



österreichisches
patentamt

(10) **AT 502 413 B1** 2007-03-15

(12)

Patentschrift

(21) Anmeldenummer: A 73/2006
(22) Anmeldetag: 2006-01-18
(43) Veröffentlicht am: 2007-03-15

(51) Int. Cl.⁸: **G02F 1/01** (2006.01)
G01N 21/21 (2006.01)
H01S 03/106 (2006.01)
H01S 03/98 (2006.01)
H03K 05/00 (2006.01)
H04J 14/08 (2006.01)

(56) Entgegenhaltungen:
DE 3206001A1 US 1792752A
US 3636359A WO 1986/006505A1

(73) Patentanmelder:
TECHNISCHE UNIVERSITÄT WIEN
A-1040 WIEN (AT)

(72) Erfinder:
BAMMER FERDINAND DIPL.ING.
DR.TECHN.
WIEN (AT)

(54) PHOTOELASTISCHER MODULATOR UND ANWENDUNGEN

(57) Die Erfindung bezieht sich auf einen photoelastischen Modulator mit einem transparenten Modulatormedium (M), wobei das Modulatormedium (M) zumindest einen piezoelektrischen Kristall aufweist, an dem Elektroden (E) zur piezoelektrischen Anregung angebracht sind. Erfindungsgemäß ist nun der piezoelektrische Kristall ein Kristall der Kristallklasse 3m mit zu den Kristallachsen (x, y, z) parallel geschnittenen Kanten und sind die Elektroden (E) auf den xz-Oberflächen vorgesehen. Ferner werden neue Anwendungen photoelastischer Modulatoren aufgezeigt, nämlich in einer Vorrichtung zur aktiven Modenkopplung, in einem optischen Zeit-Multiplexer, in einer Pulse-Picking-Vorrichtung, in einem Eilipsometer und einem gütegeschalteten Laser.

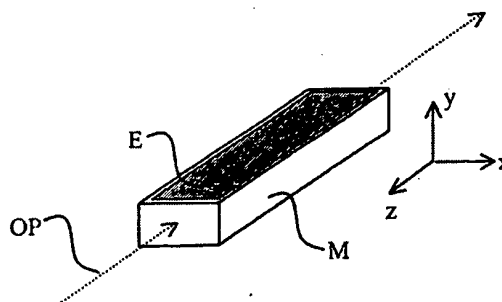


Fig. 3

AT 502 413 B1 2007-03-15

DVR 0078018

Die Erfindung bezieht sich auf einen photoelastischen Modulator mit einem transparenten Modulatormedium, wobei das Modulatormedium zumindest einen piezoelektrischen Kristall aufweist, an dem Elektroden zur piezoelektrischen Anregung angebracht sind. Die Erfindung bezieht sich auch auf ein Verfahren zur Modulation von Licht mittels des photoelastischen Effekts, bei dem ein Lichtstrahl durch ein transparentes Modulatormedium geführt wird, wobei das Modulatormedium zumindest einen piezoelektrischen Kristall aufweist, der über Elektroden in zumindest eine seiner mechanischen Eigenfrequenzen angeregt wird. Die Erfindung betrifft weiters Anwendungen des photoelastischen Modulators in einer Vorrichtung zur aktiven Modenkopplung, in einem optischen Zeit-Multiplexer, in einer Pulse-Picking-Vorrichtung, in einem Ellipsometer und in einem gütegeschalteten Laser.

Die US 1,792,752 A offenbart einen photoelastischen Modulator, wobei die Änderung des Polarisationszustandes des Lichts durch einen piezoelektrischen Kristall erfolgt, an dem Elektroden zur Anregung der natürlichen Frequenzen des Kristalls angebracht sind.

Die nicht gattungsgemäße US 3,636,359 A offenbart eine Vorrichtung zum Modulieren von Lichtstrahlen, wobei das Modulatormaterial durch einen piezoelektrischen Aktuator in mechanische Schwingungen versetzt wird. Der piezoelektrische Aktuator überträgt seine mechanischen Schwingungen auf das Modulatormaterial.

Die ebenfalls nicht gattungsgemäße DE 32 06 001 A1 betrifft einen Lichtmodulator, der aus einem zwischen Polarisatoren angeordneten doppelbrechenden Bauelement besteht. Dieses Bauelement ist aus mehreren blattförmigen, piezoelektrischen Folien, auf die Elektroden aufgebracht sind, zusammengesetzt.

Bekannt sind photoelastische Modulatoren (abgekürzt: PEM; auch Kemp-Modulator oder Deformations-Doppelbrechungs-Modulator, Herstellerfirma: Hindsinstruments), bei welchen ein isotropes optisches Material (z.B. Quarzglas, ZnSe, CaF_2) durch einen piezoelektrischen Aktuator (meist einen Quarzkristall oder eine PZT-Keramik) auf einer Eigenfrequenz in Schwingung versetzt wird, sodass mittels des photo-elastischen (auch piezo-optisch genannt) Effekts eine modulierte Doppelbrechung erzielt wird. Eine wichtige erste Arbeit hierzu ist Piezo-Optical Birefringence Modulators: New Use for a Long-Known Effect von James C. Kemp erschienen 1969 in Journal of the optical society of America, Volume 59, Number 8, deren gesamte Offenbarung durch Bezugnahme in diese Beschreibung aufgenommen wird. Durchgehendes linear polarisiertes Licht verlässt einen solchen photoelastischen Modulator mit einem zeitlich modulierten Polarisationszustand. Eingesetzt werden solche Modulatoren unter anderem in Ellipsometern, welche die optischen Eigenschaften von Oberflächen vermessen. In diesen wird zur Analyse in seiner Polarisation modulierte Licht verwendet und die Amplitude der Schwingung des photoelastischen Modulator wird beispielsweise so gewählt, dass der Polarisationszustand des ausgehenden Lichtes zwischen rechts und links zirkular polarisiert schwankt, und der ursprüngliche linear polarisierte Zustand nur während des relativ kurzen Nulldurchgangs erreicht wird. Übliche Frequenzen liegen im Bereich von 20 kHz bis 500 kHz. Weitere Anwendungen finden sich bei der Messung der spektralen Verteilung einer Lichtquelle beschrieben in den US Patenten 4,905,169 und 5,208,651 oder bei der exakten Vermessung von Verzögerungsplatten beschrieben in US 2003/0030805 A1. In der WO 86/06505 ist eine neuere Ausführungsform solcher Modulatoren beschrieben.

Dem photoelastischen Effekt liegt eine Aufspaltung des einfallenden Lichtes in zwei aufeinander orthogonal linear polarisierte Lichtwellen zugrunde, welche mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten durch den Kristall laufen und daher am Ende eine Phasendifferenz, auch Retardierung genannt, aufweisen, so dass bei der anschließenden Überlagerung im allgemeinen elliptisch polarisiertes Licht entsteht. Bei bestimmten Retardierungen ergibt sich dann links- oder rechts zirkular polarisiertes Licht bzw. linear polarisiertes Licht der ursprünglichen oder der darauf orthogonalen Polarisation. Die Ausbreitung des Lichts erfolgt entlang einer Hauptachse des Index-Ellipsoids, so dass beide Lichtkomponenten in derselben Richtung laufen und nicht räum-

lich getrennt werden, wie es sonst der Fall wäre. Aus der Elektrooptik sind allerdings auch Konfigurationen bekannt, wo das Licht schief zur optischen Achse einfällt und die Teilwellen daher in verschiedene Richtungen laufen. Hier ist dann zur Kompensation ein zweiter Kristall derselben Art aber in anderer Orientierung notwendig, um die Teilwellen wieder zusammen zu führen.

Die Polarisationsrichtung der voreilenden Teilwelle wird schnelle Achse genannt und die Polarisationsrichtung der nacheilenden Teilwelle wird langsame Achse genannt. Beide stehen normal aufeinander und normal auf die Lichtausbreitungsrichtung, falls diese in Richtung einer Index-Ellipsoid-Hauptachse liegt. Man beachte, dass bei optisch aktiven Medien, also solchen, die zirkuläre Doppelbrechung aufweisen, die Aufspaltung im allgemeinen in zwei elliptisch polarisierte Lichtwellen geschieht und sich die Definition der schnellen und langsamen Achse auf die Hauptachsen dieser elliptischen Polarisation bezieht. Ob ein Material optisch aktiv ist, hängt von seiner Kristallgruppe ab und wegen der damit verbundenen Komplikationen sind optische aktive Materialien in der hier beschriebenen Anwendung eher zu vermeiden, wobei aber deren Verwendbarkeit hierfür nicht generell ausgeschlossen werden soll, vor allem wenn die optische Aktivität in der verwendeten Lichtausbreitungsrichtung keine Rolle spielt.

Ist die Polarisation des einfallenden Lichtes parallel zur schnellen oder langsamen Achse des Modulators, so findet keine Aufspaltung des Lichtes statt, es wird lediglich die Phasenlage des ausgehenden Lichtes gegenüber der des einfallenden Lichtes moduliert, was in optischen Interferenzschaltungen, wie Michelson-Morley-Interferometer, benutzt werden kann.

Die übliche Ausführungsform eines photoelastischen Modulators benutzt Longitudinalschwingungen, deren Ausbreitungsrichtung normal auf den Lichteinfall steht. Die schnelle bzw. die langsame Achse schließt mit dieser Ausbreitungsrichtung einen Winkel von 0° bzw. 90° ein. Bei Anwendung mechanischer Scher- oder auch Transversalwellen ist dieser Winkel $\pm 45^\circ$.

Polarisationsmodulatoren sind auch aus der Elektrooptik bekannt. In diesem Falle wird die Doppelbrechung durch ein starkes elektrisches Feld verändert (Pockelseffekt). Eine Besonderheit bietet die Firma NewFocus an, und zwar elektrooptische Kristalle (LiNbO_3) integriert in elektrische Schwingkreise, welche auf ihrer Eigenresonanz angeregt werden und so die nötigen hohen Spannungen im kV-Bereich für den elektrooptischen Betrieb erzeugen. Die Resonanz ist hier rein elektrischer Natur. Auch die Schrift WO 2004/064208 schlägt zum Zwecke des optischen Zeitmultiplexings mit harmonischen Spannungsverläufen betriebene Pockelszellen vor.

Auch in der Akustooptik werden optische Materialien mittels eines Aktuators in Schwingungen versetzt, wobei in Sonderfällen stehende Wellen erzeugt werden, also wieder Eigenresonanzen vorliegen. Die Wechselwirkung mit dem Licht beruht in diesem Fall allerdings auf einem gänzlich anderen Prinzip, nämlich der Beugung, denn die eingesetzten Frequenzen liegen im Bereich von 10-500 MHz, sodass die akustischen Wellenlängen im Bereich der optischen Wellenlängen liegen und mittels des elastooptischen Effekts ein Brechungsindexgitter erzeugt wird. Eingesetzt werden sowohl akustische Longitudinalwellen als auch akustische Transversalwellen. Erzeugt man durch eine Anregung auf einer Eigenfrequenz stehende Wellen, so verschwindet während des kurzen Durchgangs durch die undeformierte Lage der Beugungseffekt vollständig, ein Umstand, der zum aktiven Modenkoppeln in Lasern benutzt wird. Hierbei werden die Resonanzfrequenz des akustooptischen Modulators und die halbe Umlauffrequenz des Lichtes im Resonator aufeinander abgestimmt, sodass ein umlaufender kurzer Lichtpuls entsteht, der den Modulator immer während des akustischen Nulldurchgangs passiert. Es gibt auch Sonderformen, bei denen Aktuator und angeregtes optisches Material mittels eines einzigen piezoelektrischen und optisch durchlässigen Kristall realisiert werden. Hierbei wird dieser mittels einer Hochfrequenzwechselspannung an seinen Elektroden in eine Eigenresonanz sehr hoher Ordnung gebracht. Auch hier beruht die Wirkung auf Beugung.

Akustooptische Modulatoren erzielen auch einen Einfluss auf die Polarisation des gebeugten

Lichtes, welches orthogonal polarisiert auf die Polarisation des ursprünglichen Lichtes sein kann. Auch hier liegt allerdings Beugung vor. In Sonderfällen können Ausbreitungsrichtung des gebeugten und nicht gebeugten Strahls übereinstimmen, sodass der gebeugte Strahl sich nur durch Polarisation und Frequenz vom ursprünglichen Strahl unterscheidet, denn dessen Frequenz ist die Summe aus akustischer Frequenz und der einfallenden Lichtfrequenz. Letzteres System ist realisiert in abstimmbaren kollinearen akustooptischen Frequenzfiltern.

Ein wesentlicher Unterschied ist weiters, dass im Falle von akustooptischen Modulatoren der Durchmesser des modulierten Lichtstrahls immer um ein Vielfaches größer ist als die akustische Wellenlänge. Bei photoelastischen Modulatoren ist der Durchmesser des Lichtstrahls hingegen kleiner als die halbe akustische Wellenlänge, um über den Strahldurchmesser zu jedem Zeitpunkt eine möglichst gleiche Retardierung und damit gleiche Wirkung auf die Polarisation zu erzielen. Ferner wird bei akustooptischen Modulatoren die Intensität des Lichtstrahls moduliert, bei photoelastischen Modulatoren hingegen nur die Polarisation, und erst in Verbindung mit einem polarisationsselektiven optischem Element ergibt sich bei photoelastischen Modulatoren die Möglichkeit der Intensitätsmodulation.

Akustische Modulatoren sind aus den Anwendungen piezoelektrischer Kristalle in elektrischen Schwingkreisen bekannt. Vertreter sind Dicken-, Longitudinal-, Flächenschers-, Dickenschers- sowie Biegeschwinger. Wie bereits vorne erwähnt, beruhen akustooptische Modulatoren auf einem von photoelastischen Modulatoren gänzlich verschiedenem Prinzip, da die Wechselwirkung aufgrund einer Beugung an einem Bragg-Gitter erfolgt.

Photoelastische Modulatoren gemäß dem Stand der Technik sind mit Nachteilen behaftet, die einerseits in ihrer Baugröße andererseits in ihrer Zuverlässigkeit begründet liegen. Für jedes Modulatormedium ist ein eigener Aktuator nötig, um mechanische Schwingungen im Modulatormedium zu induzieren. Ein solcher Aktuator nimmt in Lichtpfaden, Multiplexern, Laseroptiken, etc. unnötig viel Platz ein und behindert die Miniaturisierung von Komponenten. Ein weitaus schwerwiegenderer Nachteil besteht darin, dass die Übertragung der mechanischen Schwingungen vom piezoelektrischen Aktuator auf das Modulatormedium nicht immer in gewünschtem Maße erfolgt. Grund dafür sind z.T. kaum erkennbare Spaltbildungen zwischen Aktuator und Modulatormedium bzw. eine zu dick aufgetragene, als Dämpfer wirkende, unter Umständen poröse Klebeschicht zwischen Aktuator und Modulatormedium.

Erfindungsgemäß werden diese Probleme mit einem photoelastischen Modulator der eingangs genannten Art dadurch gelöst, dass der piezoelektrische Kristall ein Kristall der Kristallklasse 3m mit zu den Kristallachsen (x, y, z) parallel geschnittenen Kanten ist und dass die Elektroden (E) auf den xz-Oberflächen vorgesehen sind.

Erfindungsgemäß werden diese Probleme auch mit einem Verfahren der eingangs genannten Art dadurch gelöst, dass als piezoelektrischer Kristall ein Kristall der Kristallklasse 3m mit zu den Kristallachsen (x, y, z) parallel geschnittenen Kanten verwendet wird, wobei die Elektroden (E) auf den xz-Oberflächen vorgesehen sind. Das Modulatormedium weist zumindest einen piezoelektrischen Kristall auf und wird unter Ausnutzung seiner Piezoelektrizität unmittelbar durch ein elektrisches Feld in zumindest eine seiner Eigenfrequenzen angeregt.

Vorzugsweise sind die Elektroden zur piezoelektrischen Anregung unmittelbar auf dem Modulatormedium angebracht, beispielsweise durch Aufkleben oder Aufdampfen.

Die erfindungsgemäße Maßnahme bringt folgende Vorteile mit sich. Kristalle der Kristallklasse 3m weisen entlang der optischen Achse, der z-Achse, keine Doppelbrechung, vor allem keine zirkulare Doppelbrechung, auf. Es erfolgt daher im Ruhezustand keine Änderung der Polarisation und es ist folglich keine Kompensation erforderlich.

Die Kristallklasse 3m ist nicht biaxial doppelbrechend, wodurch ebenfalls keine Kompensati-

onsanordnung erforderlich ist.

Eine einfache transversale Anregung, d.h. das elektrische Feld steht normal auf den Strahlengang, ist möglich. Folglich muss das Licht nicht durch die Elektroden hindurch, wie in der Elekt-rooptik im Falle longitudinaler Anregung. Daher sind keine speziellen Elektrodenformen notwendig.

Bei einer transversalen Anregung werden zumindest zwei brauchbare Schwingungsmoden mit gleicher Wirkung auf die Polarisation angeregt. Daher ist eine Überlagerung zweier Schwingungsformen möglich, wodurch entweder der Effekt der Polarisationsmodulierung verstärkt oder die Kombinationen verschiedener Frequenzen ermöglicht wird.

Die Vorteile der Elektrodenanordnung mit den Elektroden auf den xz-Flächen und dem Feld in y-Richtung liegen in einer direkten Anregung einer Longitudinalschwingung in x-Richtung und in y-Richtung, beide sind normal zur bevorzugten Lichtausbreitung in z-Richtung. Daher ist direkter Ersatz der derzeit üblichen photoelastischen Modulatoren (PEM) möglich, die eine longitudinale, normal auf die Lichtausbreitungsrichtung stehende Schwingungsform benutzen. Zusätzlich wird eine yz-Scherschwingung als dritte mögliche Schwingungsform angeregt.

Im weiteren enthalten eine Vorrichtung zur aktiven Modenkopplung, ein optischer Zeit-Multiplexer, eine Pulse-Picking-Vorrichtung, ein Ellipsometer und ein gütegeschalteter Laser einen erfindungsgemäßen photoelastischen Modulator.

Unter dem Begriff Modulatormedium wird jener Teil des photoelastischen Modulators verstanden, der transparent ist und durch den im Betrieb die zu modulierenden Lichtstrahlen durchlaufen.

Das Modulatormedium selbst kann auch mehr als einen Kristall umfassen, beispielsweise im Lichtpfad hintereinander geschaltet, entweder von derselben Elektrode angeregt oder jeweils mit eigenen Elektroden bestückt, oder übereinander, z.B. parallel zum Lichtpfad, sodass verschiedene räumliche Bereiche eines Lichtstrahlquerschnitts unterschiedliche Modulation erfahren.

Der Vorteil der Erfindung besteht darin, dass nunmehr kein Aktuator zur Erzeugung mechanischer Schwingungen mehr nötig ist und die aufwendige Bauform durch einen einzigen Kristall ersetzt wird. Der Kern der vorliegenden Erfindung besteht darin, dass das Modulatormedium, durch welches das zu modulierende Licht läuft, gleichzeitig infolge seiner piezoelektrischen Eigenschaften durch Induzieren elektrischer Spannung unmittelbar in mechanische Schwingungen versetzt wird. Die Anregung von Eigenresonanzen des Modulatormediums erfordert durch diese Maßnahmen erheblich weniger Energie. Das Betreiben eines erfindungsgemäßen Modulators beruht somit auf der Ausnutzung der Piezoelektrizität des Modulatormediums.

Grundsätzlich kann jedes piezoelektrische, für die Zielwellenlänge transparente Material verwendet werden. Von Vorteil sind ein Fehlen optischer Aktivität und geringe Doppelbrechung des unbeeinflussten Materials. Biaxiale Doppelbrechung ist eher zu vermeiden.

Die Erfindung wird im folgenden anhand der Zeichnung näher erläutert. Dabei zeigt die Fig. 1 einen Modulator gemäß dem Stand der Technik, die Fig. 2 einen photoelastischen Modulator, die Fig. 3 einen erfindungsgemäßen photoelastischen Modulator, die Fig. 4 und 5 photoelastische Modulatoren, in denen das Licht durch die Elektroden tritt, die Fig. 6 einen weiteren photoelastischen Modulator, die Fig. 7 eine Ausführungsform, bei der die Dimensionierung des Modulatormediums an die Schwingungsamplituden angepasst ist, die Fig. 8 in schematischer Darstellung ein erfindungsgemäßes Ellipsometer, die Fig. 9 einen erfindungsgemäßen Laserresonator, die Fig. 10 das Prinzip einer erfindungsgemäßen Pulse-Picking-Vorrichtung und die Fig. 11 das Prinzip eines erfindungsgemäßen Zeit-Multiplexings.

Die Erfindung schlägt nun einen photoelastischen Modulator vor, welcher aus einem piezoelektrischen Kristall realisiert ist, welcher elektrisch in zumindest einer seiner Eigenresonanzen angeregt wird. Als Vergleich dazu ist in Fig. 1 ein photoelastischer Modulator gemäß dem Stand der Technik dargestellt. Ein Piezo-Aktuator A regt das Modulatormedium M auf einem longitudinalen Schwingungsmoden OM an. Polarisiertes Licht wird auf dem optischen Pfad OP durch das Modulatormedium gelenkt und in seiner Polarisation moduliert. In der gezeigten Form ist der Aktuator in seiner Eigenfrequenz auf das Modulatormedium abgestimmt und besitzt daher Abmaße, die vergleichbar mit jenen des Modulatormediums sind. Alternativ kann der Aktuator auch sehr klein ausgeführt sein und beispielsweise als Transversalwellenaktuator seitlich am Modulatormedium sitzen. Es liegt dann keine Frequenzabstimmung zwischen Aktuator und Modulatormedium vor.

Im Gegensatz dazu zeigt Fig. 2 einen Modulator, bei dem das Modulatormedium M aus einem piezoelektrischen Kristall besteht, auf den unmittelbar durch anliegende, bevorzugt mit dem Modulatormedium verklebte oder auf dieses aufgedampfte Elektroden E (die zweite, nicht sichtbar, befindet sich in dieser Ausführungsform auf der Unterseite des Modulatormediums) ein elektrisches Feld wirkt. Die Frequenz des das Modulatormedium anregenden elektrischen Feldes zur Erzielung des photoelastischen Effektes liegt dabei im Bereich von 10 kHz (Kilohertz) bis 5 MHz (Megahertz), vorzugsweise zwischen 50 kHz und 2 MHz. Durch die unmittelbare Anregung des piezoelektrischen Modulatormediums können die Amplituden des elektrischen Feldes im gesamten Frequenzbereich niedrig gehalten werden. Dies stellt einen wesentlichen Vorteil gegenüber den mittels Aktuator angeregten Modulatoren aus dem Stand der Technik dar, da bei der Übertragung der mechanischen Schwingung auf das Modulatormedium unweigerlich Energie verloren geht.

In Frage kommende Materialien für das Modulatormedium finden sich in der trigonalen Kristallklasse 3m, insbesondere in den Vertretern LiNbO_3 (Lithium Niobat), LiTaO_3 (Lithium Tantalat) und BBO.

Die folgende Diskussion, in der besonders bevorzugte Ausgestaltungen der Erfindung behandelt werden, verwendet die in der Kristallkunde etablierten Richtungsbezeichnungen für Kristallklassen und ihre Vertreter.

Figur 3 zeigt eine erfindungsgemäße Ausführungsform für die Klasse 3m, bei der das elektrische Feld in der y-Richtung orientiert ist. Gezeigt sind der Kristall M, die Elektroden E, der optische Pfad OP und die Achsen des Kristallkoordinatensystems x, y, z. Es kann eine Scherschwingungsresonanz mit y-Ausbreitungsrichtung, eine Longitudinalschwingungsresonanz mit y-Ausbreitungsrichtung und eine Longitudinalschwingungsresonanz mit x-Ausbreitungsrichtung angeregt werden. Nur letzterer ist ein reiner Mode und führt daher zu einer reinen Schwingung, aber auch die anderen beiden Moden haben sich in der Praxis als brauchbar erwiesen. Es ergibt sich die Eigenfrequenz eines Modes als Quotient aus Ausbreitungsgeschwindigkeit der Schwingungsform durch zwei mal die Ausdehnung des Kristalls, wobei allerdings die Ausbreitungsgeschwindigkeit schwach von den lateralen Abmessungen abhängt. Die Eigenfrequenzen von Schwingungsmoden mit aufeinander normal stehender Ausbreitungsrichtung können daher nahezu unabhängig voneinander durch die Maße des Kristalls in der jeweiligen Richtung gewählt werden. Es ergibt sich dadurch die Möglichkeit, bestimmte Frequenzverhältnisse zu wählen und durch gleichzeitige Anregung beider Schwingungsmoden konkrete Modulationskurven anzunähern, wie beispielsweise einen Rechteckverlauf durch phasengerechte Überlagerung zweier Moden mit Frequenzverhältnis 1:3.

Die Figur 7 zeigt ein mit zwei Schwingungsmoden angeregtes Modulatormedium M, wobei die Ausbreitungsrichtungen der beiden Schwingungsmoden mit OM1 und OM2 bezeichnet sind. Die Schwingungsmoden können Transversal- oder Longitudinalwellen sein. Das Modulatormedium ist in diesem Falle entlang der beiden Ausbreitungsrichtungen so geschnitten bzw. dimensioniert, dass das Frequenzverhältnis der beiden Moden 1:3 ergibt. Durch Überlagerung beider

Moden ergibt sich unter anderem die Möglichkeit, einen Rechtecksverlauf der Retardierung für den Lichtstrahl OP anzunähern. Diese Möglichkeit ergibt sich auch bei Anregung nur einer Schwingungsrichtung durch Überlagerung einer ersten Harmonischen mit einer dritten Harmonischen, wobei allerdings, bedingt durch die endlichen Abmessungen des Modulators und den Einfluss der Piezoelektrizität, die Frequenzverhältnisse der höheren Harmonischen zur Grundresonanz nur näherungsweise ganzzahlig sind, was für den genannten Zweck zumindest von Nachteil ist.

Die beschriebenen Konfigurationen sind für LiNbO_3 im Bereich der Elektrooptik bekannt, da hier ein ausgeprägter elektrooptischer Effekt vorhanden ist. Allerdings beruht der genutzte Effekt rein auf Elektrooptik und es wird der Bereich der Resonanzen als störend empfunden und vermieden. Für das ebenfalls sehr bedeutsame LiTaO_3 ist die beschriebene Konfiguration hingegen neu, da der für diese Konfiguration benötigte elektrooptische Koeffizient sehr klein ist und Elektrooptik in anderen aufwendigeren Konfigurationen mit zwei Kristallen betrieben wird. LiTaO_3 weist geringere Empfindlichkeit gegenüber hohen optischen Intensitäten auf, hat aufgrund geringerer Doppelbrechung einen höheren Akzeptanzwinkel und weist wegen seiner höheren Dichte Resonanzen bei geringeren Frequenzen auf.

Die Fig. 4, 5 und 6, die nicht erfindungsgemäße Beispiele darstellen, sollen lediglich aufzeigen, dass auch andere Geometrien der Elektrodenanordnung grundsätzlich realisierbar sind.

Bei Anwendung eines photoelastischen Modulators stellt sich die Frage nach der Synchronisation des Gesamtsystems mit dem Modulatormedium. Es ist bekannt, dass bei piezoelektrischen Oszillatoren Amplitude und Phase des an den Elektroden zu- und abfließenden Stromes ein Maß für die Nähe der anregenden Frequenz zur Resonanzfrequenz sind. Werden also diese Werte, welche anhand des Spannungsabfalls an einem kleinen Messwiderstand ermittelt werden können, erfasst, so hat man ein Signal zur Hand, welches zum Triggern der restlichen Apparatur oder zur Feineinstellung der treibenden Resonanzfrequenz verwendet werden kann. Bei genauer Justierung auf die Resonanzfrequenz ist in der Regel die Stromamplitude maximal und die Phasendifferenz zur anregenden Spannung ist Null. Die Maxima und Minima des Stromverlaufs treten in der Regel beim Durchgang des Kristalls durch die undeformierte Form auf. In der Anmeldung PCT/US99/05586 wird die Phasendifferenz zwischen anregender Spannung und resultierendem Strom zur Steuerung einer Serienschaltung konventioneller photoelastischer Modulatoren benutzt.

Eine besonders einfache Methode um sicherzustellen, dass der Kristall genau in einer Eigenresonanz betrieben wird, ist eine Rückkopplungsschaltung. Es gibt also keinen externen Signalgeber, sondern die elektrische Antwort des Kristalls geht über ein Anpassungsnetzwerk in den Eingang eines Verstärkers, dessen Ausgang wieder auf eine Kristallelektrode wirkt. Es kann so ein Schwingkreis aufgebaut werden, der auf einer fixen vom Kristall vorgegebenen Frequenz arbeitet. Dieses Prinzip ist in vielen mit piezoelektrischen Kristallen stabilisierten Schwingkreisen verwirklicht. Als freier Parameter bleibt die Verstärkung bzw. Versorgungsspannung des Verstärkers, um die Spannungsamplitude am Kristall zu regulieren. Um bevorzugt bestimmte Eigenfrequenzen des Kristalls anzuregen, ist in der Rückkopplung ein Filter notwendig, welcher nur die gewünschte Frequenz durchlässt. Eine geringe Justiermöglichkeit der Schwingfrequenz ist durch Einstellung der Phasenverzögerung im Rückkopplungskreis gegeben. Die Möglichkeit der Rückkopplung ist schon in der Eingangs erwähnten Schrift von Kemp, 1969 erwähnt.

Resonanzen höherer als 1. Ordnung sind möglich, haben jedoch den Nachteil, dass für die Dehnungen in der Apertur Schwingungsknoten und somit Bereiche ohne nutzbaren Effekt vorhanden sind. Auch in der Grundresonanz ist der nutzbare Bereich beschränkt, da z.B. bei freier Einspannung an den freien Rändern keine Dehnungen auftreten.

Sind für eine Anwendung Resonanzen besonders niedriger Frequenz notwendig, so können auch Biegeschwingungen verwendet werden. Es muss dann allerdings ein Bereich gefunden

werden, bei dem eine über die Apertur möglichst homogene Verteilung des photoelastischen Effekts auftritt.

5 Eine weitere Methode zur Erzielung niedriger Modulations-Frequenzen, beispielsweise für das Güteschalten, ist die Hintereinanderschaltung mehrerer paralleler Polarisationsfilter und Modulatoren, deren Eigenfrequenzen rationale Vielfache voneinander sind, so dass ein für maximale Transmission notwendiger gleichzeitiger Nulldurchgang aller Modulatoren bei deutlich niedriger Frequenz auftritt, als es der niedrigsten Betriebsfrequenz der Modulatoren entspricht.

- 10 Zwecks Erzielung bestimmter Modulationskurven können mehrere photoelastische Modulatoren mit zugehörigen Polarisatoren optisch in Serie betrieben werden, wobei ein definiertes Frequenz- und Phasenverhältnis zwischen den einzelnen Modulatoren eingestellt ist.

- 15 Offensichtlich können die neuen einfachen photoelastischen Modulatoren die herkömmlichen Modulatoren in den bereits erwähnten Anwendungen in der optischen Messtechnik, wie Ellipsometrie, Spektralanalyse und Vermessung von Verzögerungsplatten, ersetzen. Allgemeiner formuliert können alle von herkömmlichen photoelastischen Modulatoren wahrgenommenen Aufgaben zur Modulierung von Phase oder Polarisation von Licht von den neuen einfachen Modulatoren übernommen werden.

- 20 Die Figur 8 zeigt eine Anwendung für ein Ellipsometer, bei der ein photoelastischer Modulator PEM eine Polarisationsmodulation des Lichtstrahls OP durchführt. Der modulierte Lichtstrahl wechselwirkt anschließend mit der Probe P und wird dann über einen Polarisationsfilter PF und Sensoren S analysiert.

- 25 Außer den bisher bekannten Anwendungen für photoelastische Modulatoren werden im folgenden weitere neue Anwendungen angeführt.

- 30 Eine mögliche Anwendung photoelastischer Modulatoren alter und neuer Bauart ist Pulse-Picking, d.h. die selektive Auswahl einzelner Pulse aus einem Laserpulszug bei größtmöglicher Unterdrückung der unerwünschten Pulse. Typischerweise tritt diese Anwendung bei KurzpulsLasern auf, die durch aktive oder passive Modenkopplung einen Laserpulszug hoher Frequenz im Bereich von 20-200 MHz generieren, wobei sich die Pulsdauer im ps (picosekunden)-Bereich befindet. Aus diesem Pulszug werden dann Einzelpulse selektiert, um diese dann in einem nachgeschalteten Verstärker zu verstärken. Ziel ist die Erzeugung kurzer Laserpulse mit hoher Pulsenergie.

- 40 Figur 10 zeigt eine Durchführung: Aus dem Laserpulszug LP am Pfad OP werden die Pulse LP1 herausselektiert und auf den Pfad OP1 gelenkt, während die übrigen Laserpulse LP2 am Pfad OP2 nicht genutzt werden. Für diesen Zweck wird die Kombination eines photoelastischen Modulator PEM mit einem nachgeschalteten Polarisationsfilter PF verwendet. Die Modulatorfrequenz ist so auf den Laserpulszug abgestimmt, dass während des Nulldurchgangs des Modulators dieser nur von gewünschten Laserpulsen passiert wird. Die Polarisation dieser während des Nulldurchgangs passierenden Laserpulse bleibt unverändert, während die anderen, also die unerwünschten Pulse, eine 90°-Drehung der Polarisation erfahren, eine dementsprechende Anregungsamplitude vorausgesetzt. Der darauffolgende Polarisationsfilter PF trennt die Pulse auf zwei unterschiedliche Pfade OP1 und OP2.

- 50 Die richtige Anregungsamplitude ergibt sich dann, wenn in den maximal verformten Lagen eine Phasenverschiebung zwischen den optischen Teilwellen von +180° bzw. -180° auftritt, die Polarisation also um 90° gedreht wird. Eine leichte Übersteuerung zu Retardierungen von beispielsweise +/- 190° verlängert die Auslöschungsphase, während die Qualität der Auslöschung während der maximalen Deformation unwesentlich zurückgeht. Das Verhältnis von Auslöschungszeit zu Transmissionszeit kann weiter verbessert werden, wenn in einem Modulatormedium, wie diskutiert, mehrere Schwingungsmoden gleichzeitig mit definiertem Frequenz- und
- 55

Phasenverhältnis zur Annäherung einer Rechteckmodulation angeregt werden oder wenn zum selben Zwecke mehrere photoelastischen Modulatoren phasenrichtig mit verschiedenen Frequenzen, welche Vielfache voneinander sind, hintereinander geschaltet werden.

5 Dieselbe optische Anordnung lässt sich für das Güteschalten verwenden, wenn diese in einem Laserresonator eingebaut wird (Figur 9). Diese Anwendung wird schon in der eingangs erwähnten Schrift von James C. Kemp erwähnt. Ein photoelastischer Modulator PEM ist zusammen mit einem Polarisationsfilter PF in einem Laserresonator, der aus Spiegeln M1, M2 und einem Verstärkungsmedium G gebildet ist, untergebracht. Der Polarisationsfilter PF lässt die horizontale Polarisation H ungehindert passieren, während die vertikale Polarisation V auf dem Pfad OP aus dem Laserresonator herausreflektiert wird. In der gezeigten Konfiguration wird die durch den photoelastischen Modulator PEM verursachte Retardierung durch die Rückreflexion am Spiegel M1 verdoppelt, so dass für eine gewünschte Wirkung, wie z.B. Drehung der Polarisation um 90°, nur die halbe Anregungsamplitude erforderlich ist. In einer Anwendungsform ist der Modulator ausgeschaltet und beeinflusst die Polarisation nicht, so dass sich ungehindert Laserstrahlung mit horizontaler Polarisation H aufbauen kann. Wird der Modulator in Schwingung versetzt, so wird Polarisation mit einer vertikalen Komponente erzeugt, sodass ein Teil der Laserleistung über den Polarisationsfilter PF ausgekoppelt wird. Durch die Amplitude der Anregung bestimmt man die Höhe der Auskopplung, welche natürlich zeitlich moduliert ist. In einer anderen Betriebsform wird der photoelastische Modulator PEM mit einer Amplitude betrieben, die während der maximalen Verformung eine Drehung der Polarisation um 90° bewirkt, was einer Retardierung um die halbe Wellenlänge entspricht, sodass der Laserresonator vollständig blockiert wird. In dieser Zeit wird das Verstärkungsmedium gepumpt. Während des kurzen Nulldurchgangs durch die unverformte Lage wird der Laserresonator freigegeben und es entsteht ein Laserpuls, welcher die gesamte vorher dem Verstärkungsmedium zugeführte Energie enthält. Dieser Laserpuls wird nach dem Nulldurchgang des Modulators über den Polarisationsfilter PF ausgekoppelt, da ja wieder Polarisation mit vertikaler Komponente erzeugt wird. Alternativ kann auch einer der beiden Spiegel M1, M2 teildurchlässig ausgeführt sein, sodass die Strahlauskopplung unabhängig vom photoelastischen Modulator PEM passiert. Alle beim Pulse-Picking erwähnten Maßnahmen zu Verringerung des Verhältnisses von Transmissionszeit zur Auslöschungszeit gelten sinngemäß auch für das Güteschalten.

Das in der WO 2004/064208 erklärte Zeitmultiplexing ist eine weitere neue Anwendung photoelastischer Modulatoren. Das Zeitmultiplexing ist ein Verfahren zur Erzielung einer hochfrequenten Laserpulsfolge oder auch eines quasikontinuierlichen Laserstrahls auf einem optischen Pfad. Dabei werden von verschiedenen Laserquellen zu verschiedenen Zeiten erzeugte Lichtpulse mittels eines optischen Multiplexers auf einen gemeinsamen optischen Pfad gelenkt. Der resultierende Laserstrahl besitzt dieselbe Strahlqualität wie eine einzelne Laserquelle, jedoch skaliert die Leistung mit der Anzahl der verwendeten Quellen. Im Gegensatz dazu verschlechtert sich die Strahlqualität bei konventionellen Multiplexingmethoden, bei denen die Lichtpfade nebeneinander laufen. Anwendungen sind besonders im Bereich der Hochleistungsdiodelnaser zu sehen, wo immer die Strahlung sehr vieler Laserdioden gleichzeitig kollimiert wird, was in sehr schlechter Strahlqualität und damit Fokussierbarkeit resultiert. Mit dem neuen Verfahren kann das Licht von gepulst betriebenen Laserdioden oder Laserdiodenbarren auf einen gemeinsamen optischen Pfad gelenkt werden und so eine hohe Brillanz (= Laserstrahlleitung/Strahlqualität) erzielt werden. Der Vorteil gegenüber anderen Verfahren, welche beispielsweise mechanisch bewegte Spiegel benutzen, liegt in der hohen Schaltgeschwindigkeit, die eine Pulsfrequenz der einzelnen Laserquelle bis zu 2 MHz erlaubt, was eine Voraussetzung ist für die Anwendung bei Laserdioden, welche im Pulsbetrieb nur bei solch hohen Frequenzen auch mit hoher Durchschnittsleistung betrieben werden können.

Figur 11 zeigt die schematische Ausführungsform solch eines optischen Zeitmultiplexers für vier horizontal polarisierte H Laserquellen L1, L2, L3, L4. Mittels zweier Halbwellenplatten HP wird die Polarisation zweier Laser um 90° gedreht, sodass Polarisationsmultiplexing in den Polarisationsfiltern PF1 erfolgen kann. Viertel-Wellenplatten QP (auch Lambda/4-Plättchen genannt, bei

dem Licht in einer Richtung um eine viertel Wellenlänge, bzw. $\pi/2$ gegen die dazu senkrechte Richtung verzögert wird) machen aus der horizontalen bzw. vertikalen Polarisation rechts bzw. links zirkular polarisiertes Licht, je nach Orientierung der Platte. Die photoelastischen Modulatoren PEM schwingen mit einer Amplitude, die in den Extremlagen einer weiteren Viertelwellenverzögerung entspricht, sodass in einer Extremlage die Wirkung der Viertelwellenplatte QP aufgehoben wird, in der anderen hingegen verdoppelt. Heben die beiden photoelastischen Modulatoren gerade die Wirkung der Viertelwellenplatte auf, so werden zwei Laserpulse, welche gleichzeitig von den Lasern L1 und L3 emittiert werden, auf den gemeinsamen optischen Pfad OP gelenkt. Verdoppeln die Modulatoren gerade die Wirkung der Viertelwellenplatte, so sind die Laser L2, L4 an der Reihe und deren Laserpulse werden ebenfalls auf den optischen Pfad OP geleitet.

Bei Ausnutzung des elektrooptischen Verhaltens des Modulormaterials kann alternativ zum Einsatz der Viertelwellenplatten eine Viertelwellengleichspannung an den Elektroden des Modulators (somit den selben Effekt wie ein Lambda/4-Plättchen zeitigend) angelegt werden.

Mit anderen Worten kommen also beim Zeitmultiplexing in Gegenrichtung auf den zwei Ausgangspfaden des Polarisationsfilters abwechselnd Lichtpulse mit der dem jeweiligen Pfad entsprechenden Polarisation, welche zeitlich auf die maximalen Deformationslagen des Kristalls justiert sind. Im Polarisationsfilter geschieht nun Polarisationsmultiplexing, d.h. die Pulse werden auf denselben Pfad durch den Kristall gelenkt und der eine Puls wird durch die Wirkung des Kristalls und der Viertelwellenplatte bzw. -Spannung in seiner Polarisation um 90° gedreht, während der andere Puls in seiner Polarisation unverändert bleibt. Die beiden ursprünglich verschiedenen polarisierten Lichtpulse verlassen daher die Anordnung mit gleicher Polarisation, es wurde also eine Polarisationsgleichrichtung erzielt. Hat man eine zweite derartige Anordnung, so kann man mittels eines weiteren Polarisationsfilters wieder Polarisationsmultiplexing durchführen und hat somit auf vier optischen Pfaden laufende Lichtpulse auf einen einzigen Pfad geführt. Durch weiteres Kaskadieren lassen sich mit diesem Prinzip optische Multiplexer und natürlich auch optische Demultiplexer für höhere Anzahl optischer Pfade bauen. In der Schrift US 5 250 810 A findet sich basierend auf elektrooptischen Schaltern ein ähnliches System für CO₂-Laser.

Zur Erzielung eines Laserstrahles hoher Leistung können mit photoelastischen Modulatoren gütegeschaltete Laser in einem mit photoelastischen Modulatoren betriebenen Zeitmultiplexer verwendet werden.

Eine weitere Anwendung ist als einfacher stufenlos variabler optischer Schalter (w.o.) in einer ähnlichen Anordnung wie beim Güteschalten, nämlich mit einem dem photoelastischen Modulator folgenden Polarisationsfilter. Tritt durch diese Anordnung linear polarisiertes Licht, welches parallel (normal) zum Filter polarisiert ist, so kann je nach Spannungsamplitude im Mittel 0-70% (30-100%) der Lichtleistung im Polarisationsfilter abgelenkt werden. Regt man zusätzlich phasenrichtig mit einer Schwingungsform der dreifachen Frequenz an, so ist der Ablenkbereich 0-82% (18-100%). Natürlich sind dann sowohl die abgelenkte als auch die nicht abgelenkte Lichtleistung zeitlich moduliert.

Das Prinzip des photoelastischen Modulators kann auch mit dem Prinzip des akustooptischen Modulators in einem verwirklicht werden. Bei akustooptischen Modulatoren, die im Raman-Nath-Bereich $L \ll L_0 = n^2/\lambda_0$ (λ_0 ...akustische Wellenlänge, λ_0 ...Vakuumlichtwellenlänge, n ...Brechungsindex des Modulormaterials, L ...Länge des Lichtpfads im Modulator, L_0 ...charakteristische Länge) arbeiten (im Gegensatz zum wesentlich häufiger genutzten Bragg-Bereich mit $L \gg L_0$), steht die akustische Welle normal auf die Lichtausbreitung. Um Beugung zu erzielen, muss für den Durchmesser D des Lichtstrahl gelten: $D \gg \lambda$. Es wird dann der Lichtstrahl in viele Einzellichtstrahlen aufgespalten, welchen Ordnungszahlen zugeordnet werden. Der Strahl 0-ter Ordnung geht gerade, ohne Ablenkung durch den Modulator und ist lediglich in seiner Intensität reduziert. Für den Ablenkwinkel θ_N der N-ten Ordnung gilt: $\sin \theta_N = N \lambda_0/(n\lambda)$.

Die Polarisation des eingehenden Lichtstrahls ist immer so gewählt, dass kein Einfluss auf die Polarisation gegeben ist, d.h. die Polarisationsrichtung ist parallel zur schnellen oder langsamen Achse.

- 5 Wählt man nun erfindungsgemäß ein Modulatormaterial, welches über die eigene Piezoelektrizität auf Eigenfrequenzen angeregt wird, und die einfallende Polarisation 45° zur schnellen bzw. langsamen Achsen geneigt, wie im photoelastischen Modulator, und fügt ein polarisationsselektives Element hinzu, so wird die Intensitätsmodulation des Strahl 0-ter Ordnung wesentlich verstärkt, es ist dann nämlich im Gegensatz zum klassischen Raman-Nath-Modulator eine
- 10 vollständige Auslöschung möglich, und die Funktionsfähigkeit des Modulators ist auch für Strahlen gegeben, deren Durchmesser D nicht wesentlich größer als die akustische Wellenlänge Λ ist. Gilt sogar $D < \Lambda$, so ist man wieder beim bisher diskutierten photoelastische Modulator angelangt.
- 15 Die Kombination der beiden Prinzipien erlaubt also neben dem Vorteil der höheren Intensitätsmodulation, auch den Zwischenbereich abzudecken, mit $D \sim \Lambda$ oder $D = m \Lambda$ (m ... natürliche Zahl kleiner als 20).

20 Aktives Modenkoppeln, eine übliche Anwendung von akustooptischen Stehwellenmodulatoren, ist eine Anwendung dieser Kombination zweier Wirkmechanismen. Hierbei wird die Güte eines Laserresonators derart moduliert, dass in diesem nur ein sehr kurzer Lichtpuls umlaufen kann. Der Laser emittiert dabei eine Pulsfolge mit einer Frequenz, welcher der Umlauffrequenz des Lichtpulses im Resonator entspricht. Diese ist von der Resonatorlänge abhängig und liegt im Bereich von 10-500 Mhz. Die Modulation der Güte des Laserresonators erfolgt dabei mit der

25 Umlauffrequenz, sodass der Lichtpuls nur fortbestehen und verstärkt werden kann, wenn dieser den Modulator immer nur zum Zeitpunkt maximaler Transmission passiert. Im Falle des photoelastischen oder akustooptischen Stehwellenmodulators ist dies der Fall, wenn sich das Modulatormaterial gerade in der undeformierten Lage befindet und daher keine spannungsoptischen Effekte auftreten. Dies wird im folgenden Nulldurchgang genannt.

30 Erfindungsgemäß wird dieses aktive Modenkoppeln nun mit größerer Effizienz erzielt, wenn die oben beschriebene Kombination aus Polarisationsfilter und photoelastischen Modulator, welcher über die eigene Piezoelektrizität auf einer Eigenfrequenz hoher Ordnung angeregt wird, verwendet wird.

35 Der wesentliche Unterschied ist der Wirkmechanismus, der bei akustooptischen Modulatoren auf Beugung beruht, bei photoelastischen Modulatoren hingegen auf eine durch die induzierte Doppelbrechung verursachte Änderung des Polarisationszustandes. Folglich ist auch in dieser Anwendung der photoelastische Modulator nur in Verbindung mit einem Polarisationsfilter wirksam, was für übliche akustooptische Modulatoren nicht notwendig ist. Durch den anderen Wirkmechanismus ist eine sehr hohe Effizienz der Modulation zu erwarten. Die Ausbreitungsrichtung der mechanischen Welle muss normal auf die Lichtausbreitung sein, während sie in akustooptischen Modulatoren meist in einem durch die Bragg-Bedingung ermittelten schiefen Winkel geschieht. Es ist zu beachten, dass aufgrund der kurzen akustischen Wellenlänge in der vom

45 Licht durchfluteten Apertur des Kristalls streifenförmige Bereiche mit Schwingungsknoten auftreten, wo maximale Dehnungsamplituden vorliegen. Zwischen diesen Bereichen liegen Schwingungsbäuche, wo die Dehnungen dauerhaft verschwinden und kein Retardierungs-Effekt auftritt. Es liegt also während der Sperrzeiten in Wahrheit nur eine über die Apertur modulierte Transmission vor, wobei allerdings die Abstände zwischen den Bereichen maximaler und minimaler Transmission wegen der hohen Eigenfrequenz im Bereich der optischen Wellenlänge

50 liegen, so dass zusätzlich mit einem starken Beugungseffekt zu rechnen ist und somit die Gesamttransmission für den Lasergrundmode praktisch bei Null liegen wird. Außerdem ist in den Bereichen mit verschwindender Dehnung die räumliche Änderung der Dehnung maximal, so dass ein Gradientenindexeffekt auftritt, der die Lichtstrahlen in diesem Bereich aus ihrer Bahn

55 lenkt.

Für das oben beschriebene Pulse-Picking kann ebenfalls der beschriebene erweiterte Bereich des photoelastischen Modulators benutzt werden, sodass zusätzlich Beugung ausgenutzt wird.

5 Patentansprüche:

1. Photoelastischer Modulator mit einem transparenten Modulatormedium (M), wobei das Modulatormedium (M) zumindest einen piezoelektrischen Kristall aufweist, an dem Elektroden (E) zur piezoelektrischen Anregung angebracht sind, *dadurch gekennzeichnet*, dass der piezoelektrische Kristall ein Kristall der Kristallklasse 3m mit zu den Kristallachsen (x, y, z) parallel geschnittenen Kanten ist und dass die Elektroden (E) auf den xz-Oberflächen vorgesehen sind.
2. Photoelastischer Modulator nach Anspruch 1, *dadurch gekennzeichnet*, dass das Modulatormedium (M) zum exakten Betrieb auf einer Eigenfrequenz in einer Rückkopplungsschaltung integriert ist, wobei die Rückkopplungsschaltung zur Realisierung kleiner Frequenzänderungen eine Einstellungsmöglichkeit der Phasenverschiebung in der Rückkopplung aufweist.
3. Verfahren zur Modulation von Licht mittels des photoelastischen Effekts, bei dem ein Lichtstrahl durch ein transparentes Modulatormedium (M) geführt wird, wobei das Modulatormedium (M) zumindest einen piezoelektrischen Kristall aufweist, der über Elektroden (E) in zumindest eine seiner mechanischen Eigenfrequenzen angeregt wird, *dadurch gekennzeichnet*, dass als piezoelektrischer Kristall ein Kristall der Kristallklasse 3m mit zu den Kristallachsen (x, y, z) parallel geschnittenen Kanten verwendet wird, wobei die Elektroden (E) auf den xz-Oberflächen vorgesehen sind.
4. Verfahren nach Anspruch 3, *dadurch gekennzeichnet*, dass der Durchmesser des Lichtstrahls größer als die akustische Wellenlänge des angeregten piezoelektrischen Kristalls ist und dass das Modulatormedium (M) mit einem Polarisationsfilter kombiniert wird, sodass eine Intensitätsmodulation des Lichtstrahls erzielt wird, welche gleichzeitig auf Beugung und auf Auslöschung am Polarisationsfilter beruht.
5. Verfahren nach einem der Ansprüche 3 oder 4 mit nichtharmonischem zeitlichen Verlauf der Retardierung, *dadurch gekennzeichnet*, dass im Modulatormedium (M) zwei mechanische Schwingungsmoden (OM1, OM2) mit aufeinander normal stehenden Ausbreitungsrichtungen gleichzeitig angeregt werden. (Fig. 7)
6. Verfahren nach einem der Ansprüche 3 bis 5, *dadurch gekennzeichnet*, dass im Modulatormedium (M) ein Biegeschwingungsmoden angeregt wird.
7. Ellipsometer zur Messung der polarisierenden Eigenschaften einer Probe (P), mit einem photoelastischen Modulator (PEM) zur Variierung des Polarisationszustandes des messenden Lichtstrahls (OP) und einem Polarisationsfilter (PF) und einem Sensor (S) zur Messung der Wirkung der Probe auf die Polarisation des Lichtes, wobei der photoelastische Modulator (PEM) zumindest einen piezoelektrischen Kristall aufweist, an dem Elektroden (E) zur piezoelektrischen Anregung angebracht sind, und der piezoelektrische Kristall ein Kristall der Kristallklasse 3m mit zu den Kristallachsen (x, y, z) parallel geschnittenen Kanten ist und wobei die Elektroden (E) auf den xz-Oberflächen des Kristalls vorgesehen sind. (Fig. 8)
8. Gütegeschalteter Laser mit einem Laserresonator aus zwei Spiegeln (M1, M2) und einem Verstärkungsmedium (G), wobei ein oder mehrere photoelastische Modulatoren (PEM) in Kombination mit mindestens einem Polarisationsfilter (PF) zur Modulation der Güte des Laserresonators vorgesehen sind, und der photoelastische Modulator (PEM) zumindest

einen piezoelektrischen Kristall aufweist, an dem Elektroden (E) zur piezoelektrischen Anregung angebracht sind, und der piezoelektrische Kristall ein Kristall der Kristallklasse 3m mit zu den Kristallachsen (x, y, z) parallel geschnittenen Kanten ist und die Elektroden (E) auf den xz-Oberflächen des Kristalls vorgesehen sind. (Fig. 9)

- 5
9. Pulse-Picking-Vorrichtung zur Selektion von Pulsen (LP1) aus einem Pulszug (LP), mit einem photoelastischen Modulator (PEM) in Kombination mit mindestens einem Polarisationsfilter (PF), wobei der photoelastische Modulator (PEM) zumindest einen piezoelektrischen Kristall aufweist, an dem Elektroden (E) zur piezoelektrischen Anregung angebracht sind, und der piezoelektrische Kristall ein Kristall der Kristallklasse 3m mit zu den Kristallachsen (x, y, z) parallel geschnittenen Kanten ist und die Elektroden (E) auf den xz-Oberflächen des Kristalls vorgesehen sind. (Fig. 10)
- 10
10. Optischer Zeit-Multiplexer zur Lenkung von von verschiedenen Lasern (L1, ... L4) zu verschiedenen Zeiten erzeugten horizontal polarisierten Laserpulsen (H) auf einen optischen Pfad (OP) mit photoelastischen Modulatoren (PEM) und Viertelwellenplatten (QP) und Polarisationsfiltern (PF1, PF2), wobei der photoelastische Modulator (PEM) zumindest einen piezoelektrischen Kristall aufweist, an dem Elektroden (E) zur piezoelektrischen Anregung angebracht sind, und der piezoelektrische Kristall ein Kristall der Kristallklasse 3m mit zu den Kristallachsen (x, y, z) parallel geschnittenen Kanten ist und die Elektroden (E) auf den xz-Oberflächen des Kristalls vorgesehen sind. (Fig. 11)
- 15
- 20
11. Vorrichtung zur aktiven Modenkopplung zur Erzeugung einer kontinuierlichen Folge von Laserpulsen, mit einem in einem Laserresonator angeordneten photoelastischen Modulator (PEM), wobei der photoelastische Modulator (PEM) zumindest einen piezoelektrischen Kristall aufweist, an dem Elektroden (E) zur piezoelektrischen Anregung angebracht sind, und der piezoelektrische Kristall ein Kristall der Kristallklasse 3m mit zu den Kristallachsen (x, y, z) parallel geschnittenen Kanten ist und die Elektroden (E) auf den xz-Oberflächen des Kristalls vorgesehen sind.
- 25
- 30

Hiezu 4 Blatt Zeichnungen

35

40

45

50

55



Int. Cl.⁸: **G02F 1/01** (2006.01)
G01N 21/21 (2006.01)
H01S 03/106 (2006.01)
H01S 03/98 (2006.01)
H03K 05/00 (2006.01)
H04J 14/08 (2006.01)

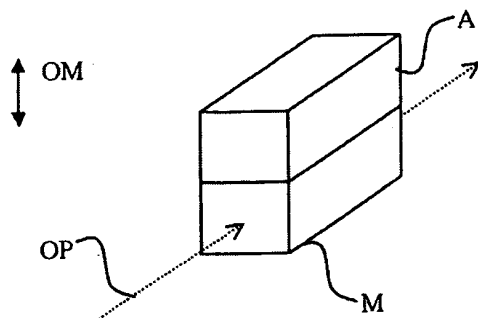


Fig. 1

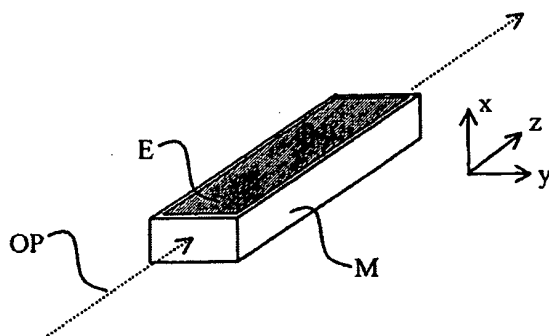


Fig. 2

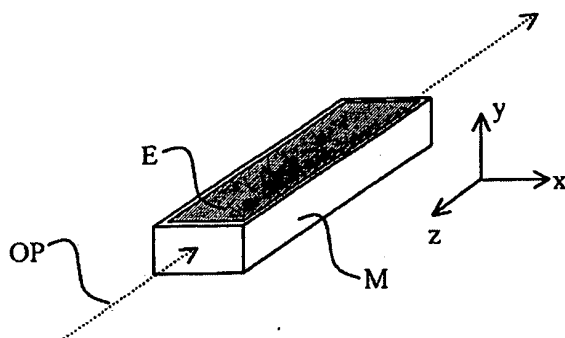


Fig. 3



Int. Cl.⁸: **G02F 1/01** (2006.01)
G01N 21/21 (2006.01)
H01S 03/106 (2006.01)
H01S 03/98 (2006.01)
H03K 05/00 (2006.01)
H04J 14/08 (2006.01)

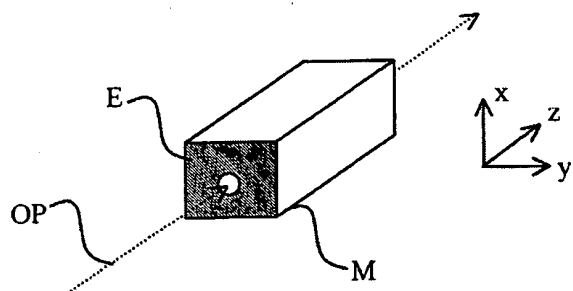


Fig. 4

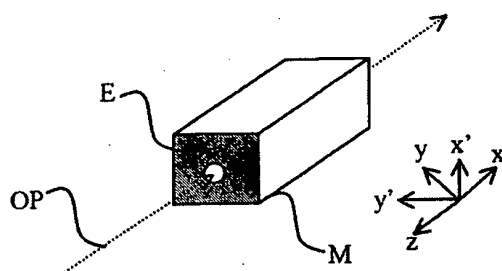


Fig. 5

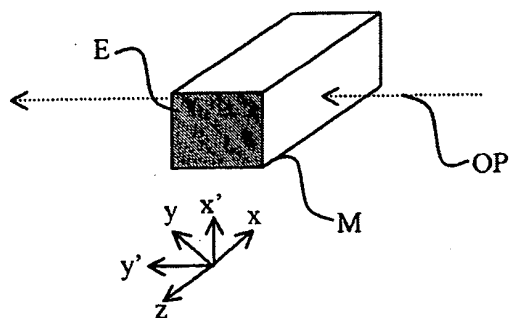


Fig. 6



Int. Cl.⁸: **G02F 1/01** (2006.01)
G01N 21/21 (2006.01)
H01S 03/106 (2006.01)
H01S 03/98 (2006.01)
H03K 05/00 (2006.01)
H04J 14/08 (2006.01)

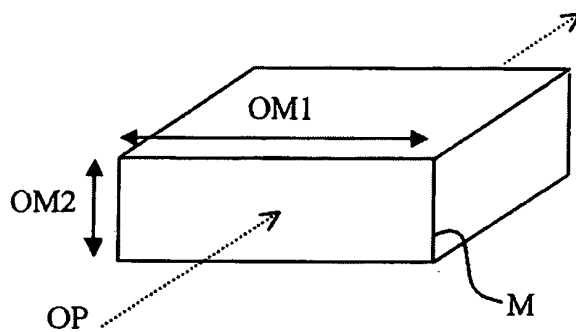


Fig. 7

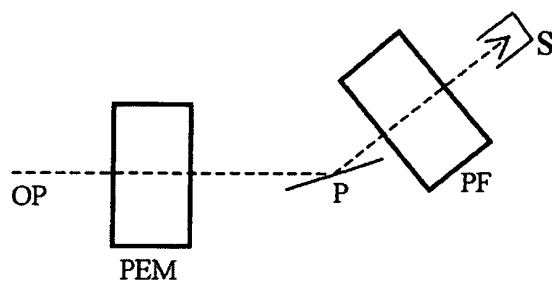


Fig. 8

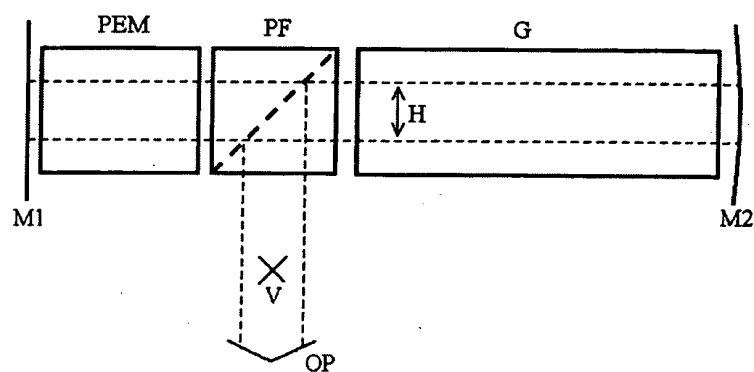


Fig. 9

Int. Cl.⁸: **G02F 1/01** (2006.01)
G01N 21/21 (2006.01)
H01S 03/106 (2006.01)
H01S 03/98 (2006.01)
H03K 05/00 (2006.01)
H04J 14/08 (2006.01)

