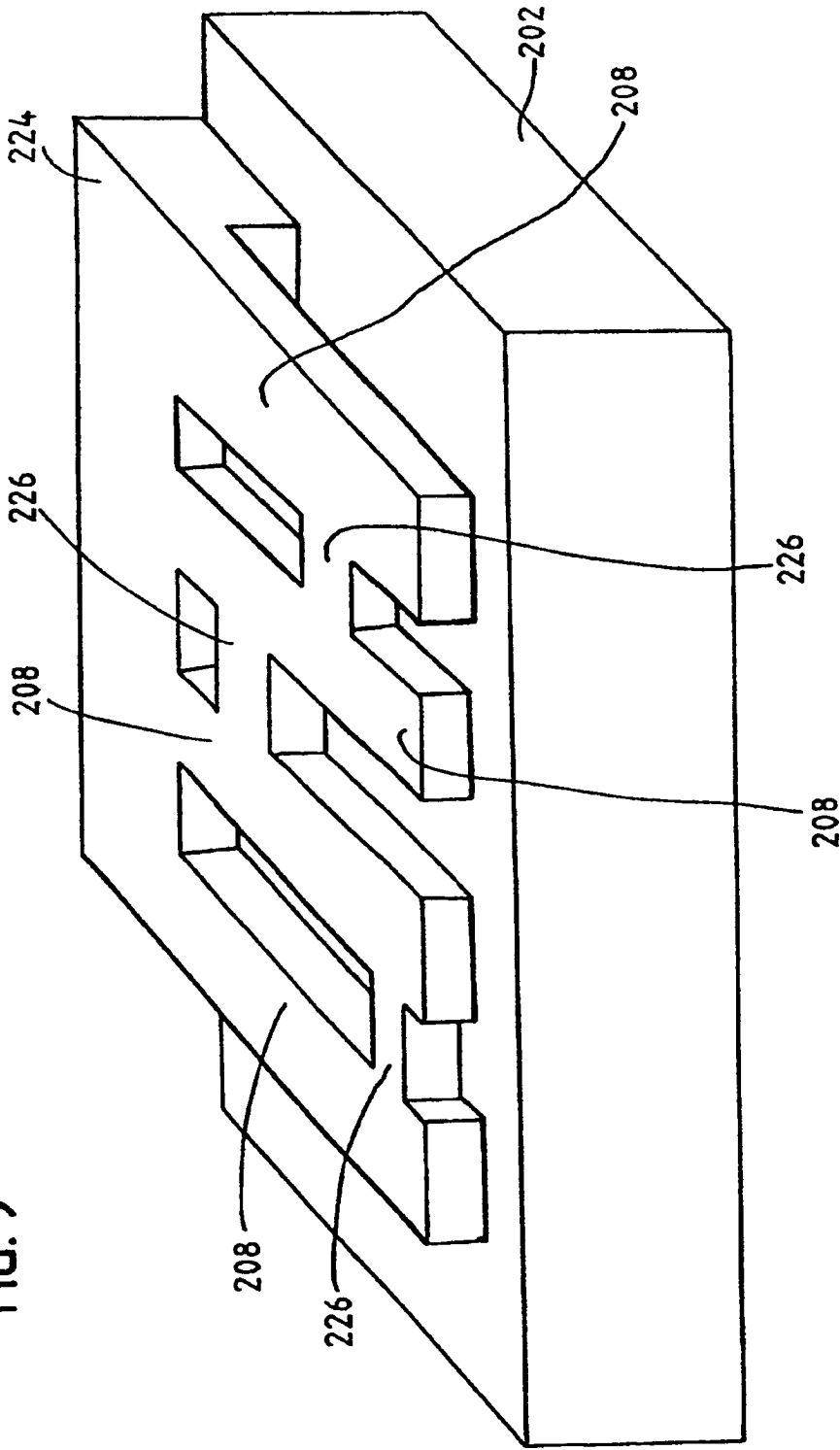


FIG. 10

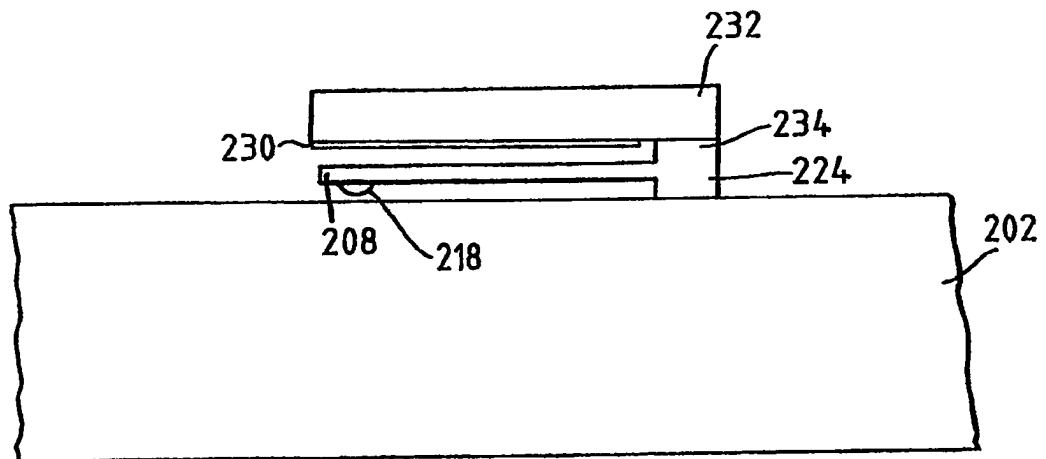


FIG. 11

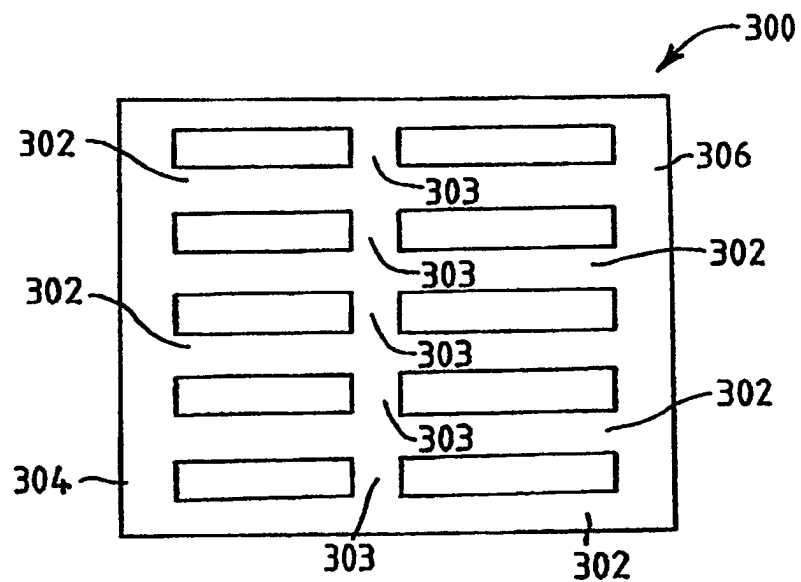


FIG. 12

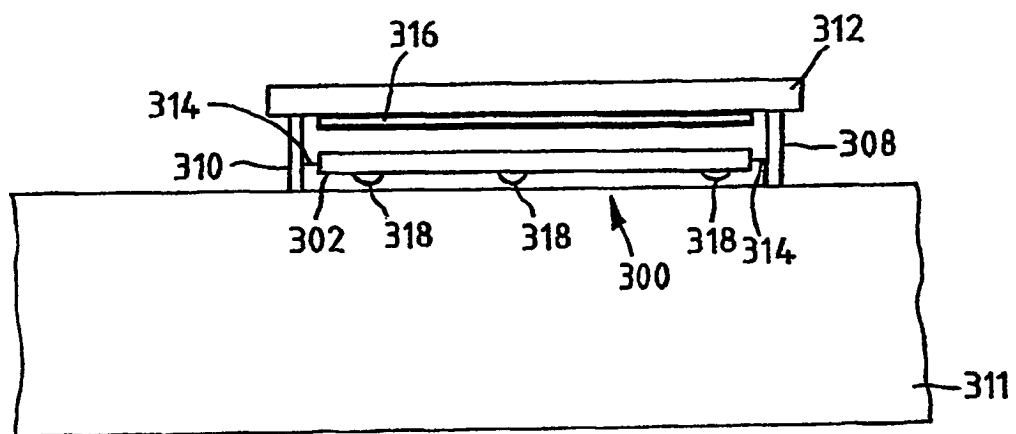


FIG. 13

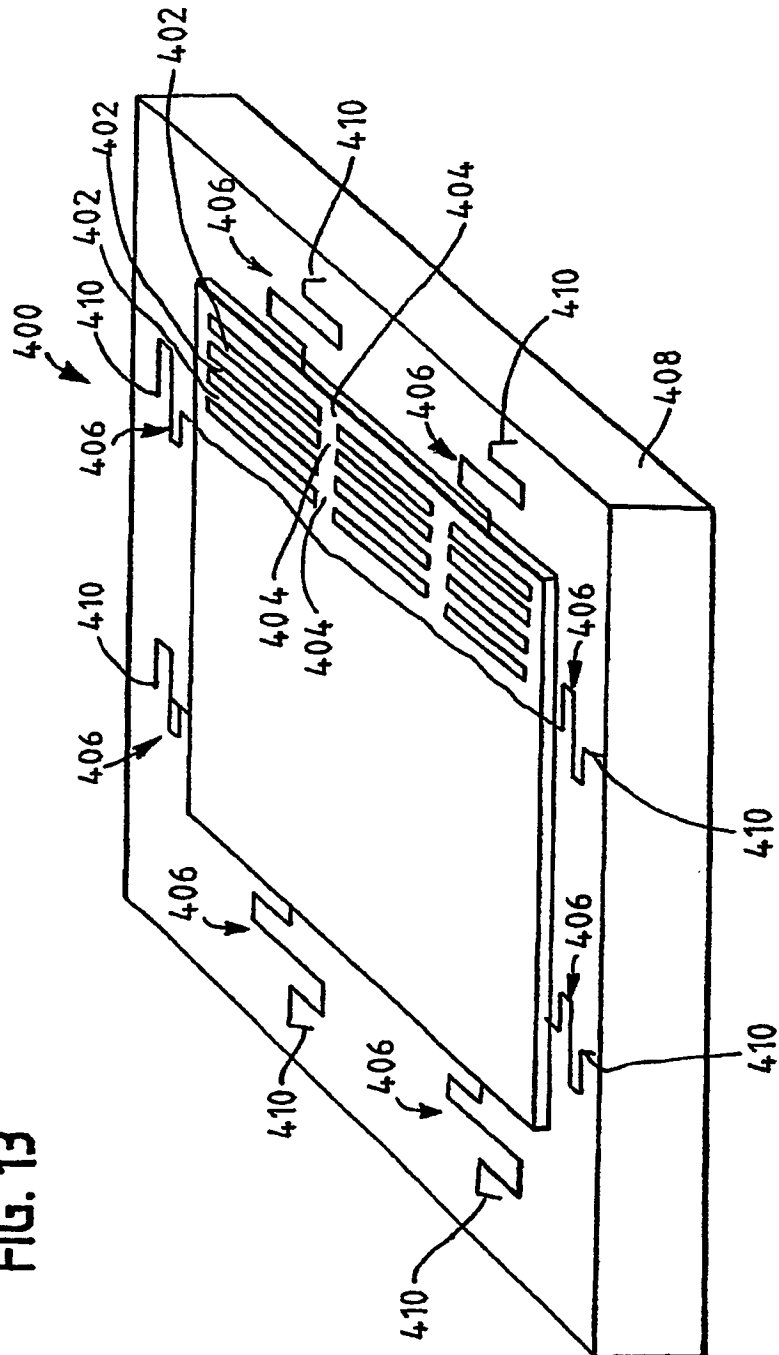


FIG. 14

