



(19)
 Bundesrepublik Deutschland
 Deutsches Patent- und Markenamt

(10) **DE 10 2009 002 987 A1** 2009.11.19

(12)

Offenlegungsschrift

(21) Aktenzeichen: **10 2009 002 987.7**

(22) Anmeldetag: **11.05.2009**

(43) Offenlegungstag: **19.11.2009**

(51) Int Cl.⁸: **G02F 1/133** (2006.01)
G02F 1/13363 (2006.01)

(66) Innere Priorität:
10 2008 001 827.9 16.05.2008

(71) Anmelder:
SeeReal Technologies S.A., Munsbach, LU

(74) Vertreter:
**Bradl, J., Dipl.-Phys. Dr.rer.nat., Pat.-Ass., 69198
 Schriesheim**

(72) Erfinder:
Leister, Norbert, Dr., 01279 Dresden, DE

Die folgenden Angaben sind den vom Anmelder eingereichten Unterlagen entnommen

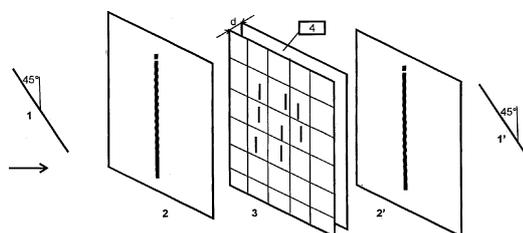
(54) Bezeichnung: **Steuerbare Vorrichtung zur Phasenmodulation**

(57) Zusammenfassung: Es soll eine steuerbare Einrichtung zur Phasenmodulation von kohärentem Licht mit Modulatorzellen aus Flüssigkristall-Molekülen geschaffen werden, mit der eine große Anzahl von Phasenstufen pro Modulatorzelle realisiert werden kann und deren Schaltzeit unter 1 ms liegt.

Die Einrichtung zur Phasenmodulation umfasst einen räumlichen Lichtmodulator mit einer Modulormatrix aus regulär angeordneten steuerbaren LC Modulatorzellen, ein Lichtquellenmittel zum Beleuchten der Modulormatrix sowie Steuermittel zum Steuern des Phasenmodulation in den LC-Modulatorzellen. Die Aufgabe wird gelöst, indem

- die Modulormatrix mit einer Konfiguration aus einer ansteuerbaren $\lambda/42$ Platte zwischen zwei nicht ansteuerbaren $\lambda/4$ Platten ausgebildet ist,
- die steuerbaren LC-Modulatorzellen vom PSS-Flüssigkristalltyp sind,
- jede LC-Modulatorzelle je nach einzuschreibenden Phasenwerten lokal mit einem positiven oder negativen Spannungswert ansteuerbar ist und
- die Steuermittel einen globalen festen Phasen-Versatz in den einzuschreibenden Phasenwerten in jedem zweiten Bildinhalteerneuerungsintervall generieren.

Anwendungsgebiet der Erfindung sind kohärent-optische Anwendungen zur dreidimensionalen Bilddarstellung.



Beschreibung

[0001] Die Erfindung betrifft eine Vorrichtung zur Phasenmodulation von kohärentem Licht mit einem räumlichen Lichtmodulator, der eine Modulatomatrix mit regulär angeordneten steuerbaren LC-Modulatorzellen aufweist, mit mindestens einer Lichtquelle zum Beleuchten der Modulatomatrix und mit einer Steuereinheit, welche die Phasenmodulation in den LC-Modulatorzellen steuert. Bei Verwendung der Vorrichtung als Anzeigedisplay kann so eine dreidimensionale Bilddarstellung realisiert werden.

[0002] Das Anwendungsgebiet der Erfindung umfasst kohärent-optische Anwendungen, die zur Modulation von kohärentem Licht eine Flüssigkristall(LC)-Vorrichtung aufweisen, mit der die Phase des Lichts in Phasenstufen, deren Anzahl typischerweise mehr als fünfzig bis zu einigen hundert betragen kann, in einem Modulationselement der LC-Vorrichtung einstellbar ist. Die LC-Vorrichtung kann zur dreidimensionalen, vorzugsweise holographischen Bilddarstellung verwendet werden.

[0003] Es besteht für kohärent-optische Anwendungen der Bedarf an einem sehr schnell schaltbaren räumlichen Lichtmodulator (SLM) mit Schaltzeiten im Bereich unter 1 ms, der vorzugsweise als räumlicher Phasenmodulator nutzbar ist. Dafür einsetzbar sind z. B. Flüssigkristall (LC) Modulatoren (LC SLM), die gegenüber anderen Modulatoren den Vorteil haben, dass sie mit herkömmlichen Fertigungstechnologien preisgünstig herzustellen sind.

[0004] Die Schaltzeit der LC Moleküle in einem LC SLM hängt unter anderem vom LC-Typ (nematisch, smektisch o. a.) und der Anordnung der LC Moleküle in einer Modulatorzelle der Modulatomatrix des LC SLM ab.

[0005] Durch die Veröffentlichung [1] A. Mochizuki, Journal of the SID 14 (2006) p 529–536 ist es bekannt, einen PSS-LC SLM (polarization shielded smectic = polarisationsabgeschirmter smektischer LC SLM) als Amplitudenmodulator einzusetzen. Für diesen Modulator typ werden Schaltzeiten angegeben, die kleiner als 500 μ s sind. Es wird beschrieben, dass sich die langen Achsen der LC Moleküle bei Anlegen eines elektrischen Feldes prinzipiell auf der Oberfläche eines Kegels entlang bewegen, dieser Kegel aber gestaucht wird. Die Stauchung verändert die Grundfläche des Kegels von einem Kreis in eine schmale Ellipse. In diesem Fall liegt die lange Achse der Ellipse in der Bildelebene und die LC Moleküle bewegen sich im Wesentlichen in der Bildelebene.

[0006] Auch das Dokument US 2007/0003709 beschreibt den Aufbau eines PSS LCD in der Verwendung eines Amplitudenmodulators.

[0007] Weiterhin ist bekannt, dass für die Ansteuerung von SLM mit nematischen LC in jedem zweiten Bildinhalteerneuerungsintervall (englisch: frame) eine Änderung des Vorzeichens der Spannung vorgenommen wird, was als frame inversion (Bildinvertierung) bezeichnet wird. Dadurch verhindert man störende chemische Prozesse, die beim Anlegen eines Gleichfeldes in der Modulatorzelle ausgelöst werden, sowie ein Einbrennen des angezeigten Bildes (sogenanntes image sticking). Die Bildinvertierung erfolgt in einem Ausführungsbeispiel so, dass in einem ersten Bildinhalteerneuerungsintervall alle Modulatorzellen der Modulatomatrix mit einer positiven Spannung und in einem zweiten Bildinhalteerneuerungsintervall alle Modulatorzellen der Modulatomatrix mit einer negativen Spannung angesteuert werden.

[0008] Alternativ kann zum Verhindern von Flackern eine bildpunktweise (dot inversion – Punktinvertierung) oder eine linienweise (line inversion – Linieninvertierung) Änderung des Vorzeichens erfolgen. Zum Beispiel werden bei der Linieninvertierung in einem ersten Bildinhalteerneuerungsintervall gerade Spalten der Modulatomatrix mit einer positiven Spannung und ungerade Spalten mit einer negativen Spannung gesteuert. In einem zweiten Bildinhalteerneuerungsintervall erfolgt die Steuerung der Spalten genau umgekehrt. Bei einer Punktinvertierung liegt in der Modulatomatrix ein schachbrettartiges Muster von positiven und negativen Spannungen vor.

[0009] Herkömmliche nematische LC SLM reagieren in der Orientierung der LC Moleküle nur auf den Betrag der anliegenden Spannung, nicht auf das Vorzeichen. Die Orientierung dieser LC Moleküle ändert sich also nicht bei der Anwendung der Bildinvertierung.

[0010] Im Gegensatz dazu offenbart die Veröffentlichung [1], dass sich für LC SLM vom PSS-Flüssigkristalltyp (PSS LC) bei Änderung des Vorzeichens der an der LC Schicht anliegenden Spannung zwei verschiedene, zueinander spiegelsymmetrische Orientierungen der LC Moleküle ergeben. Beide Orientierungen haben aber dieselbe Amplitude des modulierten Lichts zur Folge, so dass ein PSS LC als Amplitudenmodulator wie ein

herkömmlicher Modulator mit nematischen LC mittels Bildinvertierung, Punktinvertierung oder Linieninvertierung gesteuert werden kann.

[0011] Bekannt ist nach [2] S. Pancharatnam, Proc. Ind Acad. Sci. 41 (1955) p130 ff (Parts I und II) eine Anordnung aus einer $\lambda/2$ Platte zwischen zwei $\lambda/4$ Platten in der Verwendung eines Phasenmodulators, indem die $\lambda/2$ Platte in verschiedenen Winkeln ihrer optischen Achse relativ zu den $\lambda/4$ Platten eingestellt wird. Außerdem ist in [2] beschrieben, achromatische $\lambda/4$ Platten durch eine Kombination mehrerer doppelbrechender Schichten zu realisieren, und durch Kombination zweier $\lambda/2$ und einer $\lambda/4$ Platte, die unter bestimmten Winkeln ihrer optischen Achsen zueinander angeordnet sind, einen achromatischen Zirkularpolarisator zu erhalten.

[0012] Eine solche Konfiguration ist in [3] G. Love, R. Bandari, Opt. Commun. 110, (1994), p. 475–478 für einen ferroelektrischen LC SLM beschrieben, der zwar schnell schaltet, aber den Nachteil hat, dass sich damit nur zwei unterschiedliche Phasenzustände pro Modulatorzelle einstellen lassen. Das heißt, er ist ein binärer LC SLM.

[0013] Eine ähnliche Konfiguration ist auch für einen IPS (in-plane switching = in der Ebene schaltend) LC SLM möglich, wobei dieser als steuerbare $\lambda/2$ Platte zwischen zwei festen nicht steuerbaren $\lambda/4$ Platten verwendet wird. Indem die LC Moleküle durch Einwirkung eines elektrischen Feldes in der Displayebene um einen Winkel zwischen 0 und 90 Grad gedreht werden, ist eine kontinuierliche Phasenmodulation zwischen 0 und 2π möglich.

[0014] Im Gegensatz zu einem häufig genutzten dual-domain (zwei-Domänen) IPS LC SLM, bei dem eine Modulatorzelle in zwei Hälften unterteilt ist, um einen vergrößerten Blickwinkelbereich zu erhalten, müsste zum Realisieren eines Phasenmodulators eine single-domain (Ein-Domänen) Struktur mit einer in sich einheitlichen Modulatorzelle verwendet werden. Diese IPS LC SLM erreichen aber nach heutigem Stand der Technik noch nicht die gewünschten Schaltzeiten von weniger als 1 Millisekunde. Eine Modifikation eines IPS LC SLM wäre daher keine ausreichende Maßnahme, um einen schnell schaltenden Phasenmodulator zu erhalten.

[0015] Die Erfindung hat die Aufgabe, unter Vermeidung der Nachteile des Standes der Technik eine steuerbare Vorrichtung zur Phasenmodulation von kohärentem Licht auf der Basis von Flüssigkristall-Molekülen (LC Molekülen) zu schaffen, mit der mindestens 50 Phasenstufen pro Modulatorzelle realisiert werden können und deren Schaltzeit unter 1 ms liegt.

[0016] Zum Erfüllen dieser Anforderungen sollen nur geringe Modifikationen in der Ausbildung eines bekannten handelsüblichen LC SLM vorgenommen werden.

[0017] Die Aufgabe wird erfindungsgemäß gelöst auf der Grundlage einer Vorrichtung zur Phasenmodulation von kohärentem Licht mit einem räumlichen Lichtmodulator, der eine Modulatormatrix mit regulär angeordneten steuerbaren LC-Modulatorzellen aufweist, mit mindestens einer Lichtquelle zum Beleuchten der Modulatormatrix und mit einer Steuereinheit, welche die Phasenmodulation in den LC-Modulatorzellen steuert, um eine dreidimensionale Bilddarstellung in einem Anzeigedisplaysystem, das die Modulationsvorrichtung enthält, zu realisieren. Die Vorrichtung zeichnet sich erfindungsgemäß weiterhin dadurch aus, dass

- die steuerbaren LC Modulatorzellen LC Moleküle in Art und Anordnung des PSS-Flüssigkristall-Zelltyps in einer Schicht aufweisen, die mit der Funktionalität einer ansteuerbaren $\lambda/2$ Platte ausgebildet ist, welche zwischen zwei Schichten mit der Funktionalität von nicht ansteuerbaren $\lambda/4$ Platten angeordnet ist,
- jede LC Modulatorzelle durch die Steuereinheit individuell lokal mit einem positiven oder negativen Spannungswert abhängig vom positiven oder negativen Vorzeichen eines einzuschreibenden Phasenwertes ansteuerbar ist,
- die Steuereinheit eingerichtet ist, einen globalen festen Phasen-Versatz für die in die LC Modulatorzellen einzuschreibenden Phasenwerte zu generieren, und
- das Generieren des globalen festen Phasen-Versatzes in jedem zweiten Bildinhalteerneuerungsintervall erfolgt.

[0018] Diese erfindungsgemäßen Merkmale charakterisieren die steuerbare Vorrichtung zur Phasenmodulation und werden nachstehend näher erläutert:

Da, wie im Stand der Technik beschrieben, die Bewegung der LC Moleküle im Wesentlichen in der Ebene der Modulatormatrix erfolgt, ist ein ähnliches Verhalten bezüglich der Phasenmodulation wie bei einem IPS LC SLM zu erwarten, allerdings werden vorteilhaft schnellere Schaltzeiten erreicht.

[0019] Eine Orientierung der LC Moleküle aus der Ebene der Modulatormatrix heraus hätte gegebenenfalls

Amplitudenänderungen zur Folge. Diese können akzeptiert werden, wenn der Effekt der Amplitudenänderungen klein ist. Die Verwendung des LC Materials als steuerbare U2 Platte ergibt sich dadurch, dass die Doppelbrechung des LC Materials und die Schichtdicke aufeinander abgestimmt werden.

[0020] Um Modulatorzellen vom PSS LC Typ in der geforderten Weise als Phasenmodulator nutzen zu können, müssen aber wesentliche weitere Merkmale bezüglich der Ansteuerung erfüllt werden:

Eine Änderung im Vorzeichen der anliegenden Spannung führt bei PSS LC Zellen, wie oben beschrieben, zu einer unterschiedlichen Orientierung der LC Moleküle. Diese Änderung der Molekülorientierung entspricht einer Drehung der optischen Achse der $\lambda/2$ Platte. Zum Realisieren positiver Spannungen erfolgt eine Drehung der Molekülorientierung sowie der optischen Achse im Uhrzeigersinn, zum Realisieren negativer Spannungen eine Drehung gegen den Uhrzeigersinn.

[0021] Im Gegensatz zu einem Amplitudenmodulator unterscheiden sich für einen Phasenmodulator in der oben genannten Konfiguration die Phasenzustände je nach Vorzeichen der angelegten Spannung. Für die $\lambda/2$ Platte zwischen zwei $\lambda/4$ Platten entspricht eine Drehung der optischen Achse der $\lambda/2$ Platte im Uhrzeigersinn einer Phasenänderung mit positivem Vorzeichen, eine Drehung gegen den Uhrzeigersinn einer Phasenänderung mit negativem Vorzeichen.

[0022] Wird also eine Modulatorzelle z. B. durch eine Spannung U_0 mit positivem Vorzeichen der Spannung angesteuert und entspricht dieser Spannung ein Drehwinkel der optischen Achse θ_0 und einer Phase $+\varphi_0$, so ergibt sich für die Ansteuerung der gleichen Modulatorzelle mit der Spannung $-U_0$ von gleichem Betrag, aber entgegen gesetztem Vorzeichen ein Drehwinkel der optischen Achse $-\theta_0$ und eine Phase $-\varphi_0$, mit ebenfalls gleichem Betrag und entgegen gesetztem Vorzeichen.

[0023] Für eine Phasenmodulation über einen großen Modulationsbereich von Phasenwerten ist es daher erforderlich, die Ansteuerung so zu modifizieren, dass das Vorzeichen der Spannung für jede Modulatorzelle je nach einzuschreibendem Phasenwert individuell gewählt werden kann. Damit erreicht man eine Verdoppelung des realisierbaren Phasenbereichs im Vergleich zu dem Fall, wenn nur Spannungen eines Vorzeichens genutzt werden können.

[0024] Um Nachteile zu vermeiden, die durch ein längeres Anliegen einer Gleichspannung an der Modulatorzelle entstehen, ist weiterhin eine Bildinvertierung der Modulatormatrix der erfindungsgemäßen Vorrichtung erforderlich.

[0025] Eine Bildinvertierung nach einem der fest vorgegebenen Schemata nach dem Stand der Technik derart, dass global alle Modulatorzellen der Modulatormatrix gleichzeitig entweder mit positiver oder negativer Spannung angesteuert werden, oder dass eine Linien- oder Punktinvertierung erfolgt, ist aber nicht anwendbar. Dies würde der individuellen Ansteuerung einzelner Modulatorzellen je nach einzuschreibendem Phasenwert mit positiver oder negativer Spannung widersprechen.

[0026] Auch eine individuelle Ansteuerung der Modulatorzellen mit individuell positiven oder negativen Spannungswerten, bei der in jedem zweiten Bildinhalteerneuerungsintervall das Vorzeichen der Spannungen an jeder Modulatorzelle gewechselt wird, hätte Nachteile. In jedem zweiten Bildinhalteerneuerungsintervall würden im Vorzeichen geänderte Phasen in den einzelnen Modulatorzellen vorliegen. Im Fall der Darstellung eines Hologramms in der Modulatormatrix würde z. B. ein globaler Tausch des Vorzeichens der Phasenwerte eine spiegelsymmetrisch veränderte Rekonstruktion zur Folge haben. Um das zu vermeiden, kann man eine solche Invertierung in einer Vorrichtung zur Phasenmodulation verwenden, in der nur jedes zweite Bildinhalteerneuerungsintervall für eine 3D Darstellung genutzt wird. Die Ansteuerung einer Lichtquelle kann z. B. so mit der Modulatormatrix synchronisiert werden, dass die Lichtquelle in jedem zweiten Bildinhalteerneuerungsintervall ausgeschaltet wird. Die Vorrichtung hat aber den Nachteil geringerer Lichtintensität, da die Lichtquelle etwa 50 Prozent der Zeit ausgeschaltet sein muss.

[0027] Im Folgenden wird eine andere, bevorzugte Ausgestaltung vorgeschlagen, die diesen Nachteil vermeidet:

Hier werden die Phasenwerte in jedem zweiten Bildinhalteerneuerungsintervall adaptiert. Das erfolgt z. B. so, dass durch generierte Steuersignale der Steuereinheit die gleiche Information eingeschrieben wird, aber bei gleichem Bildinhalt für einzelne Modulatorzellen trotzdem in jedem zweiten Bildinhalteerneuerungsintervall gleichzeitig unterschiedliche Vorzeichen der Spannung generiert werden.

[0028] Die Bedingung, dass die gleiche Information einzuschreiben ist, aber unterschiedliche Vorzeichen der

Spannung generiert werden, lässt sich wie folgt erfüllen:

Zulässig ist ein globaler Phasen-Versatz (englisch: Phase Offset) der einzuschreibenden Phasenwerte für die gesamte Modulatormatrix. Das heißt, es wird für jede Modulatorzelle gleichzeitig ein gleicher fester Phasenwert hinzuaddiert. Für die meisten kohärenten Anwendungen, wie z. B. für Hologramm-Rekonstruktionen, kommt es nur auf die relative Phase zwischen einzelnen Modulatorzellen des PSS LC SLM an, nicht auf die absolute Phase. Deshalb kann der Phasen-Versatz hier vorteilhaft verwendet werden.

[0029] Demzufolge kann eine Bildinvertierung folgendermaßen äquivalent ersetzt werden: Es werden in jedem zweiten Bildinhalteerneuerungsintervall die in dem LC SLM einzuschreibenden Phasenwerte mit einem globalen festen Phasen-Versatz (modulo 2π) versehen, wobei der Wert des Versatzes vom Modulationsbereich des SLM abhängt. Für einen Modulator mit einem Modulationsbereich 2π ist der bevorzugte Phasenversatz π .

[0030] Dies wird im Folgenden an einem Beispiel erläutert:

Ein Phasenmodulator habe bei Spannung 0 eine relative Phase von 0, bei einer maximalen positiven Ansteuerung U_{\max} im Vergleich dazu eine Phasenänderung von $+\pi$. Dann ergibt sich bei der negativen Ansteuerung von $-U_{\max}$ relativ zur Spannung 0 eine Phasenänderung von $-\pi$.

[0031] Der Phasenmodulator hat daher einen Modulationsbereich von 2π , also das Intervall $[-\pi...+\pi]$. Dabei entspricht das Teilintervall $[-\pi...0]$ negativen Spannungen und das Teilintervall $[0...+\pi]$ positiven Spannungen.

[0032] In vier benachbarten Modulatorzellen wird dann z. B. im ersten Bildinhalteerneuerungsintervall ein linear ansteigender Phasenverlauf eingeschrieben mit den Phasenwerten: $\varphi_1 = -\pi/2$, $\varphi_2 = -\pi/4$, $\varphi_3 = 0$, $\varphi_4 = \pi/4$.

[0033] Der Phasenverlauf ist linear ansteigend, weil die Differenz von in benachbarten Zellen eingeschriebenen Werten konstant $\pi/4$ beträgt.

[0034] Weil die ersten beiden Phasenwerte im Teilintervall $[-\pi...0]$ liegen, werden diese beiden Modulatorzellen also mit negativen Spannungen angesteuert. Die dritte Zelle würde mit Spannung 0, die vierte mit einer positiven Spannung angesteuert werden.

[0035] Im zweiten Bildinhalteerneuerungsintervall wird der Phasenverlauf mit einem Phasen-Versatz von π eingeschrieben. Also sind die Phasenwerte jetzt $\varphi_1' = \pi/2$, $\varphi_2' = 3\pi/4$, $\varphi_3' = \pi$, $\varphi_4' = 5\pi/4$.

[0036] Für die Darstellung einer komplexen Zahl ist nur der Phasenwert modulo 2π relevant. Das Teilintervall $[-\pi...0]$ ist also gleichwertig mit dem verschobenen Intervall $[\pi...2\pi]$.

[0037] Der Phasenwert $5\pi/4$ entspricht daher dem Phasenwert $2\pi - 5\pi/4 = -3\pi/4$.

[0038] Jetzt liegen die ersten drei Phasenwerte im Intervall $[0...+\pi]$ und die entsprechenden Modulatorzellen werden mit positiven Spannungen angesteuert, der vierte Phasenwert liegt im Intervall $[-\pi...0]$ und die Modulatorzelle wird mit einer negativen Spannung angesteuert.

[0039] Bis auf die dritte Modulatorzelle, die eine Ausnahme darstellt, weil in einem Bildinhalteerneuerungsintervall ihre Ansteuerung 0 ist, ändert sich also das Vorzeichen der Ansteuerung für alle Modulatorzellen.

[0040] Es ist aber weiterhin der gleiche Phasenverlauf, nämlich die linear ansteigende Phase, in den Modulatorzellen eingeschrieben. Das heißt, dass die Differenz der Phasenwerte benachbarter Zellen auch im zweiten Bildinhalteerneuerungsintervall weiterhin $\pi/4$ ist. Somit wird entsprechend der Wertevorgabe der Phase das Vorzeichen der Spannung in den meisten Zellen in jedem zweiten Bildinhalteerneuerungsintervall invertiert, während der in die Modulatormatrix eingeschriebene relevante Phasenverlauf erhalten bleibt.

[0041] Der lokale Phasen-Versatz ist in den LC Modulatorzellen bei ausgeschaltetem elektrischem Feld durch Einstellung der Molekülachsen der LC Moleküle parallel zu den optischen Achsen der $\lambda/4$ Schichten generierbar.

[0042] Weiterhin ist der aus einer vorgegebenen Spannung resultierende Phasenwert bei Umpolung der Spannung mit gleichem Betrag, aber entgegengesetztem Vorzeichen in einer LC Modulatorzelle realisierbar.

[0043] In vorteilhafter Weise ist die mindestens eine Lichtquelle der steuerbaren Vorrichtung zum Bereitstellen von polarisiertem Licht ausgebildet. Die Modulormatrix kann alternativ mindestens eingangsseitig einen Polarisator aufweisen. Vorteilhaft kann als Polarisator ein Zirkularpolarisator vorgesehen werden, der die Funktionalität einer $\lambda/4$ Platte und eines Linearpolarisators kombiniert.

[0044] In weiterer Ausbildung der Erfindung weist die Modulormatrix zur Farbdarstellung eine Konfiguration der $\lambda/4$ Platten und/oder der $\lambda/2$ Platte auf, mit der eine Phasenmodulation für mindestens drei verschiedene Farben bzw. Wellenlängen durch die Steuereinheit steuerbar ist. Die $\lambda/2$ Platte weist dann zur Phasenmodulation eine Dicke d der LC Schicht derart auf, dass die für eine mittlere der zur Modulation verwendeten mindestens drei Wellenlängen optimal ausgelegt ist.

[0045] Die Vorrichtung zur Phasenmodulation kann zur Farbdarstellung LC Modulatorzellen mit einer Mischung solcher LC Materialien aufweisen, deren Dispersion sich mit der Wellenlänge ändert, so dass $\Delta n(\lambda)d \approx \lambda/2$ für die verschiedenen Wellenlängen der mindestens drei Farben gilt.

[0046] Eine andere vorteilhafte Ausbildung sieht vor, dass die $\lambda/4$ Platten und/oder die $\lambda/2$ Platte für die den verschiedenen Wellenlängen zugeordneten LC Modulatorzellen eine unterschiedliche Ausbildung hinsichtlich ihrer Schichtdicke d und/oder ihrer Ausrichtung der optischen Achsen aufweisen.

[0047] Weiterhin können die nicht steuerbaren $\lambda/4$ Platten als achromatische Elemente ausgebildet sein. Deren Ausführung und die der achromatischen Zirkularpolarisatoren, in die die Funktionalität der $\lambda/4$ Platten integriert ist, kann wie im Stand der Technik zitiert erfolgen.

[0048] Zur Phasenmodulation können die nicht steuerbaren $\lambda/4$ Platten und/oder die $\lambda/2$ Platte auch als Multi-Order Elemente ausgebildet sein. Dieser Fall tritt ein, wenn es einen Satz von Wellenlängen λ und einen Satz von ganzen Zahlen m_i gibt, durch welche für die $\lambda/2$ Platte die Gleichung

$$\Delta n(\lambda_i)d = (2m_i + 1)\lambda_i/2$$

und/oder für die $\lambda/4$ Platte die Gleichung

$$\Delta n(\lambda_i)d = (4m_i + 3)\lambda_i/2$$

für alle $i = 1, 2, 3, \dots$ mindestens näherungsweise erfüllt sind.

[0049] Mit den beschriebenen Ausbildungen kann eine Vorrichtung zur Phasenmodulation vorteilhaft durch vergleichsweise einfache, aber wirkungsvolle Modifikationen eines bekannten LC SLM geschaffen werden, der auch schnelle Schaltzeiten ermöglicht.

[0050] Die Erfindung wird nachfolgend näher beschrieben. In den dazugehörigen Zeichnungen zeigen

[0051] [Fig. 1](#) eine schematische Darstellung einer erfindungsgemäßen LC Anordnung zur Phasenmodulation,

[0052] [Fig. 2](#) eine schematische Darstellung der bevorzugten Rotationsrichtung der LC Moleküle in Abhängigkeit von der angelegten Spannung,

[0053] [Fig. 3a](#), [Fig. 3b](#) schematische Darstellungen einer Modulormatrix mit einer Inversion der LC Modulatorzellen zweier aufeinanderfolgender Bilder nach dem Stand der Technik, und

[0054] [Fig. 4a](#), [Fig. 4b](#) schematische Darstellungen einer Modulormatrix mit individuell lokal angesteuerten LC Modulatorzellen ([Fig. 4a](#)) und die Inversion der LC Modulatorzellen durch einen globalen Phasen-Versatz ([Fig. 4b](#)).

[0055] Die erfindungsgemäße Vorrichtung zur Phasenmodulation von kohärentem Licht umfasst einen räumlichen Lichtmodulator (SLM), mindestens ein Lichtquellenmittel zum Beleuchten der Modulormatrix des SLM und eine Steuereinheit zum Steuern der Phasenmodulation von Modulatorzellen der Modulormatrix. Die Modulatorzellen sind regelmäßig in Zeilen und Spalten angeordnete und vorzugsweise rechteckig ausgebildete LC Modulatorzellen. Auch andere Formen von LC Modulatorzellen können die Funktionsweise der Erfindung realisieren.

[0056] Die Steuereinheit weist Speicher- und Recheneinheiten auf, die untereinander zum Generieren und zum Austausch von Daten soft- und hardwaremäßig kommunizieren, um für eine vorzugsweise dreidimensionale Bilddarstellung die LC Modulatorzellen mit Steuersignalen zu steuern.

[0057] Die Vorrichtung zur Phasenmodulation ist z. B. in ein holographisches Anzeigedisplays integrierbar.

[0058] Der Aufbau einer steuerbaren phasenmodulierenden Vorrichtung ist in [Fig. 1](#) schematisch nur mit den wichtigsten Komponenten dargestellt.

[0059] Eine mit einer Schichtdicke d ausgebildete dreidimensionale Modulormatrix **3** ist als steuerbare $\lambda/2$ Platte zwischen zwei statischen, nicht steuerbaren Schichten angeordnet. Die zwei statischen Schichten sind mit der Funktionalität von nicht steuerbaren $\lambda/4$ Platten **2**, **2'** ausgebildet. Dies entspricht der von Pancharatnam [2] im Stand der Technik in ihrer Wirkungsweise und ihren Eigenschaften beschriebenen Anordnung. Die $\lambda/4$ Platten **2**, **2'** können z. B. durch Folien realisiert sein.

[0060] Die $\lambda/2$ Platte weist eine durch eine Steuereinheit **4** steuerbare LC Schicht vom PSS Flüssigkristalltyp auf und ist mit einer regelmäßigen Anordnung von Modulatorzellen in Reihen und Spalten versehen. In einigen Modulatorzellen ist ein orientiertes LC Molekül beispielgebend eingezeichnet. Die optischen Achsen beider $\lambda/4$ Platten **2**, **2'** sind parallel zueinander ausgerichtet und durch eine vertikale Linie dargestellt. Mit **1** und **1'** ist die Polarisationsrichtung des einfallenden Lichts am Ein- und Ausgang der Modulationsvorrichtung bezeichnet.

[0061] Die Dicke d der LC Schicht entspricht der Funktionalität einer $\lambda/2$ Platte und ist gekennzeichnet durch die Gleichung $(1) \Delta n d \approx (2m + 1)\lambda/2$, wobei Δn die Doppelbrechung des verwendeten LC Materials und λ die Wellenlänge des verwendeten Lichts charakterisieren und m eine ganze Zahl ist.

[0062] Die Orientierung der $\lambda/4$ Platten **2**, **2'**, relativ zur Orientierung der doppelbrechenden LC Moleküle bei ausgeschaltetem elektrischem Feld ist hier so gewählt, dass die optischen Achsen der $\lambda/4$ Platten und der $\lambda/2$ Platte parallel liegen. Generell können auch andere Ausrichtungen der optischen Achsen zueinander verwendet werden.

[0063] Von einem nicht dargestellten Lichtquellenmittel gelangt Licht **1**, das vorzugsweise linear polarisiert ist, mit einem Polarisationswinkel α von 45° auf die nicht ansteuerbare $\lambda/4$ Platte **2**. Diese wandelt das linear polarisierte in zirkular polarisiertes Licht um. Die in Lichteinfallrichtung folgende ansteuerbare $\lambda/2$ Platte ändert die Phase des durchtretenden Lichts je nach eingestelltem Drehwinkel ihrer optischen Achse. Die gezeigte parallele Ausrichtung der optischen Achsen wird als relative Phase 0 angesehen. Durch eine Ansteuerung der $\lambda/2$ Platte würde sich eine Änderung der Phase ergeben. Die der $\lambda/2$ Platte folgende zweite $\lambda/4$ Platte **2'** generiert dann wieder linear polarisiertes Licht **1'** mit einer Polarisationsrichtung parallel zu der am Eingang vorliegenden Richtung.

[0064] Die mindestens eine Lichtquelle kann z. B. ein Laser sein, der vorzugsweise linear polarisiertes Licht erzeugt. Der Aufbau in [Fig. 1](#) kann auch mindestens einen zusätzlich aktivierbaren Linearpolarisator umfassen.

[0065] Eine andere Möglichkeit des Generierens eines globalen Phasen-Versatzes besteht darin, handelsübliche Zirkularpolarisatoren einzusetzen, die bereits in sich die Funktion eines Linearpolarisators und einer $\lambda/4$ Platte kombinieren.

[0066] LC Lichtmodulatoren weisen nach dem Stand der Technik häufig eine Anordnung auf, die beiderseits der LC Schicht wenigstens zwei Substrate – häufig in Form dünner Glasplatten – enthält. Auf einem Substrat ist in der Regel eine gemeinsame Elektrode (Grundelektrode) für alle Modulatorzellen aufgebracht, auf dem anderen Substrat eine individuelle Elektrode für jede Modulatorzelle zum Ansteuern. Für die Steuerung wird nach dem Stand der Technik die gemeinsame Elektrode auf einen mittleren Spannungswert ungleich 0 eingestellt, z. B. 6 V (auch als Source Bus Voltage bezeichnet). Die individuellen Elektroden können dann auf größere oder kleinere variable Spannungswerte eingestellt werden, z. B. auf 9 Volt für eine Modulatorzelle und auf 3 Volt für eine andere. Die von außen aktivierten Spannungswerte sind positiv. Für diese Elektroden liegt aber im ersten Fall eine positive Spannung von +3 Volt (9 Volt – 6 Volt) und im zweiten Fall eine negative Spannung von –3 Volt (3 Volt – 6 Volt) an. Durch die Vorgabe eines mittleren Spannungswertes kann also nach dem Stand der Technik das Vorzeichen der Spannung, die an einer Modulatorzelle anliegt, variiert werden.

[0067] Im Folgenden werden die Begriffe positive und negative Spannung in diesem Sinne verwendet.

[0068] Ein Vorzeichenwechsel der Spannung wird dagegen erfindungsgemäß in aufeinanderfolgenden Bildhalterneuerungsintervallen durchgeführt, um störende chemische Prozesse, die durch Gleichspannung entstehen würden, zu verhindern.

[0069] In vielen herkömmlichen LCD orientieren sich die Flüssigkristallmoleküle der Modulormatrix nur in Abhängigkeit vom Betrag der Spannung, nicht aber von deren Vorzeichen. Der Vorzeichenwechsel hat daher bei diesen Modulatorarten keine nachteilige Auswirkung auf die Orientierung der Flüssigkristallmoleküle.

[0070] Displays vom PSS Flüssigkristalltyp (PSS LCD) unterscheiden sich nach dem Stand der Technik von den im vorhergehenden Absatz beschriebenen herkömmlichen LCD dadurch, dass die Orientierung der Moleküle vom Vorzeichen der angelegten Spannung abhängt.

[0071] Dies ist in [Fig. 2](#) schematisch dargestellt. In einem perspektivisch gezeigten Ausschnitt der Modulormatrix **3** ist in drei Modulatorzellen jeweils ein LC Molekül mit Orientierung bei angelegter Spannung zu sehen, wobei ein Pfeil auf dieses orientierte Molekül verweist. In einer Modulatorzelle (links in der Matrix) mit aktivierter negativer Spannung rotieren die LC Moleküle entgegen dem Uhrzeigersinn um den Winkel $-\theta$. In einer Modulatorzelle (Matrixmitte) mit aktivierter positiver Spannung rotieren sie im Uhrzeigersinn um den Winkel $+\theta$. Zum Vergleich ist in einer Modulatorzelle (rechts in der Matrix) der Spannungswert 0 vorhanden.

[0072] Wird ein PSS LCD als Amplitudendisplay eingesetzt, dann erzeugt die Ansteuerung mit einem unterschiedlichen Vorzeichen immer die gleiche Amplitude. Denn die Amplitudensteuerung beruht auf einer Drehung linear polarisierten Lichts. Eine $\lambda/2$ Platte mit relativem Winkel θ zur Polarisation des einfallenden Lichts dreht diese um 2θ . Die Transmission des Amplitudenmodulators bei gekreuzten Polarisatoren ist proportional dem Quadrat des Sinus von 2θ . Sie ist also gleich für den positiven Winkel 2θ wie für den negativen Winkel -2θ . Daher ist es in einem Anzeigedisplay bzw. der Modulormatrix unerheblich, ob die Drehung der Moleküle im oder gegen den Uhrzeigersinn erfolgt. Für einen durch ein PSS LCD realisierten Amplitudenmodulator kann deshalb eine herkömmliche Steuerung verwendet werden.

[0073] Für einen PSS LCD Phasenmodulator gilt dies jedoch nicht. Hier würde sich der durch eine positive Spannung erzeugte Phasenwert von dem durch eine negative Spannung erzeugten Phasenwert im Vorzeichen unterscheiden.

[0074] Für eine Phasenmodulation muss demzufolge erfindungsgemäß die elektrische Steuerung durch die Steuereinheit so geändert werden, dass eine einzelne Modulatorzelle lokal gezielt mit entweder einer positiven oder negativen Spannung gesteuert werden kann.

[0075] Um eine Phasenmodulation im positiven Wertebereich von 0 bis $+\varphi$ realisieren zu können, muss die Steuereinheit die Modulatorzellen der Modulormatrix **3** mit einem positiven Spannungswert ansteuern, so dass die LC Moleküle eine Drehung im Uhrzeigersinn ausführen. Bei der Ansteuerung mit einem gleich großen negativen Spannungswert und einer daraus resultierenden Drehung der LC Moleküle gegen den Uhrzeigersinn erhält man eine Phasenmodulation im negativen Wertebereich von 0 bis $-\varphi$. Aufgrund der Tatsache, dass zur Darstellung komplexer Zahlen Phasenwerte nur modulo 2π eingehen, ist der negative Wert $-\varphi$ äquivalent zu $2\pi - \varphi$.

[0076] [Fig. 3a](#) und b zeigen schematisch eine herkömmliche Ansteuerung eines SLM gemäß dem Stand der Technik mit dem Schema der Pixelinversion für zwei aufeinander folgende darzustellende Bilder M und M + 1. Die SLM enthalten eine Modulormatrix mit 4×4 regelmäßig in Zeilen und Spalten angeordneten Modulatorzellen.

[0077] Im Bild M nach [Fig. 3a](#) gibt es ein regelmäßiges Muster von zu realisierenden positiven und negativen Spannungen an den einzelnen Modulatorzellen. Die Beträge der Spannungen hängen hier von den eingeschriebenen Amplitudenwerten ab, das Vorzeichen der Spannungen wird aber unabhängig vom Inhalt verwendet.

[0078] Im nächsten anzuzeigenden Bild M + 1 gemäß [Fig. 3b](#) sind die einzelnen Spannungen für jede der 4×4 Modulatorzellen gerade im Vorzeichen gegenüber dem Bild M getauscht. Die hier gezeigte Inversion verwendet ein schachbrettartiges Muster zum Steuern. Die Steuerung durch die Steuereinheit kann auch mit anderen Mustern erfolgen. So könnten im Bild M z. B. jede zweite Spalte oder Zeile nur mit negativen oder nur mit positiven Spannungswerten gesteuert werden. Oder die Steuerung könnte im Bild M für alle Modulatorzellen mit positiven Spannungswerten und im Bild M + 1 mit negativen Spannungswerten durchgeführt werden.

[0079] In einem PSS LCD mit einer Vorrichtung zur Phasenmodulation gemäß der Erfindung steuern die Steuermittel jede Modulatorzelle individuell lokal entsprechend dem vorgegebenen einzuschreibenden Phasenwert mit einer positiven oder negativen Spannung. Dies ist im Ausführungsbeispiel eines SLM in [Fig. 4a](#) und [Fig. 4b](#) dargestellt.

[0080] Ein Zahlenbeispiel (1) zeigt für einen SLM aus 4×4 Modulatorzellen zur Phasenmodulation einzuschreibende Phasenwerte zwischen 0 und 2π für einen linearen Phasenverlauf. Die Phasenwerte liegen z. B. vorberechnet und gespeichert in Speichereinheiten der Steuereinheit vor:

0.7 π	0.2 π	1.3 π	0.5 π
1.1 π	0.9 π	0.8 π	1.2 π
0.5 π	1.6 π	1.7 π	1.1 π
1.5 π	1.1 π	1.4 π	0.9 π

[0081] [Fig. 4a](#) zeigt schematisch die Modulatorzellen mit anzusteuern den positiven und negativen Spannungswerten, dargestellt durch Plus- und Minuszeichen in der Zelle: Alle Modulatorzellen mit Phasenwerten im Intervall $[0...2\pi]$ werden mit einer positiven Spannung angesteuert. Alle Phasenwerte im Intervall $[\pi...2\pi]$ werden mit negativen Spannungswerten angesteuert, da für eine Darstellung modulo 2π das Intervall $[\pi...2\pi]$ äquivalent zu dem Intervall $[-\pi...0]$ ist.

[0082] Die Modulatorzelle der obersten Reihe links mit der Phase 0.77 wird beispielweise mit einer Spannung U_1 gesteuert, die Modulatorzelle in der obersten Reihe, die 3. von links, mit der Phase $1.3\pi = 2\pi - 0.7\pi$ mit der Spannung $-U_1$ von gleichem Betrag, aber entgegengesetztem Vorzeichen.

[0083] Aus der individuellen lokalen Ansteuerung der Modulatorzellen mit positiven und negativen Spannungswerten ergibt sich aber das eingangs beschriebene Problem des Auftretens störender chemischer Prozesse bei längerem Anliegen einer Gleichspannung, wenn also für einen längeren Zeitraum der gleiche Inhalt angezeigt werden muss. Hierfür müssten die gleichen Phasenwerte mehrmals in die gleichen Modulatorzellen eingeschrieben werden.

[0084] Erfindungsgemäß wird daher für die gesamte Modulatormatrix ein globaler fester Versatz der Phase zwischen aufeinanderfolgend anzuzeigenden Bildern eingeführt, um dieses Problem zu beseitigen. Dieser Phasen-Versatz wird durch die Steuereinheit generiert oder gleich in eine Berechnung, z. B. eine Hologrammberechnung, integriert. Dem Verwenden eines Phasen-Versatzes liegt die Erkenntnis zugrunde, dass für die Funktion als Phasenmodulator in kohärent-optischen Anwendungen nur die relative Phase zwischen verschiedenen Modulatorzellen wichtig ist, nicht aber die absolute Phase der einzelnen Zellen.

[0085] Angewandt auf das obige Zahlenbeispiel (1) ergibt ein globaler Versatz von π für den SLM aus 4×4 Modulatorzellen folgende Phasenwerte und somit das Zahlenbeispiel (2):

1.7 π	1.2 π	0.3 π	1.5 π
0.1 π	1.9 π	1.8 π	0.2 π
1.5 π	0.6 π	0.7 π	0.1 π
0.5 π	0.1 π	0.4 π	1.9 π

[0086] Wie in [Fig. 4b](#) zu sehen ist, ändert sich dann für jede Modulatorzelle das Vorzeichen. In der ersten Spalte links oben erfolgte z. B. die Änderung von 0,7 π (positive Spannung) im Zahlenbeispiel (1) zu 1,7 π (also $2\pi - 0.3\pi$, negative Spannung) im Zahlenbeispiel (2).

[0087] Der globale Versatz der Phase kann in der Vorrichtung zur Phasenmodulation auf verschiedene Weise realisiert werden. Eine Möglichkeit besteht darin, den Phasen-Versatz in der Berechnungseinheit zur Generierung der in den Lichtmodulator einzuschreibenden Daten, also beispielsweise bei einer Hologrammberechnung selbst, zu verarbeiten. In der Steuereinheit wird für die jeweilige anzusteuern de Modulatorzelle in Abhängigkeit vom einzuschreibenden Phasenwert eine elektrische Spannung zum Ansteuern der Zelle im SLM ermittelt.

[0088] Eine weitere Möglichkeit zum Realisieren des globalen Phasen-Versatzes sieht daher vor, dass die Steuereinheit in jedem zweiten Bildinhalteerneuerungsintervall beim Ermitteln der Spannung den Phasen-Versatz

satz berücksichtigt.

[0089] Im Gegensatz zu herkömmlichen LCDs zur Amplitudenmodulation ist zwar im vorliegenden Phasenmodulator die mittlere Spannung über zwei aufeinander folgende Bildinhalteintervalle nicht 0.

[0090] Auf das Beispiel im vorhergehenden Abschnitt angewandt bedeutet dies für die erste Modulatorzelle links oben in der Tabelle: Die Phasenwerte $+0.7\pi$ im ersten Bildinhalteintervall und -0.3π im zweiten Bildinhalteintervall bei gleichem Bildinhalt würden einer positiven Spannung U_1 und einer negativen Spannung $-U_2$ mit einem kleineren Betrag $|-U_2| < |U_1|$ entsprechen.

[0091] Die für die Funktionsweise wichtige mittlere Spannung, im Beispiel $0.5(U_1 - U_2)$, wird dabei aber relativ zu einer Gleichspannung ohne den Phasen-Versatz (im Beispiel U_1) deutlich reduziert.

[0092] Um die mittlere Spannung tatsächlich auf 0 zu reduzieren, kann man in den Zahlenbeispielen (1) und (2) die invertierten Phasenwerte in die Modulatorzellen einschreiben und erfindungsgemäß für die Zeit des Einschreibens die mindestens eine Lichtquelle abschalten. Der SLM moduliert dann nur in jedem zweiten Bildinhalteintervall Licht. In den anderen Bildinhalteintervallen wird er nicht von einer Lichtquelle beleuchtet.

[0093] Bei Verwendung der Vorrichtung als Anzeigedisplays für eine dreidimensionale Bilddarstellung würde daher auch diese dreidimensionale Bilddarstellung nur in jedem zweiten Bildinhalteintervall erzeugt.

[0094] In der Modulatorzelle links oben im Zahlenbeispiel (1), in die im ersten Bildinhalteintervall der Phasenwert 0.7π mit der Spannung U_1 eingeschrieben war, würde dann im nächsten Bildinhalteintervall z. B. der Phasenwert $1.3\pi(2\pi - 0.7\pi)$ mit der Spannung $-U_1$ eingeschrieben werden.

[0095] Durch eine Synchronisierung der Steuerung der mindestens einen Lichtquelle und der Modulatormatrix wäre dann die Lichtquelle im ersten Bildinhalteintervall eingeschaltet und im zweiten Bildinhalteintervall ausgeschaltet.

[0096] Diese Ausgestaltung hat den Vorteil der Reduzierung der mittleren Spannung auf 0.

[0097] Ein Nachteil liegt darin, dass die mittlere Helligkeit einer dreidimensionalen Bilddarstellung in einer Vorrichtung mit ein oder mehreren Lichtquellen gegebener Helligkeit im Vergleich zu der vorher beschriebenen Ausgestaltung auf etwa 50% verringert wird.

[0098] Der erfindungsgemäße Aufbau des Phasenmodulators vom PSS-Flüssigkristalltyp mit $\lambda/4$ Platten, die z. B. als doppelbrechend wirkende Folien ausgebildet werden können, und mit der Möglichkeit der individuellen lokalen Wahl des Vorzeichens der anzulegenden Spannung für jede Modulatorzelle sowie mit der Kompensation der Gleichspannung durch einen globalen Phasen-Versatz, realisiert einen effizienten phasenmodulierenden SLM. Dieser SLM ist in Verbindung mit seinen schnellen Schaltzeiten zum Darstellen holographischer Rekonstruktionen vorteilhaft einsetzbar.

[0099] Eine weitere Ausführung der steuerbaren Vorrichtung zur Phasenmodulation mit einem PSS-Flüssigkristalltyp wird durch eine Modifikation zur Farbdarstellung erreicht, wie sie z. B. in einem holographischen Anzeigedisplays zur farbigen Rekonstruktion benötigt wird. Der LC SLM muss eine Phasenmodulation für mindestens drei verschiedene Farben, in der Regel für die Grundfarben rot, grün und blau, ausführen. Letztere können z. B. durch drei Laser mit unterschiedlichen schmalbandigen Emissionswellenlängen realisiert werden. Jedoch tritt hier das Problem auf, dass die Schichtdicken einfacher $\lambda/4$ - und $\lambda/2$ Platten oft nur für eine Wellenlänge optimal angepasst sind.

[0100] Prinzipiell besteht dieses Problem auch bei amplitudenmodulierenden LC Displays. Auch ein herkömmliches IPS Display (IPS = in plane switching) arbeitet z. B. wie eine $\lambda/2$ Platte mit veränderlicher Orientierung der optischen Achsen der Moleküle. Eine einfache Drehung der Moleküle bei einer linearen Polarisation erfolgt dann nur für eine Wellenlänge. Für die anderen Wellenlängen ergibt sich am Ausgang der LC Schicht ein elliptischer Polarisationszustand des Lichts. Nach dem Verlassen des Linearpolarisators am Ausgang der Modulatorzelle (siehe [Fig. 1](#)) führt das bei gleicher Spannung zu unterschiedlichen Amplituden für verschiedene Wellenlängen des Lichts. Für ein amplitudenmodulierendes Display hat das nur den Nachteil etwas geringerer Lichteffizienz für die abweichenden Wellenlängen.

[0101] Für einen Phasenmodulator in der Konfiguration $\lambda/4$ -, $\lambda/2$ -, $\lambda/4$ Platte würde die Wellenlängenabhängigkeit aber größere Nachteile haben. Nur für eine Wellenlänge kann eine reine Phasenmodulation bei konstanter Amplitude erzielt werden. Für die anderen Wellenlängen würden unerwünschte gekoppelte Amplitudenänderungen zusammen mit den Phasenänderungen auftreten. Um diesen Effekt zu verringern, können die nachfolgend angegebenen Maßnahmen oder Mittel eingesetzt werden.

[0102] Zum einen kann man prinzipiell von Amplitudendisplays bekannte Mittel auch auf das Phasendisplay übertragen.

(a) Ein einfacher Ansatz besteht darin, die Dicke d der LC Schicht auf die mittlere Wellenlänge, die dem grünen Licht entspricht, optimal auszulegen. Für rotes und blaues Licht bewirkt dann die für diese Wellenlängen vorhandene Abweichung von der für eine $\lambda/2$ Platte geforderten Schichtdicke eine geringfügige, mit der Phase gekoppelte Amplitudenänderung, die in Kauf zu nehmen ist.

(b) Ein LC Material für Displays ist häufig eine Mischung mehrerer verschiedener Einzelsubstanzen, deren Mischungsverhältnis Parameter wie z. B. die Doppelbrechung beeinflussen kann. Es sollten daher solche LC Materialien für einen Phasenmodulator gemischt werden, deren Dispersionen sich in bevorzugter Weise mit der Wellenlänge ändern, so dass die Beziehung $\Delta n(\lambda)d \approx \lambda/2$ nicht nur für eine, sondern für verschiedene Wellenlängen gilt.

(c) Weiterhin kann ein Phasenmodulator dadurch realisiert werden, dass die LC Schicht der $\lambda/4$ Platten und/oder der $\lambda/2$ Platte räumlich strukturiert ist, so dass die das Licht lokal rot, grün und blau modulierenden LC Schichten jeweils eine auf ihre zu modulierende Wellenlänge angepasste Dicke d der $\lambda/4$ - bzw. $\lambda/2$ Platte aufweisen. So wie ein herkömmlicher Bildschirm rote, grüne und blaue Farbpixel enthält, die mittels räumlich strukturierter Farbfilter für jeden Pixel bzw. jede Modulatorzelle nur eine Farbe modulieren und die anderen Farben absorbieren, so Farbpixel können für die einzelnen z. B. auch unterschiedlich dicke $\lambda/4$ Platten aufgebracht werden.

[0103] Weiterhin ist eine Phasenmodulationsvorrichtung auch folgendermaßen zu realisieren:

(d) Für $\lambda/4$ - oder $\lambda/2$ Platten sind Lösungen bekannt, mit denen man prinzipiell achromatische Elemente herstellen kann. Zwei verschiedene Materialien, z. B. eine dünne Platte aus Kristallquartz und eine Platte aus Magnesiumfluorid, können so miteinander kombiniert werden, dass die optischen Achsen beider Materialien orthogonal zueinander liegen. Die spektralen Dispersionen der Doppelbrechung jeder Platte löschen sich dann über einen bestimmten Wellenlängenbereich aus. Solche achromatischen Elemente können bevorzugt für die statischen, nicht steuerbaren $\lambda/4$ Platten des erfindungsgemäßen Phasenmodulators eingesetzt werden.

[0104] Um ein dynamisches achromatisches Element zu realisieren, müssten beide $\lambda/4$ Platten aktiv gedreht werden. Das bedeutet, dass dann zwei aktive Schichten gesteuert werden müssen, was prinzipiell auch möglich ist.

[0105] Außerdem besteht eine Möglichkeit, achromatische $\lambda/4$ Platten aus der Kombination dreier doppelbrechender Platten des gleichen Materials, deren optische Achsen unter vorgegebenen Winkeln zueinander gedreht sind, zu erhalten.

(e) Es ist allgemein bekannt, Multi-Order Elemente zum Modulieren von Licht einzusetzen – allerdings nicht im Zusammenhang mit Phasendisplays. Ein Multi-Order Element oder Multi-Order DOE (diffraktives optisches Element) kann z. B. eine diffraktive Zonenlinse sein, die Licht mehrerer Wellenlängen fokussiert. Der relative optische Weg in benachbarten Zonen der Zonenlinse darf sich nur um ein Vielfaches der Wellenlänge voneinander unterscheiden, wenn eine kontinuierliche Phasenfunktion zu realisieren ist. Für zwei oder drei unterschiedliche Wellenlängen kann man jedoch erreichen, dass diese Bedingung für unterschiedliche Vielfache der einzelnen Wellenlängen realisiert wird.

[0106] Die weiter oben bereits angegebene Gleichung für eine $\lambda/2$ Platte

$$\Delta n d = (2m + 1)\lambda/2 \quad (1)$$

kann für unterschiedliche Ordnungen m_i (ganzzahlig) und unterschiedliche Wellenlängen λ_i gleichzeitig erfüllt sein:

Wenn es keine spektrale Dispersion der Doppelbrechung gäbe und Δn für alle Wellenlängen gleich wäre, dann würde folgende Gleichung gelten:

$$(2m_i + 1)/(2m_j + 1) = \lambda_j/\lambda_i \quad (2a)$$

[0107] Sie gilt z. B. für die Wellenlängen 465, 537 und 635 nm, die im blauen, grünen und roten Spektrum des Lichts liegen, wobei $m = 5, 6, 7$ ist.

[0108] Unter Berücksichtigung der Dispersion können sich die genannten Wellenlängen jedoch etwas verschieben. Dann muss die Gleichung

$$(2m_i + 1)/(2m_j + 1) = \lambda_j \Delta n(\lambda_i) / (\lambda_i \Delta n(\lambda_j)) \quad (2b)$$

erfüllt sein.

[0109] Analog folgt dann für eine Multi-Order $\lambda/4$ Platte ohne Dispersion:

$$(4m + 1)\lambda/4 = \Delta n d \quad (3)$$

$$(4m_i + 1)/(4m_j + 1) = \lambda_j / \lambda_i \quad (4a)$$

[0110] Man kann damit die Wellenlängen 450, 535 und 621 nm erhalten.

[0111] Unter Berücksichtigung der Dispersion erhält man die Gleichung:

$$(4m_i + 1)/(4m_j + 1) = \lambda_j \Delta n(\lambda_i) / (\lambda_i \Delta n(\lambda_j)) \quad (4b)$$

[0112] Aus den Zusammenhängen der Gleichungen ergibt sich durch Anpassung der Laserwellenlängen λ_i und λ_j und Auswahl der ganzen Zahlen m_i und m_j und gegebenenfalls durch Auswahl eines LC Materials mit einer geeigneten Dispersion der Doppelbrechung für diese Wellenlängen $\Delta n(\lambda_i)$, $\Delta n(\lambda_j)$ die Möglichkeit, wahlweise eine der beiden Gleichungen (2b) oder (4b) zu erfüllen.

[0113] Demzufolge kann entweder die $\lambda/2$ Platte oder die beiden $\lambda/4$ Platten gemäß den Gleichungen (1) oder (3) durch Anpassung der Schichtdicke d dieser Platten für die oben ermittelten Wellenlängen achromatisch gemacht werden.

[0114] Zwar sind solche Elemente höherer Ordnungen generell empfindlicher gegenüber Abweichungen in der Wellenlänge und dem Einfallswinkel des Lichts. Für eine Anwendung als Phasenmodulator in einer Vorrichtung zur holographischen dreidimensionalen Bilddarstellung stört das aber nicht, wenn dort definierte schmalbandige Lichtquellen wie Laser oder spezielle LED verwendet werden. Außerdem erfolgt dann die Beleuchtung des SLM mit nahezu parallelem kohärentem Licht.

[0115] Für die ansteuerbare $\lambda/2$ Platte ist zu berücksichtigen, dass dickere Schichten d Einfluss auf die Schaltzeit und die vorgegebenen Spannungen zum Ansteuern haben können. Die Dicke d der nicht ansteuerbaren $\lambda/4$ Platten kann aber problemlos vergrößert werden.

[0116] Da die Gleichungen (2b) und (4b) unterschiedliche Bedingungen für die gleichen Parameter darstellen, die nicht beide zugleich erfüllt sein können, folgt, dass es keinen Satz von drei Wellenlängen gibt, bei denen für ein einzelnes Material sowohl die $\lambda/4$ -Bedingung (4b) als auch die $\lambda/2$ -Bedingung (2b) erfüllt ist. Da aber ohnehin unterschiedliche LC Materialien für die nicht steuerbaren $\lambda/4$ - und die steuerbare $\lambda/2$ Platte eingesetzt werden, kann man Materialien mit einer Dispersion der Doppelbrechung $\Delta n(\lambda)$ so auswählen, dass sich gemeinsame Wellenlängen ergeben, mit denen dann sowohl $\lambda/4$ Platten als auch $\lambda/2$ Platten als Multi-Order Elemente ausgeführt werden können.

(f) Die in erster Ausführung beschriebene steuerbare Vorrichtung zur Phasenmodulation umfasst zwei $\lambda/4$ Platten und eine $\lambda/2$ Platte. Man kann die optischen Achsen beider $\lambda/4$ Platten entweder parallel oder senkrecht zueinander anordnen. Dies führt mit einer optimalen Schichtdicke d in beiden Fällen der Achsenausrichtung zu einer reinen Phasenmodulation, aber einer veränderten relativen Polarisation am Ausgang des Phasenmodulators. Da sich aber beide Anordnungen bezüglich ihrer Wellenlängenabhängigkeit unterscheiden, wird man als bevorzugte Ausbildung der LC Modulatormatrix die Konfiguration mit den kleineren Abweichungen von der vorgegebenen Phasenmodulation bezüglich der verwendeten Wellenlängen wählen.

ZITATE ENTHALTEN IN DER BESCHREIBUNG

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

Zitierte Patentliteratur

- US 2007/0003709 [\[0006\]](#)

Zitierte Nicht-Patentliteratur

- A. Mochizuki, Journal of the SID 14 (2006) p 529–536 [\[0005\]](#)
- S. Pancharatnam, Proc. Ind Acad. Sci. 41 (1955) p130 ff (Parts I und II) [\[0011\]](#)
- G. Love, R. Bandari, Opt. Commun. 110, (1994), p. 475–478 [\[0012\]](#)

Patentansprüche

1. Steuerbare Vorrichtung zur Phasenmodulation von kohärentem Licht mit einem räumlichen Lichtmodulator, der eine Modulatomatrix mit regulär angeordneten steuerbaren LC Modulatorzellen aufweist, mit mindestens einer Lichtquelle zum Beleuchten der Modulatomatrix und mit einer Steuereinheit, welche die Phasenmodulation in den LC Modulatorzellen zum Realisieren einer dreidimensionalen Bilddarstellung steuert,
 - wobei die steuerbaren LC Modulatorzellen LC Moleküle in Art und Anordnung des PSS-Flüssigkristall-Zelltyps in einer Schicht aufweisen, die mit der Funktionalität einer ansteuerbaren $\lambda/2$ Platte ausgebildet ist, welche zwischen zwei Schichten mit der Funktionalität von nicht ansteuerbaren $\lambda/4$ Platten (**2**; **2'**) angeordnet ist,
 - wobei jede LC Modulatorzelle durch die Steuereinheit individuell lokal mit einem positiven oder negativen Spannungswert abhängig vom positiven oder negativen Vorzeichen eines einzuschreibenden Phasenwertes ansteuerbar ist,
 - wobei die Steuereinheit eingerichtet ist, einen globalen festen Phasen-Versatz für die in die LC Modulatorzellen einzuschreibenden Phasenwerte zu generieren, und
 - wobei das Generieren des globalen festen Phasen-Versatzes in jedem zweiten Bildinhaltsauffrischungsintervall erfolgt.
2. Vorrichtung nach Anspruch 1, bei der das Generieren des globalen Phasen-Versatzes für alle LC Modulatorzellen gleichzeitig erfolgt.
3. Vorrichtung nach Anspruch 1, bei der das Generieren des globalen Phasen-Versatzes als Äquivalent zu einer Bildinvertierung erfolgt.
4. Vorrichtung nach Anspruch 1, bei welcher der Phasenwert des globalen Phasen-Versatzes vom Modulationsbereich der Modulatomatrix abhängig ist.
5. Vorrichtung nach Anspruch 4, bei der für einen Modulationsbereich von 2π der Phasenwert des globalen Phasen-Versatzes π beträgt.
6. Vorrichtung nach Anspruch 1, bei welcher der lokale Phasen-Versatz in den LC Modulatorzellen bei ausgeschaltetem elektrischem Feld durch Einstellung der Molekülachsen der LC Moleküle parallel zu den optischen Achsen der $\lambda/4$ Schichten generierbar ist.
7. Vorrichtung nach Anspruch 1, bei welcher der aus einer vorgegebenen Spannung resultierende Phasenwert bei Umpolung der Spannung mit gleichem Betrag, aber entgegen gesetztem Vorzeichen in einer LC Modulatorzelle realisierbar ist.
8. Vorrichtung nach Anspruch 1, bei der die mindestens eine Lichtquelle zum Bereitstellen von polarisiertem Licht ausgebildet ist.
9. Vorrichtung nach Anspruch 1, bei der die Modulatomatrix mindestens eingangsseitig einen Polarisator aufweist.
10. Vorrichtung nach Anspruch 9 mit mindestens einem Zirkularpolarisator, der die Funktionalität einer $\lambda/4$ Platte und eines Linearpolarisators kombiniert.
11. Vorrichtung nach Anspruch 1, bei der die Modulatomatrix zur Farbdarstellung eine Konfiguration der $\lambda/4$ Platten und/oder der $\lambda/2$ Platte aufweist, mit der eine Phasenmodulation für mindestens drei verschiedene Farben bzw. Wellenlängen durch die Steuereinheit steuerbar ist.
12. Vorrichtung nach Anspruch 11, bei der die $\lambda/2$ Platte zur Phasenmodulation eine Dicke d der LC Schicht aufweist, die für eine mittlere der zur Modulation verwendeten mindestens drei Wellenlängen optimal ausgelegt ist.
13. Vorrichtung nach Anspruch 11, bei der die LC Modulatorzellen eine Mischung solcher LC Materialien aufweisen, deren Dispersion sich mit der Wellenlänge ändert, so dass $\Delta n(\lambda)d \approx \lambda/2$ für die verschiedenen Wellenlängen der mindestens drei Farben gilt.
14. Vorrichtung nach Anspruch 11, bei der die $\lambda/4$ Platten und/oder die $\lambda/2$ Platte für die den verschiedenen Wellenlängen zugeordneten LC Modulatorzellen eine unterschiedliche Ausbildung hinsichtlich ihrer Schichtdi-

cke d und/oder ihrer Ausrichtung der optischen Achsen aufweisen.

15. Vorrichtung nach Anspruch 11, bei der die nicht steuerbaren $\lambda/4$ Platten als achromatische Elemente ausgebildet sind.

16. Vorrichtung nach Anspruch 11, wobei die nicht steuerbaren $\lambda/4$ Platten und/oder die $\lambda/2$ Platte als Multi-Order Elemente derart ausgebildet sind, dass es einen Satz von Wellenlängen λ_i und einen Satz von ganzen Zahlen m_i gibt, durch welche für die $\lambda/2$ Platte die Gleichung

$$\Delta n(\lambda_i) d = (2m_i + 1)\lambda_i/2$$

und/oder für die $\lambda/4$ Platte die Gleichung

$$\Delta n(\lambda_i)d = (4m_i + 3)\lambda_i/2$$

für alle $i = 1, 2, 3...$ mindestens näherungsweise erfüllt sind.

Es folgen 4 Blatt Zeichnungen

Anhängende Zeichnungen

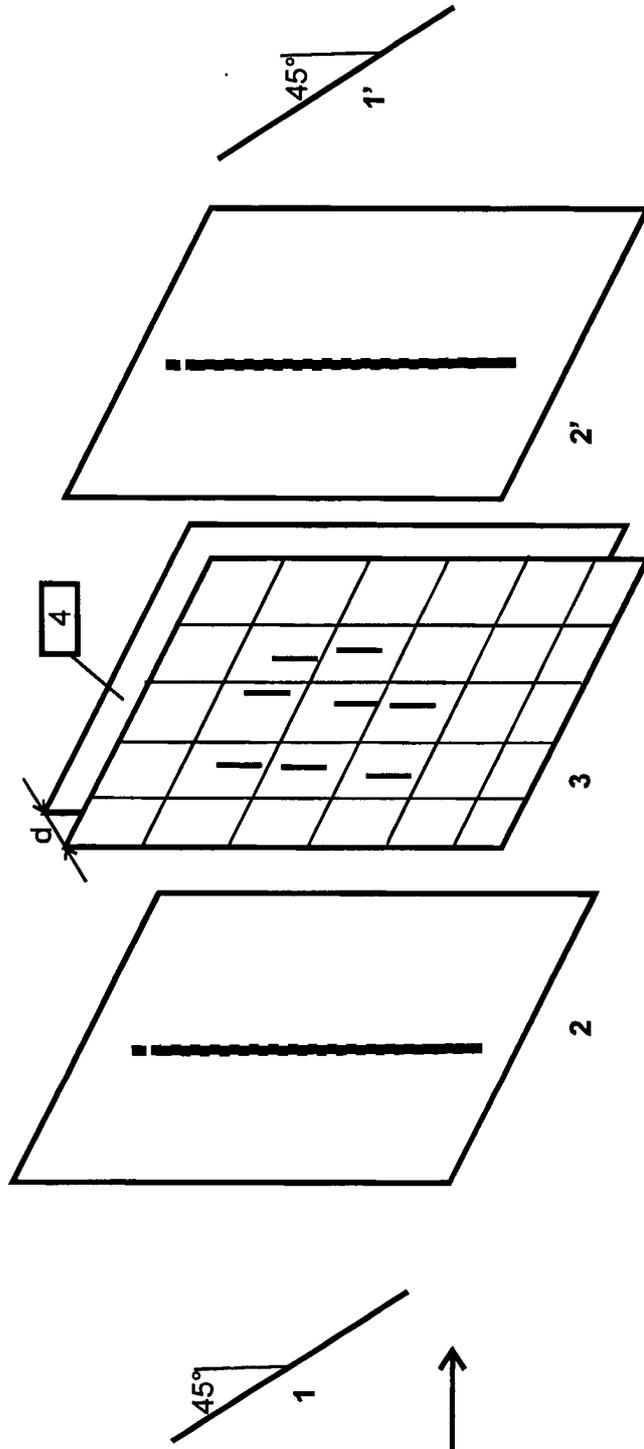


Fig. 1

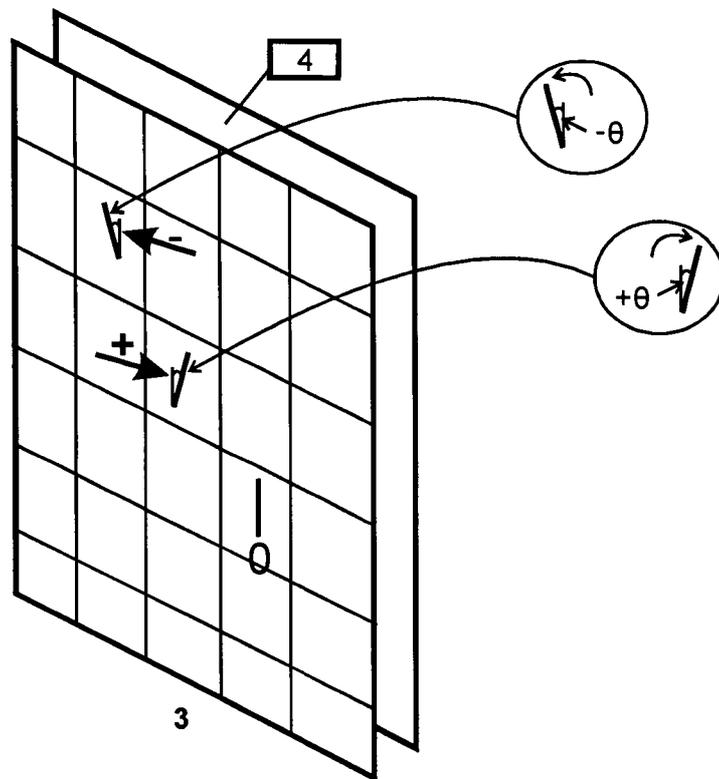


Fig. 2

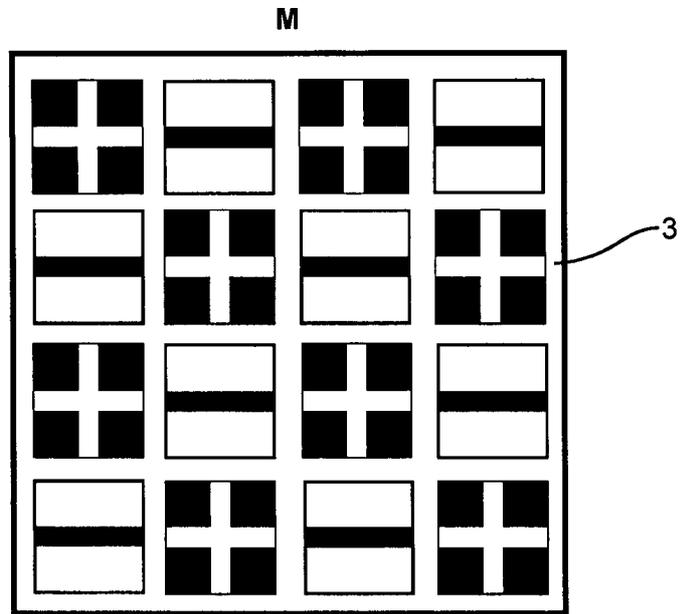


Fig. 3a

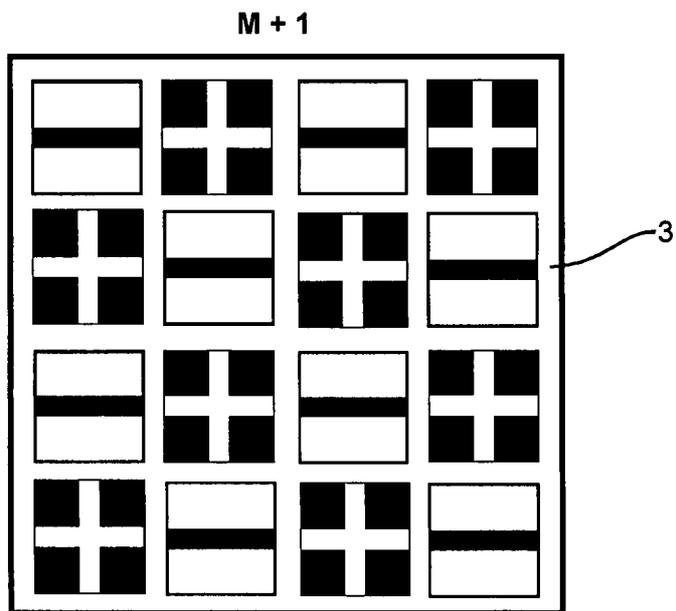


Fig. 3b

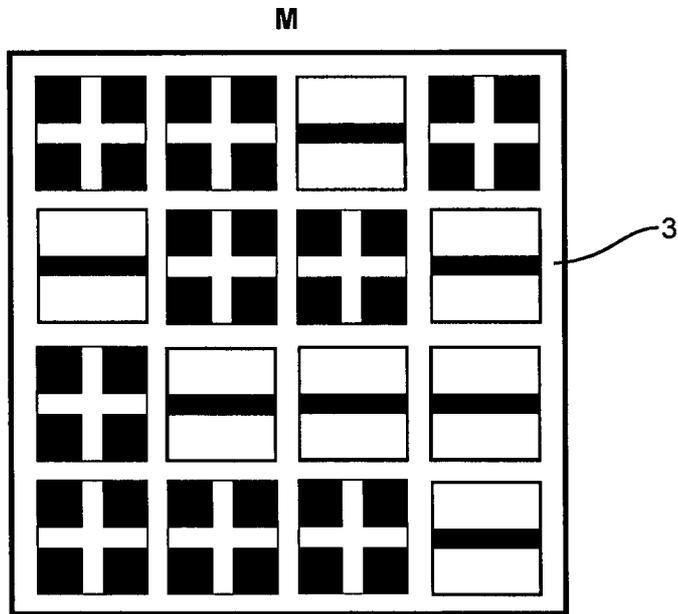


Fig. 4a

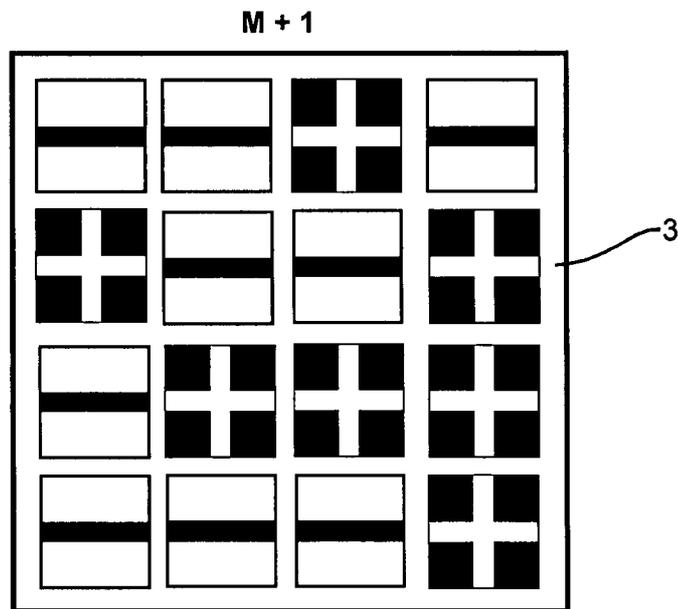


Fig. 4b