



(10) **DE 10 2012 105 487 A1** 2014.01.23

(12)

Offenlegungsschrift

(21) Aktenzeichen: **10 2012 105 487.8**

(22) Anmeldetag: **22.06.2012**

(43) Offenlegungstag: **23.01.2014**

(51) Int Cl.: **G02F 1/01 (2012.01)**

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

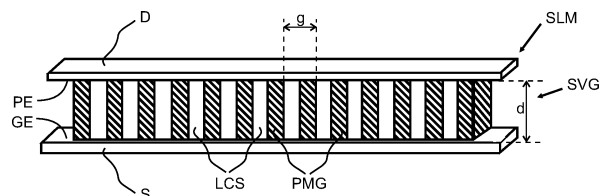
(74) Vertreter:
derzeit kein Vertreter bestellt

(72) Erfinder:
Leister, Norbert, Dr., 01279, Dresden, DE; Fütterer, Gerald, Dr., 01309, Dresden, DE

Die folgenden Angaben sind den vom Anmelder eingereichten Unterlagen entnommen

(54) Bezeichnung: **Lichtmodulator mit einem schaltbaren Volumengitter**

(57) Zusammenfassung: Räumlicher Lichtmodulator zum Modulieren von Licht mindestens einer Lichtquelle, welches mit dem räumlichen Lichtmodulator wechselwirkt, wobei der räumliche Lichtmodulator (SLM) in Form einer periodischen Struktur von im Wesentlichen in gleichen Abständen angeordneten Polymergitterschichten (PMG) und mit einem aktiven optischen Medium angefüllten Zwischenräumen (LCS) der Polymergitterschichten (PMG) zu einer periodischen Gitterstruktur (SVG) ausgebildet ist, wobei die die periodische Gitterstruktur (SVG) begrenzenden Oberflächen mit Elektroden (PE, GE) versehen sind, mit welchen der Brechungsindex des aktiven optischen Mediums durch ein elektrisches Feld beeinflussbar ist, wobei die Elektroden (PE) eine pixelierte Anordnung in einem regelmäßigen Muster aufweisen und mit einer elektrischen Spannung (V) unabhängig voneinander ansteuerbar sind und wobei die Ausrichtung der Polymergitterschichten (PMG), die Schichtdicke (d) und die Gitterperiode (g) der periodischen Gitterstruktur (SVG) so ausgelegt sind, dass sie für das Licht (EL) mindestens einer Lichtquelle nicht der Bragg-Bedingung entsprechen, so dass für das auf den räumlichen Lichtmodulator (SLM) einfallende Licht (EL) der mindestens einen Lichtquelle der Anteil des aufgrund von Bragg-Beugung abgelenkten Lichts (GL) um einen vorgebbaren Wert geringer als der Anteil des unabgelenkt durchgelassenen Lichtes (DL) ist und die Anteile des abgelenkten (GL) bzw. unabgelenkt durchgelassenen Lichtes (DL) bei einer Änderung der Ansteuerspannung (V) im Wesentlichen unverändert bleiben.



Beschreibung

[0001] Für holografische Displays wie auch für andere Anwendungen werden schnelle Phasen- oder auch schnelle Amplitudenmodulatoren benötigt. Bekannt ist für LC (Liquid Crystal) basierte Modulatoren in vielen LC Moden ein Zusammenhang zwischen der Dicke der LC Schicht und der Schaltzeit des Modulators. Näherungsweise verlangsamt sich das Schalten des Modulators quadratisch mit zunehmender Dicke der LC Schicht. Das ist dadurch begründet, dass in der Regel die LC Moleküle schneller in Kontakt zu einer Oberfläche als in einem Abstand von dieser auf eine Änderung des elektrischen Feldes reagieren. Andererseits wird aber zum Erreichen eines vorgegebenen Maximalwertes der Amplituden- oder Phasenmodulation ein bestimmtes Produkt aus LC-Schichtdicke und Doppelbrechung benötigt. Daher kann der Parameter Schichtdicke – etwa durch Auswahl eines LC Materials mit hoher Doppelbrechung – nur in engen Grenzen variiert werden. Die Schichtdicke kann also nicht beliebig verkleinert werden, wenn die Schaltzeit des Modulators verringert werden soll.

[0002] Zum Erreichen schneller Schaltzeiten bei nicht pixelierten Shuttern auf LC Basis gibt es zum Beispiel Anwendungen, bei der eine für die Modulation benötigte LC-Schichtdicke auf mehrere Einzelschichten aufgeteilt wird mit zwischen den Einzelschichten angeordneten Glassubstraten. Bekannt ist beispielsweise ein schneller Shutter als Sandwich aus 3 LC-Schichten von jeweils 1.5 µm Dicke, eingebettet in Glassubstrate. Dieser Shutter erreicht die gleiche optische Funktion wie eine einzelne 4.5 µm dicke LC-Schicht, weist aber deutlich geringere Schaltzeiten auf als diese Einzelschicht. Auf einen pixelierten Lichtmodulator mit Pixeln, deren Abmessungen klein sind im Vergleich zur Dicke der Glassubstrate, wäre dieser Sandwich-Ansatz jedoch so nicht übertragbar. Durch die Glassubstrate treten dann unerwünschte Beugungseffekte bei der Lichtausbreitung zwischen den einzelnen LC-Schichten auf, was ein Übersprechen zwischen den einzelnen Pixeln bedeuten würde. Beispielsweise beträgt ein typischer Pixelpitch in einem Lichtmodulator für ein holografisches Display um die 30 Mikrometer, die typische Dicke eines Glassubstrates, wie es in der Displayindustrie eingesetzt wird, beträgt 700 Mikrometer.

[0003] Bekannt sind auch polymerstabilisierte LC-Strukturen (PDLC: Polymer Dispersed LC-Strukturen), bei denen ein Polymernetzwerk eine bestimmte Orientierung der LC-Moleküle stabilisiert, was sich ebenfalls positiv auf die Geschwindigkeit eines Schaltvorgangs auswirken kann. In der Regel führt eine solche Vernetzung aber zu Problemen in Bezug auf Streuung beim Lichtdurchgang.

[0004] Bekannt sind andererseits schaltbare Volumengitter, die eine Gitterstruktur aus einem regel-

mäßigen Polymernetzwerk und dazwischenliegenden LC-Schichten aufweisen. Eine derartige Anordnung wird z.B. in der Veröffentlichung von Caputo u.a., „POLICRIPS switchable holographic grating: A promising grating electro-optical pixel for high resolution display application“, Journal of Display Technology, Vol. 2, No. 1, March 2006, p. 38 ff, beschrieben. Eine andere derartige Anordnung wird in der Veröffentlichung von Sakhno u.a. „POLIPHEN – new type of nanoscale polymer-LC switchable photonic devices“, Proc SPIE Vol 5521, p. 38 ff, 2004, beschrieben.

[0005] In beiden Veröffentlichungen wird eine Art schaltbares Bragg Gitter beschrieben, das zur Lichtablenkung eingesetzt wird und je nach Schaltzustand einen kleineren oder größeren Anteil von einfallendem Licht entweder ablenkt oder unabgelenkt durchläßt. Es wird auch beschrieben, dass dieses Gitter pixeliert geschaltet werden kann. Damit würde also auch lokal je nach Schaltzustand des Pixels das einfallende Licht entweder abgelenkt oder unabgelenkt durchgelassen. Die Anordnung entspricht dann einem pixeliert angesteuerten Bragg-Gitter.

[0006] Die Bragg Bedingung ist gegeben durch

$$n \cdot \lambda = 2 \cdot d \cdot \sin(\theta),$$

mit

- n – Nummer der Beugungsordnung,
- λ – Lichtwellenlänge,
- d – Abstand zwischen den Gitterebenen,
- θ – Winkel zwischen dem einfallenden Lichtstrahl und den Gitterebenen.

[0007] Beispielsweise wäre eine solche pixelierte Anordnung verwendbar als räumlicher Amplitudenmodulator, wenn z.B. das abgelenkte Licht herausgefiltert wird und nur das nicht abgelenkte Licht weitergeleitet würde oder umgekehrt. Eine Anwendung einer solchen pixelierten Anordnung als räumlicher Phasenmodulator, wo also auf Pixelebene die Phase des mit der Anordnung wechselwirkenden Lichts verändert werden kann, wäre in dieser Form aber nicht möglich. Außerdem unterliegt eine solche Anordnung Einschränkungen, die sich durch die bekannten Eigenschaften von Bragg Gittern ergeben, nämlich einer bestimmten Winkel- und Wellenlängenselektivität. Bragg Gitter weisen zwar eine hohe Beugungseffizienz nahe 100 Prozent in einer einzelnen Beugungsordnung auf. Diese Effizienz haben sie aber nur für einen kleinen Winkelbereich des einfallenden Lichtes und nur für einen kleinen Wellenlängenbereich. Daher ist beispielsweise zu erwarten, dass ein solches schaltbares Bragg Gitter nicht ohne weiteres für rotes, grünes und blaues Licht gleichermaßen mit hoher Effizienz nahe 100 Prozent betrieben werden kann.

[0008] Aufgabe der vorliegenden Erfindung ist es deshalb, einen räumlichen Lichtmodulator anzugeben, mit welchem im Bereich des jeweils aktivierten Pixels die Phase des einfallenden Lichts entsprechend der angelegten Spannung modulierbar ist. Dabei soll die erhöhte Schaltgeschwindigkeit gegenüber Lichtmodulatoren ohne eine derartige Gitterstruktur beibehalten und eine Wellenlängenselektivität weitgehend unterdrückt werden.

[0009] Diese Aufgabe wird erfindungsgemäß mit den Mitteln des Anspruchs 1 gelöst. Weitere vorteilhafte Ausgestaltungen und Weiterbildungen der Erfindung gehen aus den Unteransprüchen hervor.

[0010] Der erfindungsgemäße räumliche Lichtmodulator dient zum Modulieren von Licht mindestens einer Lichtquelle, welches mit dem räumlichen Lichtmodulator wechselwirkt, wobei der räumliche Lichtmodulator (in Analogie zu einem schaltbaren Volumengitter) in Form einer periodischen Struktur von im Wesentlichen in gleichen Abständen angeordneten Polymergitterschichten und mit einem aktiven optischen Medium angefüllten Zwischenräumen der Polymergitterschichten ausgebildet ist, wobei die die periodische Gitterstruktur begrenzenden Oberflächen mit Elektroden versehen sind, die es erlauben, den Brechungsindex des aktiven optischen Mediums durch ein elektrisches Feld zu beeinflussen, wobei die Elektroden eine pixelierte Anordnung in einem regelmäßigen Muster aufweisen und unabhängig voneinander mit einer elektrischen Spannung ansteuerbar sind und wobei die Ausrichtung der Polymergitterschichten, die Schichtdicke und die Gitterperiode so ausgelegt sind, dass sie für das Licht der mindestens einen Lichtquelle nicht der Bragg-Bedingung entsprechen, so dass für das auf den räumlichen Lichtmodulator einfallende Licht der mindestens einen Lichtquelle der Anteil des aufgrund von Bragg-Beugung abgelenkten Lichts um einen vorgebbaren Wert geringer als der Anteil des unabgelenkt durchtretenden Lichtes ist und die Anteile des abgelenkten bzw. unabgelenkt durchtretenden Lichtes bei Änderung der Ansteuerspannung im Wesentlichen unverändert bleiben.

[0011] Der Einfallswinkel des Lichts von der Lichtquelle bezüglich der Oberfläche der periodischen Gitterstruktur ist dabei derart gewählt, dass er nicht dem Bragg-Winkel der periodischen Gitterstruktur entspricht, so dass das Licht der mindestens einen Lichtquelle nahezu vollständig unabgelenkt durch den räumlichen Lichtmodulator hindurchtritt, um im Bereich der jeweils angesteuerten Pixel das Licht lediglich in seiner Phase zu beeinflussen.

[0012] Durch die regelmäßig angeordneten Polymergitterschichten der periodischen Gitterstruktur wird eine Schichtstruktur des räumlichen Lichtmodulators realisiert, die im Vergleich zu Lichtmodulato-

ren mit einer einzigen aktiven Schicht eine geringere Schaltzeit aufweist. Das ist dadurch begründet, dass die Schaltzeit eines Lichtmodulators auf LC-Basis mit dem Quadrat der Dicke der aktiven LC-Schicht ansteigt. Deshalb ist es nahe liegend, die aktive Schicht in mehrere Teilschichten zu unterteilen. Eine Unterteilung durch Glassubstrate als Trennschichten führt jedoch zu unerwünschten Beugungseffekten an den Trennschichten, die z.B. im Falle eines Phasenmodulators für ein holografisches Display nicht toleriert werden können.

[0013] Im Vergleich zu Lichtmodulatoren mit mehreren aktiven Schichten, die durch Glassubstrate getrennt sind, werden durch die vorliegende Erfindung unerwünschte Beugungseffekte zwischen den einzelnen Schichten und damit ein Übersprechen zwischen benachbarten Pixeln vermieden.

[0014] Vorteilhaft können für die Herstellung einer solchen periodischen Gitterstruktur bekannte Verfahren der Herstellung schaltbarer Volumengitter angewendet werden, wie sie beispielsweise in den schon genannten Veröffentlichungen von Caputo u.a. oder Sakhno u.a. beschrieben werden. Ein Gitter wird dort optisch durch Interferenz zweier Laserstrahlen in einem Aufzeichnungsmedium aufgenommen. Die Gitterperiode kann zum Beispiel angepasst werden, indem der Winkel zwischen beiden interferierenden Laserstrahlen geändert wird. Die Ausrichtung der Gitterebenen im Aufzeichnungsmedium kann angepasst werden, indem bei der Belichtung der Winkel des Aufzeichnungsmediums zu beiden Laserstrahlen verändert wird.

[0015] Die Schichtdicke der Gitterstruktur kann ebenfalls angepasst werden an die Erfordernisse eines Lichtmodulators für Phase oder Amplitude, zum Beispiel durch Verwendung von Spacern passender Größe.

[0016] Die Gitterebenen der periodischen Gitterstruktur können dabei durch geeignete Ausrichtung des Aufzeichnungsmediums und der Laser beispielsweise wahlweise senkrecht oder parallel (oder im allgemeinen Fall auch geneigt) zur Oberfläche des Aufzeichnungsmediums angeordnet sein.

[0017] In Verbindung mit mindestens einem vor und/oder nach der Modulatorschicht angeordneten Polarisator ist dann je nach Anwendungszweck eine Amplitudenmodulation oder eine Phasenmodulation des einfallenden Lichts realisierbar.

[0018] Der Lichtmodulator kann auch zum Modulieren von Licht mehrerer Lichtquellen unterschiedlicher Wellenlängen dienen, zum Beispiel mindestens einer roten, einer grünen und einer blauen Lichtquelle. In diesem Fall werden Periode und Neigungswinkel der periodischen Gitterstruktur so gewählt, dass sie

für den Einfallswinkel keiner der drei Lichtquellen der Bragg Bedingung entsprechen, so dass das Licht der mindestens drei Lichtquellen nahezu vollständig unabgelenkt durch den Lichtmodulator hindurchtritt, um in Abhängigkeit der jeweils angesteuerten Pixel das Licht in seiner Phase zu beeinflussen. Insbesondere lässt sich dies gut erreichen, wenn schmalbandige LED- oder Laserlichtquellen eingesetzt werden, wie das zum Beispiel bei einem holografischen Display der Fall ist.

[0019] Vorteilhaft sind die Gitterebenen der periodischen Gitterstruktur senkrecht zur Oberfläche des Lichtmodulators angeordnet, und die Gitterperiode ist kleiner als die Wellenlängen der Lichtquellen gewählt. Die Wände und die Zwischenräume der Polymergitterschichten der periodischen Gitterstruktur können dabei unterschiedliche Breiten aufweisen.

[0020] In dem erfindungsgemäßen Lichtmodulator können anstelle der üblichen Elektroden auf ITO-Basis (ITO: Indium Tin Oxide) auch Elektroden auf WGP-Basis (WGP: Wire Grid Polarisator – Drahtgitterpolarisator) verwendet werden, die neben der Funktion als Elektrode auch als Polarisator bzw. Analysator für polarisiertes Licht wirken. Das hat den Vorteil, dass bei einem Einsatz des erfindungsgemäßen Lichtmodulators als Amplitudenmodulator keine gesonderten Polarisatoren erforderlich sind. Weitere Einzelheiten hierzu sind in der Figurenbeschreibung zur **Fig. 7** angegeben. Insoweit kann nicht nur der erfindungsgemäße Lichtmodulator mit Elektroden auf WGP-Basis ausgestattet sein, sondern es kann grundsätzlich jedwede Art von Lichtmodulator mit Elektroden auf WGP-Basis ausgestattet sein.

[0021] Ganz allgemein können WGP-Elektroden auch bei Lichtmodulatoren als Elektroden eingesetzt werden, die nicht gemäß dem erfindungsgemäßen Lichtmodulator ausgebildet sind.

[0022] Derzeitige Displays mit Bilddiagonalen über 8 Zoll weisen Elektrodenstrukturen mit Strukturbreiten von $\geq 1 \mu\text{m}$ auf. Diese Strukturbreiten lassen sich noch mit Kontaktkopie herstellen. Dabei werden, soweit bekannt, ausschließlich Amplitudengitter eingesetzt. Bei einer derzeit verwendeten UV-Belichtungs-Wellenlänge von beispielsweise $\lambda_{\text{exp.}} = 365 \text{ nm}$ (i-Linie) ist damit die Auflösungsgrenze erreicht. Die minimale Strukturbreite wird als CD (engl.: critical dimension) bezeichnet. Bei der Anwendung des erfindungsgemäßen Lichtmodulators für holografische Displays und synthetischen, d.h. eingeschriebenen Perioden $\Lambda_{\text{synth.}} \geq 1 \mu\text{m}$ wird eine Periode der Elektroden von $\Lambda_E = 0.5 \mu\text{m}$ benötigt. Bei einem Tastverhältnis von $TV = 0,5$ entspricht dies einer Breite der Elektroden von $0,25 \mu\text{m}$. Dies liegt deutlich unter der Auflösungsgrenze des derzeit bei Displayherstellern verwendeten Verfahrens der Kontaktkopie.

[0023] Eine Lösung dieses Problems besteht beispielsweise darin, die kleinen Elektrodenstrukturen mit deutlich kleineren Lichtwellenlängen herzustellen, als dies derzeit der Fall ist. Beispielsweise kann Licht einer Wellenlänge von 193 nm und zusätzlich eine Immersionsflüssigkeit bei der Belichtung der Elektrodenstrukturen verwendet werden.

[0024] Eine weitere Lösungsmöglichkeit besteht darin, die Elektroden-Strukturen der Displays und auch des erfindungsgemäßen Lichtmodulators mittels Phase Shift Masken und Kontaktkopie herzustellen, wie es beispielsweise von verkleinert abbildenden Lithographiesystemen bekannt ist.

[0025] Weitere Einzelheiten hierzu sind in der Figurenbeschreibung zu den **Fig. 11** und **Fig. 12** angegeben. Insoweit können Elektrodenstrukturen nicht lediglich des erfindungsgemäßen Lichtmodulators mit einer solchen Maskenbelichtung hergestellt werden, sondern es können grundsätzlich Elektrodenstrukturen oder andere Strukturen für jedwede Art von Lichtmodulatoren mit Hilfe einer solchen Maskenbelichtung hergestellt werden.

[0026] Es gibt nun verschiedene Möglichkeiten, die Lehre der vorliegenden Erfindung in vorteilhafter Weise auszugestalten und weiterzubilden. Dazu ist einerseits auf die dem Patentanspruch 1 nachgeordneten Patentansprüche und andererseits auf die nachfolgende Erläuterung der bevorzugten Ausführungsbeispiele der Erfindung anhand der Zeichnung zu verweisen. In Verbindung mit der Erläuterung der bevorzugten Ausführungsbeispiele der Erfindung anhand der Zeichnung werden auch im Allgemeinen bevorzugte Ausgestaltungen und Weiterbildungen der Lehre erläutert.

[0027] In der Zeichnung zeigen jeweils in einer schematischen Darstellung:

[0028] **Fig. 1** einen experimentellen Aufbau zur Aufzeichnung von schaltbaren Volumengittern nach dem Stand der Technik,

[0029] **Fig. 2** die periodische Gitterstruktur der aktiven Schicht einer ersten Ausgestaltung des erfindungsgemäßen Lichtmodulators,

[0030] **Fig. 3a** und **b** die Reorientierung der LC-Moleküle in den Zwischenräumen des Polymergitters in Abhängigkeit vom elektrischen Feld, wobei

[0031] **Fig. 3a** eine periodische Gitterstruktur nach dem Stand der Technik als schaltbares Volumengitter,

[0032] **Fig. 3b** eine erfindungsgemäße periodische Gitterstruktur mit angepassten für Schichtdicke, Bre-

chungsindexmodulation und Periode der Wände des Polymergitters,

[0033] Fig. 4a in einer Diagrammdarstellung ein Beispiel für die Abhängigkeit der Intensität des durch das schaltbare Volumengitter abgelenkten und nicht abgelenkten Lichtanteils von der angelegten Spannung bei einem schaltbaren Volumengitter nach dem Stand der Technik,

[0034] Fig. 4b in einer Diagrammdarstellung im Vergleich dazu ein Beispiel für die ungebeugt durchgelassene und die gebeugte Lichtintensität in Abhängigkeit von der angelegten Spannung für einen erfindungsgemäßen Lichtmodulator,

[0035] Fig. 5 in einer Diagrammdarstellung den zeitlichen Reaktionsverlauf eines schaltbaren Volumengitters nach dem Stand der Technik bei einer Änderung des elektrischen Feldes,

[0036] Fig. 6 den Aufbau der aktiven Schicht einer zweiten Ausgestaltung des erfindungsgemäßen Lichtmodulators,

[0037] Fig. 7 die Verwendung von WGP als Elektroden in einem erfindungsgemäßen Lichtmodulator,

[0038] Fig. 8 die Verwendung von WGP mit strukturierten in plane Elektroden E11–12, E21–22 und E31–32 und in Form einer ebenfalls kammförmig ausgeführten in plane Gegenelektrode E01–02,

[0039] Fig. 9 eine leicht verkippte kammförmige Gegenelektrode, um für Modulatoren mit in plane LC eine schnelle Ausschaltzeit t_{off} zu realisieren,

[0040] Fig. 10 die Verwendung von WGP-Segmenten über zwei primären in plane Elektroden im Bereich eines Pixels,

[0041] Fig. 11 den Intensitätsverlauf $I(x, z)$ bei der Kontaktkopie einer Gitterstruktur hinter einer reinen Amplitudenmaske AM und hinter einer Phase Shift Maske PSM im Vergleich,

[0042] Fig. 12 den Intensitätsverlauf des Belichtungslichts für eine Gitterstruktur hinter einer Phase Shift Maske für die Belichtungswellenlänge 365 nm,

[0043] Fig. 13 einen Barker Kode der Länge 11 (erster von oben) und aus diesem durch Invertierung und Spiegelung erzeugte Codes,

[0044] Fig. 14 einen Barker Kode der Länge 11 (links oben, Zählung von innen nach außen) und aus diesem durch Invertierung und Spiegelung erzeugte Codes als axialsymmetrische 2D-Verteilung. Die linken Verteilungen sind zu den rechten Verteilungen invertierte

Verteilungen und bilden mit diesen bei der Justage eine Paarung,

[0045] Fig. 15 einen Barker Kode der Länge 11 (links oben, Zählung gegen den Uhrzeigersinn bei 0° beginnend) und aus diesem durch Invertierung und Spiegelung erzeugte Codes als radialsymmetrische 2D-Verteilung. Die linken Verteilungen sind zu den rechten Verteilungen invertierte Verteilungen und bilden mit diesen bei der Justage eine Paarung und

[0046] Fig. 16 die Kombination eines elfstelligen Barker Codes mit zwei vierstelligen Barker Codes.

[0047] In den Fig. sind dieselben oder ähnliche Bauteile mit denselben Bezugszeichen gekennzeichnet.

[0048] Fig. 1 zeigt nach dem Stand der Technik einen experimentellen Aufbau zur Aufzeichnung von schaltbaren Volumengittern in einem Aufzeichnungsmedium. Vorteilhaft kann ein solcher Aufbau auch eingesetzt werden, um den erfindungsgemäßen Lichtmodulator herzustellen. Ein durch einen Strahl aufweiter BE und eine Kombination aus Halbwellenplatte und Polarisator PP geformter und polarisierter Strahl eines Argon-Lasers 1 wird mittels eines Strahlteilers BS in zwei Teilstrahlen aufgespalten. Beide Teilstrahlen treffen unter einem Winkel θ , der durch die beiden Spiegel M1 und M2 eingestellt werden kann, auf ein zu belichtendes Aufzeichnungsmedium AZM. In diesem Aufzeichnungsmedium erzeugen sie eine periodische Gitterstruktur SVG. Die Gitterperiode hängt vom Winkel θ der Strahlen ab, unter dem sie auf das Aufzeichnungsmedium AZM auftreffen. Die so erzeugte periodische Gitterstruktur SVG bildet die Polymerwände eines Polymergitters aus, wenn es sich bei dem Aufzeichnungsmedium AZM beispielsweise um ein polymerisierbares Material handelt. Durch eine Neigung des Aufzeichnungsmediums AZM relativ zu beiden Laserstrahlen sind auch gegen die Oberfläche des Aufzeichnungsmediums AZM geneigte Wände der Polymergitterschichten PMG herstellbar.

[0049] Wie in Fig. 2 dargestellt, umfasst die aktive Schicht des erfindungsgemäßen Lichtmodulators SLM wie bei einem schaltbaren Volumengitter entsprechend dem Stand der Technik eine periodische Gitterstruktur SVG von im Wesentlichen in gleichen Abständen angeordneten Polymergitterschichten PMG, wobei die Zwischenräume der Polymergitterschichten PMG mit einem aktiven optischen Medium, das z.B. aus Flüssigkristallen (LC-liquid crystal) besteht, angefüllt sind und eine Struktur von LC-Schichten LCS bilden, wobei die an die periodische Gitterstruktur SVG angrenzenden Oberflächen des Substrates S bzw. des Deckglases D mit Elektroden GE, PE (nicht dargestellt) versehen sind, die es erlauben, das aktive optische Medium über ein elektrisches Feld zu beeinflussen und somit den Bre-

chungsindex des aktiven optischen Mediums zu variieren.

[0050] Erfindungsgemäß weisen die Elektroden PE eine pixelierte Anordnung in einem regelmäßigen Muster auf und sind unabhängig voneinander mit einer elektrischen Spannung V ansteuerbar.

[0051] Die Ausrichtung der Polymergitterschichten PMG, die Schichtdicke d und die Gitterperiode g sind erfindungsgemäß so ausgelegt, dass sie für das von mindestens einer Lichtquelle ausgehende Licht nicht der Bragg-Bedingung entsprechen, so dass der Anteil des aufgrund von Bragg-Beugung abgelenkten Lichts geringer als ein vorgegebbarer Wert des auf die periodische Gitterstruktur SVG des schaltbaren Volumengitters einfallenden Lichts der mindestens einen Lichtquelle ist.

[0052] Üblicherweise werden solche Strukturen zur Ablenkung von Licht eingesetzt, wobei eine Bragg-Bedingung für den Einfallswinkel des Lichts für eine maximale Beugungseffektivität erfüllt sein muss. Für den Einsatz als Bragg-Gitter zur Lichtablenkung werden schnelle Schaltzeiten erreicht. Genannt werden zum Beispiel Ausschaltzeiten kleiner als 250 Mikrosekunden und Anschaltzeiten von 1 bis 3 Millisekunden.

[0053] Die geringen Schaltzeiten ergeben sich daraus, dass die LC-Moleküle des aktiven Mediums sich unter dem Einfluss eines elektrischen Feldes in der Nähe von Grenzschichten – hier durch die Polymergitterschichten PMG gebildet – schneller Umorientieren als in einem Abstand von diesen.

[0054] Die Reorientierung der LC-Moleküle in den Zwischenräumen des Polymergitters in Abhängigkeit vom elektrischen Feld ist in **Fig. 3a** und **Fig. 3b** dargestellt und resultiert in dieser Anordnung generell in einer geringeren Schaltzeit.

[0055] Eine solche Anordnung gem. **Fig. 3a** dient nach dem Stand der Technik als schaltbares Volumengitter mit einer periodischen Gitterstruktur SVG. Dabei trifft das einfallende Licht EL schräg auf die Gitterebenen der periodischen Gitterstruktur SVG auf. In Abhängigkeit von der an den flächenhaft ausgebildeten Elektroden GE, PE anliegenden Spannung V wird unterschiedlich viel Licht durchgelassen (DL) oder durch Beugung abgelenkt (GL). Ist die Bragg-Bedingung für Schichtdicke, Brechungsindexmodulation und Einfallswinkel des Lichtes EL erfüllt, kann (hier oben gezeigt) nahezu 100 % des einfallenden Lichtes EL in eine Beugungsordnung GL abgelenkt werden. Bei maximaler Spannung V wird dagegen nahezu 100 % des Lichtes ungebeugt durchgelassen (DL-hier unten gezeigt). Bei einer mittleren Spannung V kann Licht teilweise abgelenkt und teilweise durchgelassen werden (hier in der Mitte gezeigt). Ty-

pischerweise haben die periodischen Gitterstrukturen des schaltbaren Volumengitters SVG einen Pitch g um 1 Mikrometer und eine Dicke d um 10 Mikrometer.

[0056] **Fig. 3b** zeigt eine erfindungsgemäße Anordnung mit einer periodischen Gitterstruktur SVG, die auf die gleiche Weise herstellbar ist, aber mit geänderter Einfallswinkel des Lichtes EL, das hier senkrecht auf die Oberfläche der Polymergitterschichten PMG auftrifft, und gegebenenfalls auch mit entsprechend der Verwendung als Lichtmodulator angepassten Parametern für Schichtdicke d , Brechungsindexmodulation und Periode g der periodischen Gitterstruktur SVG.

[0057] Für einen herkömmlichen phasenmodulierenden Lichtmodulator werden zum Beispiel je nach verwendetem LC Material typischerweise minimale Schichtdicken d von 3 bis 6 Mikrometer benötigt. Da allerdings üblicherweise eine Phasenmodulation von mindestens 2π erreicht werden soll und es für die Funktionsweise des Lichtmodulators nicht nachteilig ist, wenn der Modulationsbereich größer als 2π ist, kann die Dicke d der LC Schicht auch größer gewählt werden. Beispielsweise wäre es möglich, die typische Dicke d der periodischen Gitterstruktur SVG von 10 Mikrometer und eine typische Gitterperiode g von 1 Mikrometer für den erfindungsgemäßen phasenmodulierenden Lichtmodulator SLM zu wählen.

[0058] Es liegt somit auch für den erfindungsgemäßen phasenmodulierenden Lichtmodulator SLM weiterhin eine periodische Gitterstruktur SVG aus LC Schichten und Polymergitterschichten PMG vor, die sich je nach Ansteuerzustand der LC Schicht im Brechungsindex unterscheiden können.

[0059] Aufgrund der periodischen Struktur der Polymergitterschichten PMG können allerdings auch in diesem Fall höhere Beugungsordnungen auftreten (GL-gestrichelt dargestellt). Die Intensität in diesen Beugungsordnungen wird jedoch unter geeigneten Bedingungen durch die Orientierung der LC-Moleküle nur geringfügig geändert.

[0060] Ein Phasengitter vorgegebbarer Dicke d mit Phasenstufen 0 und π hätte zum Beispiel für eine Dicke d von 10 Mikrometern und eine Gitterperiode von 1 Mikrometer für senkrecht zur Oberfläche einfallendes Licht EL eine Beugungseffizienz in den ersten Ordnungen GL von ungefähr 0,5 Prozent und in der nullten Ordnung DL eine Effizienz von ca. 99 Prozent. Auch bei größeren Phasenstufen, beispielsweise 0 und 3π , beträgt die Effizienz in der nullten Ordnung DL noch ungefähr 90 Prozent.

[0061] Weitere geeignete Bedingungen für eine möglichst geringe Intensität in den Beugungsordnungen GL sind zum Beispiel sehr kleine Gitterperioden g der Polymergitterschichten PMG unterhalb der Wel-

lenlänge des verwendeten Lichts, so dass effektiv nur der mittlere Brechungsindex aus LC-Schichten LCS und Polymergitterschichten PMG wirkt, oder auch ein Füllfaktor, bei dem Polymergitterschichten PMG und LC-Schichten LCS unterschiedlich breit sind. Letzteres kann durch die Laserleistung bei der Belichtung der Polymergitterschichten PMG im Aufzeichnungsmedium AZM beeinflusst werden, z.B. bei dem in Fig. 1 gezeigten experimentellen Aufbau.

[0062] Für das nicht abgelenkte, d.h. gerade durchgehende Licht DL geeigneter Polarisierung wird durch die unter Spannungseinfluss geänderte Orientierung der LC Moleküle der optische Weg geändert. Dadurch wirkt die periodische Gitterstruktur SVG des schaltbaren Volumengitters erfindungsgemäß als Phasenmodulator für das gerade hindurchgehende Licht DL.

[0063] Dabei ist zu beachten, dass sich die Änderung des optischen Weges im ungebeugt durchgehenden Licht DL in der nullten Ordnung bei dicken Gittern (auch bei Gitterperioden von beispielsweise 1 Mikrometer, also nicht nur bei Gitterperioden unterhalb der Wellenlänge des Lichts) durch eine Mittelung des Brechungsindex über die Wände der Polymergitterschichten PMG mit festem Brechungsindex und die angesteuerten Bereiche der LC Schichten LCS mit einem durch die Ansteuerspannung V geänderten effektiven Brechungsindex ergibt.

[0064] Entsprechend der angelegten Spannung V hat die Phasenverzögerung des gerade hindurchgehenden Lichts DL einen unterschiedlichen Wert (in Fig. 3b durch Φ_1 , Φ_2 bzw. Φ_3 dargestellt).

[0065] Während also in einem Pixel eines herkömmlichen Lichtmodulators eine Änderung des Produktes von Schichtdicke und effektiver Brechungsindexmodulation ($d \cdot \Delta n_{\text{eff}}$) ausreichend ist, um bei einer vorgegebenen Wellenlänge des verwendeten Lichtes eine Änderung des optischen Weges zu erreichen, die beispielsweise einer Phasenmodulation von 2π entspricht, ist im Fall einer Anordnung mit Polymergitterschichten PMG eine größere Änderung von $d \cdot \Delta n_{\text{eff}}$, beispielsweise von 1.5 mal der Wellenlänge nötig, um die gleiche räumlich gemittelte Änderung des optischen Weges und damit gleiche Phasenmodulation zu erhalten. Wie groß die benötigte Änderung ist, hängt dabei von der Breite der Wände der Polymergitterschichten PMG relativ zur Breite der mit LC gefüllten Zwischenräume LCS ab.

[0066] Mit einer Schichtdicke d von 10 Mikrometer und einem LC Material mit einer Doppelbrechung von ungefähr 0.1 lässt sich dieser Wert von 1.5 mal Wellenlänge für sichtbares Licht beispielsweise erreichen.

[0067] Ähnlich wie bei einem ECB LC Modus (ECB – electrically controlled birefringence) kann die Änderung des optischen Weges unter Nutzung des unabgelenkt hindurchgehenden Lichtes DL in Verbindung mit Polarisatoren in der periodischen Gitterstruktur SVG des schaltbaren Volumengitters wahlweise als Amplituden- oder Phasenmodulator für das durchgehende (also nicht abgelenkte) Licht DL verwendet werden.

[0068] Die Wände der Polymergitterschichten PMG tragen aber auch in dieser erfindungsgemäßen Anordnung weiterhin zur Beschleunigung des Schaltvorganges bei.

[0069] Die Erfindung wird hier am Beispiel eines ECB LC Modus beschrieben, ist aber nicht auf diesen beschränkt. In analoger Weise ist der Einsatz von periodischen Gitterstrukturen SVG aus Polymergitterschichten PMG und aktiven LC-Schichten LCS zur Beschleunigung des Schaltvorganges auch für eine Reihe anderer LC Moden möglich.

[0070] Fig. 4a zeigt die Abhängigkeit der Intensität der durch das schaltbare Volumengitter abgelenkten (GL) und nicht abgelenkten (DL) Lichtanteile von der angelegten Spannung V für ein schaltbares Volumengitter nach dem Stand der Technik. Daraus ist ersichtlich, dass das Verhältnis dieser Anteile nicht nur durch den Einfallswinkel des Lichts EL, sondern auch durch die angelegte Spannung V beeinflusst werden kann.

[0071] Die Intensität des durchgelassenen Lichtes DL variiert von nahezu 0 bis nahezu 100 Prozent. Auf diese Weise wäre das schaltbare Volumengitter als Amplitudenmodulator einsetzbar. Ein Einsatz als Phasenmodulator ist aber in dieser Anordnung nicht möglich.

[0072] Fig. 4b zeigt im Vergleich dazu ein Beispiel für die Abhängigkeit der Intensität der durch das schaltbare Volumengitter abgelenkten (GL) und nicht abgelenkten (DL) Lichtanteile von der angelegten Spannung V bei einem erfindungsgemäßen Lichtmodulator SLM. Die Intensitäten des durchgelassenen Lichts DL und des gebeugten Lichtanteils GL ändern sich nur wenig mit der Spannung V.

[0073] Beispielhafte Parameter des Lichtmodulators, der dieser Darstellung zugrunde liegt, sind eine Dicke d der LC Schicht LCS von 10 Mikrometern, eine Gitterperiode g der Polymergitterschichten PMG von 1 Mikrometer, wobei die Polymergitterwände und die mit LC gefüllten Bereiche jeweils etwa 0.5 Mikrometer breit sind. Das im Beispiel verwendete LC Material hat eine Doppelbrechung von ungefähr 0,1.

[0074] Für eine geeignete Polarisierung des einfallenden Lichts EL parallel zur LC Moleküllängsachse im

off-Zustand ergibt sich erfindungsgemäß eine Phasenmodulation des durchgehenden Lichts DL, die mit der angelegten Spannung V variiert. Dargestellt ist ein Bereich, der ungefähr einer Phasenmodulation von 0 bis 2π für das durchgehende Licht DL in der 0. Ordnung im Falle einer Lichtwellenlänge von 532 nm entspricht.

[0075] In diesem Bereich ändert sich die Intensität des durchgehenden Lichts DL in der 0. Ordnung nur unwesentlich. Sie nimmt zu hohen Spannungen hin auf ungefähr 90 % ihres Maximalwertes ab. Die Intensität des gebeugten Lichts GL in den beiden ersten Ordnungen steigt dann auf etwa 5 % an. Die Intensitätsänderung des Lichts DL in der 0. Ordnung könnte weiter verringert werden, indem die Breite der Wände der Polymergitterschichten PMG geringer gewählt wird als die Breite der mit LC gefüllten Bereiche LCS, beispielsweise 0.3 Mikrometer für die Breite der Polymergitterwände und 0.7 Mikrometer für die mit LC gefüllten Bereiche.

[0076] Mit Polarisatoren, die unter 45 Grad zur Polarisationsrichtung des einfallenden Lichts EL angeordnet sind, kann auch in diesem Fall ein Einsatz als Amplitudenmodulator erfolgen.

[0077] Der zeitliche Reaktionsverlauf eines schaltbaren Volumengitters nach dem Stand der Technik für die gebeugte Lichtintensität GL bei einer Änderung der das elektrische Feld erzeugenden Spannung V ist in **Fig. 5** dargestellt.

[0078] Ein ähnlicher Verlauf der Flanken stellt sich auch für das durchgelassene Licht DL für den erfindungsgemäßen Lichtmodulator SLM ein.

[0079] Durch die Wände des Polymergitters wird die Oberflächenwechselwirkung der LC-Moleküle verstärkt, und es werden schnellere Schaltzeiten erreicht als das bei einem LC Volumengitter ohne Polymergitter der Fall wäre.

[0080] Die in den **Fig. 1** bis **Fig. 5** dargestellte Ausgestaltung des schaltbaren Volumengitters nach dem Stand der Technik und für den erfindungsgemäßen Lichtmodulator bezieht sich auf eine Anordnung mit einer Struktur der Polymergitterschichten PMG, die senkrecht zu den begrenzenden Oberflächen des schaltbaren Volumengitters ausgerichtet ist.

[0081] Eine zweite Ausgestaltung des erfindungsgemäßen Lichtmodulators SLM gem. **Fig. 6** weist eine Struktur mit um 90 Grad gedrehten, also parallel zu den begrenzenden Oberflächen des Volumengitters ausgerichteten LC Schichten LCS und Polymergitterschichten PMG auf. Eine solche Struktur kann erzeugt werden, indem wie bei einem Reflexionsvolumengitter eine Belichtung des Aufzeichnungsmediums AZM mit einem Teilstrahl des Lasers von vorn

und mit einem anderen Teilstrahl von hinten, z.B. nach einer Reflexion an einem zur Oberfläche des Aufzeichnungsmediums AZM parallel angeordneten Spiegel erfolgt. In dem Aufbau gem. **Fig. 1** wäre hierfür beispielsweise das zu belichtende Aufzeichnungsmedium AZM um 90 Grad gedreht anzuordnen. Diese Schichtstruktur wirkt bezüglich des Schaltverhaltens ähnlich wie viele dünne LC Schichten im Vergleich zu einer einzelnen dicken Schicht. In diesem Fall sind aber die Wände der Polymergitterschichten PMG im Dickenbereich 1 Mikrometer oder kleiner. Die Wände im Mikrometerbereich sind damit kleiner als typische laterale Pixelabmessungen (Pixel-pitch) eines Lichtmodulators. Im Vergleich dazu wären Glassubstrate nach dem Stand der Technik dicker oder höchstens in der gleichen Größenordnung wie typische laterale Pixelabmessungen.

[0082] Aufgrund dieser sehr dünnen Polymergitterschichten PMG (im Vergleich zu oben beschriebenen Glassubstraten nach dem Stand der Technik) sind Beugungseffekte durch die Aufteilung des aktiven Mediums in viele dünne LC Schichten vernachlässigbar klein.

[0083] Vorteilhaft im Vergleich zur ersten weist deshalb diese zweite Ausgestaltung des erfindungsgemäßen Lichtmodulators SLM gem. **Fig. 6** keine durch die Wände der Polymergitterschichten PMG erzeugten Beugungsordnungen auf.

[0084] Ein erfindungsgemäßer räumlicher Lichtmodulator SLM kann auch mit mehreren, beispielsweise mindestens drei Lichtquellen unterschiedlicher Wellenlänge betrieben werden, wobei der Einfallswinkel von Licht aller drei Lichtquellen bezüglich der Oberfläche des Gitters jeweils so gewählt ist, dass er nicht dem Bragg-Winkel der periodischen Gitterstruktur SVG entspricht, so dass das Licht der mindestens drei Lichtquellen nahezu vollständig unabgelenkt durch den räumlichen Lichtmodulator hindurchtritt, um in Abhängigkeit von der Spannung V der angesteuerten Pixel das Licht in seiner Phase zu beeinflussen.

[0085] Wenn die Gitterebenen der Polymergitterschichten PMG senkrecht zur Oberfläche des Lichtmodulators angeordnet sind, ist es vorteilhaft, die Gitterperiode kleiner als die Wellenlänge λ der Lichtquelle(-n) zu wählen. Weiterhin ist es günstig, wenn die Wände und Zwischenräume der als Volumengitter wirkenden periodischen Gitterstruktur SVG unterschiedliche Breite aufweisen.

[0086] **Fig. 7** zeigt die Verwendung von WGP (engl.: wire grid polariser) als Elektroden in Verbindung mit einem erfindungsgemäßen Lichtmodulator. Dargestellt ist eine „common electrode“ (gemeinsame Elektrode) E0, die von einem WGP gebildet wird, der beispielsweise die ganze Fläche eines Modulator-Deck-

glases einnimmt. Dieser WGP ist als WGPE0 bezeichnet. Die Gegenelektroden der einzelnen Pixel bzw. Subpixel werden von den strukturierten, d.h. elektrisch getrennten WGP-Elektroden WGPE1, WGPE2 und WGPE3 gebildet. Zwischen den WGP-Elektroden für die Pixel mit den Anschlüssen E1, E2 und E3, die mit den Steuer-Spannungen V1, V2 und V3 je nach der zu realisierenden Amplitudentransparenz des Pixels belegt werden, und der „common electrode“, die vom WGPE0 gebildet wird, an dessen Anschluss E0 eine konstante Spannung V0 anliegt, befindet sich die periodische Gitterstruktur mit den durch die Polymergitterschichten getrennten LC-Schichten des erfindungsgemäßen Lichtmodulators (in **Fig. 7** nicht gezeigt), die in Abhängigkeit von der lokal angelegten Spannungsdifferenz zur „common electrode“ eine Drehung der Polarisationssebene des Lichtes im Bereich des jeweiligen Pixels bewirkt. Durch die gleichzeitige Wirkung der WGP-Elektroden als Polarisator bzw. Analysator wird das durchgehende Licht im Bereich des jeweiligen Pixels in seiner Amplitude bzw. Intensität gesteuert, ohne dass gesonderte Polarisatoren bzw. Analysatoren in den erfindungsgemäßen Lichtmodulator eingefügt werden müssen. Die Polarisationsrichtung des Lichtes im Bereich der jeweiligen Pixel ist in **Fig. 7** durch Pfeile angedeutet.

[0087] Die in **Fig. 7** dargestellte Ausgangsanordnung der Elektroden für den erfindungsgemäßen Lichtmodulator, die in Form von Drahtgitter-Polarisatoren (engl.: wire grid polarizer) WGP ausgeführt sind, lässt sich verallgemeinern.

[0088] Ausgehend von der in **Fig. 7** gezeigten Anordnung, die ein elektrisches Feld erzeugt, dessen Feldlinien hauptsächlich von den Elektroden E1, E2, E3 zu der Gegenelektrode E0 verläuft, können mit einer anderen Elektrodenanordnung auch in plane Felder erzeugt werden. Dies ist beispielsweise in **Fig. 8** dargestellt, wo der WGP in Form von strukturierten in plane Elektroden E11–12, E21–22 und E31–32 ausgeführt ist, die kammartig ineinander verschränkt sind.

[0089] Die Gegenelektrode E0 kann ebenfalls zu einer kammförmig ausgeführten Elektrode abgewandelt werden, wie es in **Fig. 8** dargestellt ist. Sie kann aber auch wie in **Fig. 7** flächig mit einer Spannung beaufschlagt werden. Je nach LC-Mode ist sie mitunter auch gar nicht notwendig.

[0090] Die kammförmige Gegenelektrode E0 kann aber auch in Bezug auf die Elektroden E11–12, E21–22 und E31–32 leicht verkippt werden, um ein schnelleres Ausschalten des Modulators, das durch den Parameter t_{off} charakterisiert ist, zu realisieren. Dies ist in **Fig. 9** dargestellt.

[0091] Eine weitere Ausführungsform von WGP bzw. WGP-Segmenten in einem erfindungsgemäßen Lichtmodulator ist in **Fig. 10** dargestellt. Dabei dient ein dem jeweiligen Pixel des Modulators zugeordnetes WGP-Segment einer Homogenisierung des primär angelegten in plane Feldes. Das WGP-Segment ist dabei gegenüber WGP-Segmenten anderer Pixel isoliert.

[0092] **Fig. 11** zeigt den Intensitätsverlauf $I(x, z)$ des Belichtungslichts bei der Kontaktkopie einer Gitterstruktur, beispielsweise für die Elektroden eines erfindungsgemäßen Lichtmodulators, hinter einer reinen Amplitudenmaske AM und hinter einer Phase Shift Maske PSM im Vergleich.

[0093] Das in **Fig. 11** dargestellte Prinzip der Phase Shift Maske PSM besteht darin, einen vorgebaren oder alternierenden Phasenhub zwischen benachbarten Strukturen einzuführen. Die Beugungsbilder benachbarter Strukturen sind in Gegenphase und löschen sich somit innerhalb ihres Überlappungsbereiches zumindest teilweise aus. In den Intensitätsverteilungen aus **Fig. 11** sind Potentiallinien bei 42 % der im Feld vorliegenden maximalen Intensität dargestellt. Dies entspricht beispielsweise der Reaktionsschwelle eines binären Photoresistes, der als Aufzeichnungsmedium der Gitterstruktur dient.

[0094] Die Geometrie aus **Fig. 11** ist nicht optimiert. Eine Optimierung der Amplitudenverteilung der Maske kann eine deutliche Verbesserung des hinter der Maske vorliegenden Beugungsbildes erbringen. Neben einer lokalen Änderung der Linienbreite können zusätzliche Korrekturstrukturen auf der Maske angebracht werden, die nicht vom Photoresist des Aufzeichnungsmediums aufgelöst werden. Dies wird als OPC (engl.: optical proximity correction) bezeichnet.

[0095] Eine weitere Optimierung kann durch den Übergang von einem binären Phasenprofil, welches die Phasenwerte 0 und π erzeugt, zu einem Phasenstufenprofil, welches mehr als zwei Phasenwerten erzeugt, erreicht werden.

[0096] Eine weitere Optimierung kann zudem durch den Übergang vom binären Amplitudenprofil zu einem Amplitudenprofil mit mehr als zwei Graustufen erreicht werden. Dies wird als APSM (engl.: attenuated phase shift mask) bezeichnet.

[0097] In **Fig. 12** ist der Intensitätsverlauf $I(x, z)$ für eine zu belichtende Gitterstruktur hinter einer Phase Shift Maske PSM für die Belichtungswellenlänge $\lambda_{\text{exp.}} = 365 \text{ nm}$ dargestellt. Die Periode ist $0,5 \mu\text{m}$ und das Tastverhältnis TV ist 0.5. Es ist zu erkennen, dass Strukturbreiten von $0,25 \mu\text{m}$ auch über Distanzen von $5 \mu\text{m}$ gut auf das zu belichtende Aufzeichnungsmedium übertragen werden können.

[0098] Bei der Erzeugung der Elektroden-Strukturen für den erfindungsgemäßen Lichtmodulator mittels Phase Shift Masken und Kontaktkopie ergibt sich allerdings ein Problem bezüglich der Ausrichtung zweier Substrate mit Elektroden mit Perioden von $\Lambda_E \leq 1 \mu\text{m}$. Dieses Problem kann durch eine Optimierung von Justagemarken behoben werden.

[0099] Eine standardmäßig angewandte Methode besteht z.B. darin, dass Moire-Muster zur Justage verwendet werden. Zur Steigerung der Auflösung kann beispielsweise ein 5-Phasen-Algorithmus eingesetzt werden, der es beispielsweise theoretisch erlaubt, eine Justagegenauigkeit von $1/100$ der Periode der Elektroden entlang der Richtung des K-Vektors, d.h. senkrecht zu den Gitterlinien einzustellen.

[0100] Eine weitere Lösung beruht auf der elektronischen Justage eines Kondensators:

Die Elektroden können elektrisch angeschlossen werden und die Justage kann beispielsweise auf Maximierung der Kapazität der beiden sich gegenüber liegenden Elektroden-Kamm-Strukturen ausgelegt werden. Der vorliegende Kamm-Kondensator kann Teil eines Schwingkreises sein, so dass die Justage auf die Einstellung einer Frequenz basiert, was genauer als eine herkömmliche Kapazitätsmessung sein kann.

[0101] Erfindungsgemäß wird eine Lösung vorgeschlagen, die auf der Verwendung von verbesserten 2D-Justagemarken auf der Basis von Barker Codes beruht:

Fig. 13 zeigt Barker Codes der Länge 11. Binäre Barker-Codes zeichnen sich durch eine minimale Autokorrelationsfunktion aus und eignen sich somit sehr gut als Punkt-Justagemarke. Diese Barker-Codes sind theoretisch, ausgenommen die 2×2 -Variante, jedoch nur eindimensional. Auch zufallsverteilte binäre Masken haben bis auf die Position der Deckungsgleichheit einen geringen Betrag der Autokorrelation.

[0102] Die erfindungsgemäße Idee hier ist es jedoch nun, geometrisch 2D-Barker-Codes zu erzeugen. Dazu werden die binären Werte in Form von Kreisringen oder Kreissegmenten auf einer zweidimensionalen Fläche angeordnet. Dies ist in den **Fig. 14** und **Fig. 15** dargestellt.

[0103] Da dem menschlichen Auge die Erfassung eines Intensitätsminimums genauer gelingt, als die Erfassung eines Intensitätsmaximums, eignen sich zueinander invertierte Muster gut, um bei zwei einander gegenüber liegenden Mustern als Justagemarke eingesetzt zu werden, wobei auf ein Minimum der Intensität justiert wird.

[0104] Die Zählrichtung kann sowohl für axialsymmetrische, als auch für radialsymmetrische Intensi-

tätsverteilungen variiert werden. So kann bei axialsymmetrischen Anordnungen von innen nach außen, aber auch von außen nach innen gezählt werden. Zudem kann zyklisch vertauscht werden, d.h. dass bei gleich bleibender Reihenfolge die Position des ersten Elementes beliebig gewählt werden kann. Bei radialsymmetrischen Anordnungen kann der Drehsinn der Zählung gegen oder auch im Uhrzeigersinn erfolgen. Zudem kann zyklisch vertauscht werden, d.h. dass bei gleich bleibender Abfolge des binären Musters die Position des ersten Elementes beliebig gewählt werden kann.

[0105] Axialsymmetrische 2D-Intensitätsverteilungen und radialsymmetrische 2D-Intensitätsverteilungen, die auf dem eindimensionalen Barker Code basieren, können miteinander in unterschiedlichster Form kombiniert werden. Ein Beispiel für eine derartige Kombination ist in **Fig. 16** dargestellt. Es handelt sich dabei um die Kombination eines elfstelligen Barker Codes mit zwei vierstelligen Barker Codes.

[0106] Barker Codes sind nur bis zu dreizehn Stellen bekannt. Es können jedoch auch andere Codes, wie Willard Code, oder zufallsbasierte (engl.: random) Codes axial und radial kombiniert werden, um in x, y-Richtung und im Drehwinkel eine Justagemarke mit kleinem Betrag der außerhalb der Designposition vorliegenden Autokorrelationsfunktion zu erhalten.

[0107] Das hier beschriebene Verfahren zum Herstellen von fein dimensionierten Elektrodenstrukturen kann ganz allgemein auch zum Herstellen von Elektrodenstrukturen eingesetzt werden, die losgelöst von einem räumlichen Lichtmodulator gemäß der vorliegenden Erfindung angewendet werden können.

[0108] Abschließend sei ganz besonders darauf hingewiesen, dass die voranstehend erörterten Ausführungs- und Anwendungsbeispiele lediglich zur Beschreibung der beanspruchten Lehre dienen, diese jedoch nicht auf die Ausführungs- und Anwendungsbeispiele einschränken.

Patentansprüche

1. Räumlicher Lichtmodulator zum Modulieren von Licht mindestens einer Lichtquelle, welches mit dem räumlichen Lichtmodulator wechselwirkt, wobei der räumliche Lichtmodulator (SLM) in Form einer periodischen Struktur von im Wesentlichen in gleichen Abständen angeordneten Polymergitterschichten (PMG) und mit einem aktiven optischen Medium angefüllten Zwischenräumen (LCS) der Polymergitterschichten (PMG) zu einer periodischen Gitterstruktur (SVG) ausgebildet ist, wobei die die periodische Gitterstruktur (SVG) begrenzenden Oberflächen mit Elektroden (PE, GE) versehen sind, mit welchen der Brechungsindex des aktiven optischen Mediums durch ein elektrisches Feld beeinflussbar ist, wobei

die Elektroden (PE) eine pixelierte Anordnung in einem regelmäßigen Muster aufweisen und mit einer elektrischen Spannung (V) unabhängig voneinander ansteuerbar sind und wobei die Ausrichtung der Polymergitterschichten (PMG), die Schichtdicke (d) und die Gitterperiode (g) der periodischen Gitterstruktur (SVG) so ausgelegt sind, dass sie für das Licht (EL) mindestens einer Lichtquelle nicht der Bragg-Bedingung entsprechen, so dass für das auf den räumlichen Lichtmodulator (SLM) einfallende Licht (EL) der mindestens einen Lichtquelle der Anteil des aufgrund von Bragg-Beugung abgelenkten Lichts (GL) um einen vorgebbaren Wert geringer als der Anteil des unabgelenkt durchgelassenen Lichtes (DL) ist und die Anteile des abgelenkten (GL) bzw. unabgelenkt durchgelassenen Lichtes (DL) bei einer Änderung der Ansteuerspannung (V) im Wesentlichen unverändert bleiben.

2. Räumlicher Lichtmodulator nach Anspruch 1, wobei der Einfallswinkel von Licht (EL) der Lichtquelle bezüglich der Oberfläche der periodischen Gitterstruktur (SVG) derart gewählt ist, dass er nicht dem Bragg-Winkel der periodischen Gitterstruktur (SVG) entspricht, so dass das Licht (EL) der mindestens einen Lichtquelle nahezu vollständig unabgelenkt durch den räumlichen Lichtmodulator (SLM) hindurchtritt, um in Abhängigkeit der jeweils angesteuerten Pixel das Licht in seiner Phase zu beeinflussen.

3. Räumlicher Lichtmodulator nach Anspruch 1 oder 2, wobei durch die regelmäßig angeordneten Polymergitterschichten (PMG) eine Schichtstruktur des räumlichen Lichtmodulators (SLM) realisiert wird, die im Vergleich zu Lichtmodulatoren mit einer einzigen aktiven Schicht eine geringere Schaltzeit aufweist.

4. Räumlicher Lichtmodulator nach einem der Ansprüche 1 bis 3, wobei im Vergleich zu Lichtmodulatoren mit mehreren aktiven Schichten, die durch Glassubstrate getrennt sind, unerwünschte Beugungseffekte zwischen den einzelnen Schichten und damit ein Übersprechen zwischen benachbarten Pixeln vermieden werden.

5. Räumlicher Lichtmodulator nach einem der Ansprüche 1 bis 4, wobei die Gitterebenen der periodischen Gitterstruktur (SVG) senkrecht oder parallel zur Oberfläche des Lichtmodulators (SLM) angeordnet sind.

6. Räumlicher Lichtmodulator nach einem der Ansprüche 1 bis 5, in welchem in Verbindung mit mindestens einem vor und/oder nach der Modulatorschicht angeordneten Polarisator eine Amplitudenmodulation oder eine Phasenmodulation des einfallenden Lichts (EL) realisierbar ist.

7. Räumlicher Lichtmodulator nach Anspruch 1 und 2 mit mindestens drei Lichtquellen unterschiedlicher Wellenlänge, wobei der Einfallswinkel von Licht (EL) der mindestens drei Lichtquellen bezüglich der Oberfläche der periodischen Gitterstruktur (SVG) jeweils so gewählt ist, dass er nicht dem Bragg-Winkel der periodischen Gitterstruktur (SVG) entspricht, so dass das Licht (EL) der mindestens drei Lichtquellen nahezu vollständig unabgelenkt durch den räumlichen Lichtmodulator (SLM) hindurchtritt, um in Abhängigkeit der jeweils angesteuerten Pixel das Licht in seiner Phase zu beeinflussen.

8. Räumlicher Lichtmodulator nach Anspruch 5 und 7, wobei die Gitterebenen der Polymergitterschichten (PMG) senkrecht zur Oberfläche des Lichtmodulators (SLM) angeordnet sind und die Gitterperiode (g) kleiner ist als die Wellenlängen der Lichtquellen.

9. Räumlicher Lichtmodulator nach Anspruch 5, wobei die Gitterebenen der Polymergitterschichten (PMG) senkrecht zur Oberfläche des Lichtmodulators (SLM) angeordnet sind und die Wände und Zwischenräume der Polymergitterschichten (PMG) unterschiedliche Breiten aufweisen.

Es folgen 11 Seiten Zeichnungen

Anhängende Zeichnungen

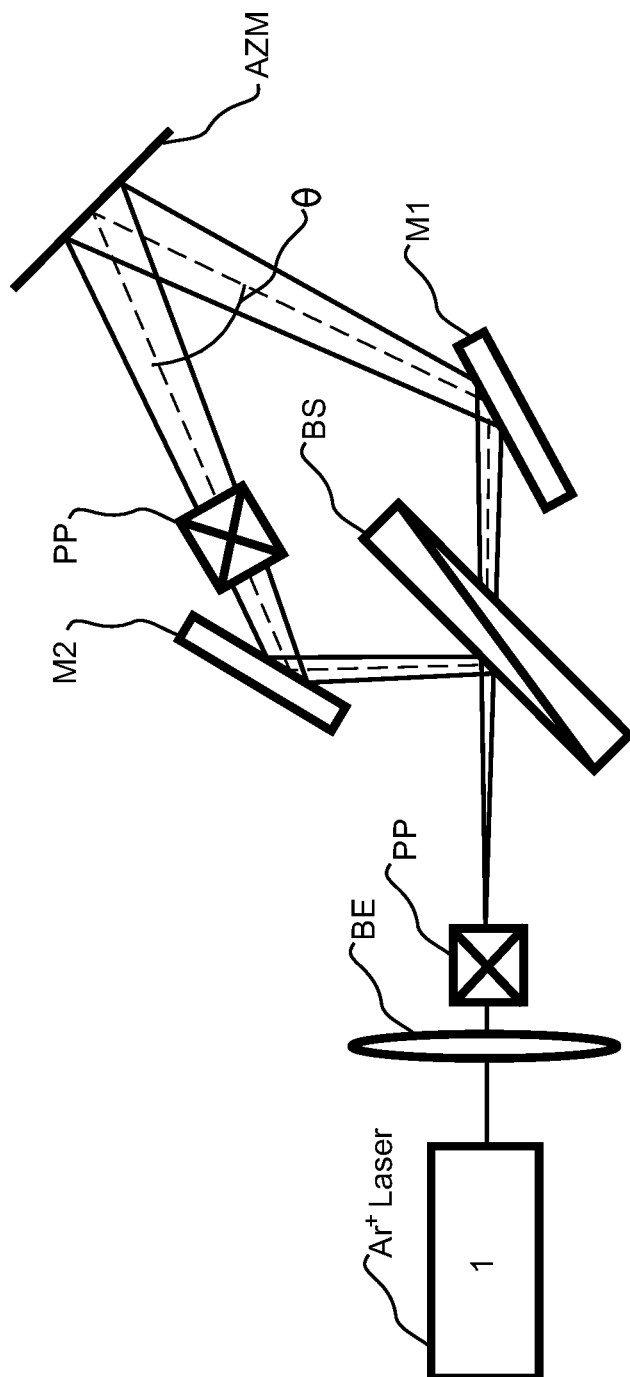


Fig. 1

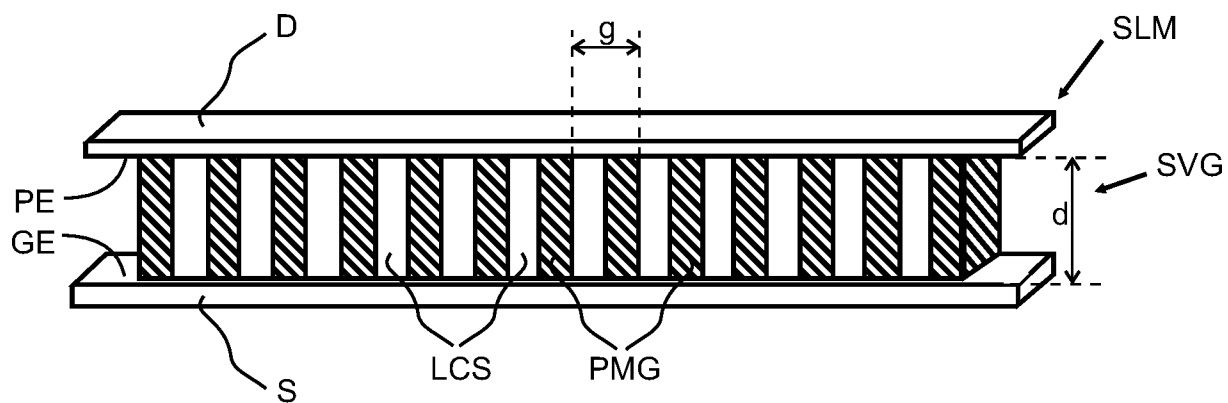


Fig. 2

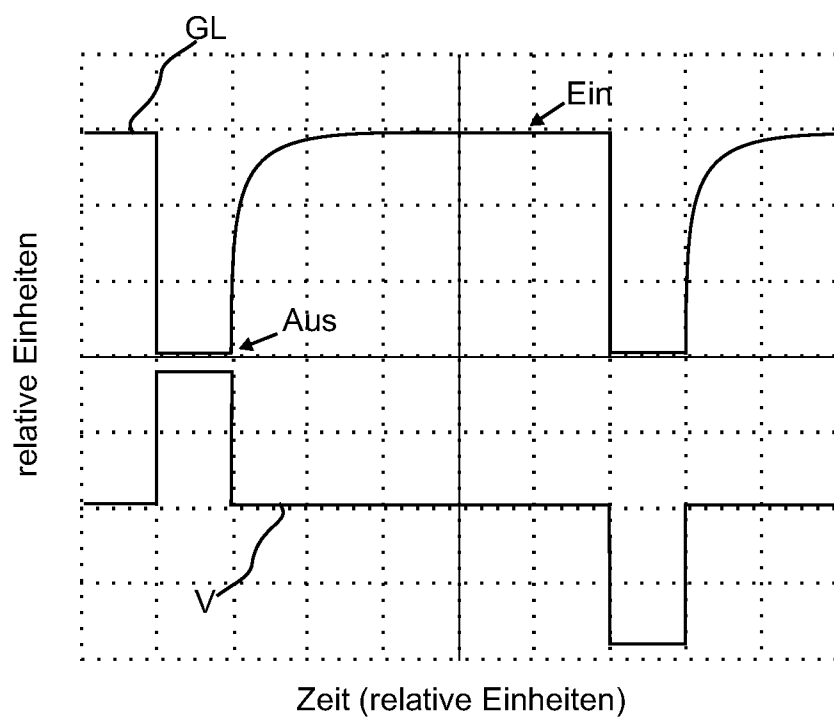


Fig. 5

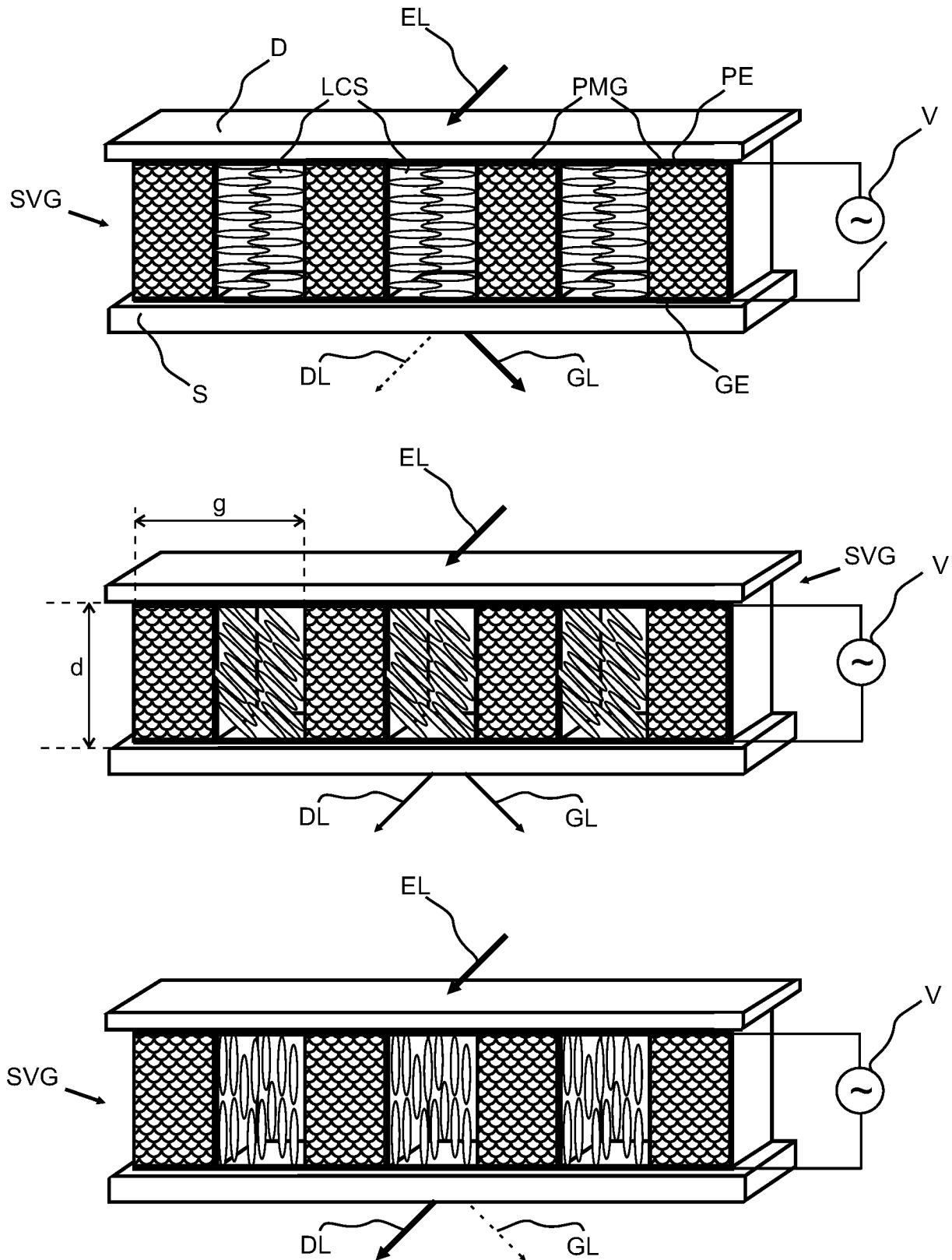


Fig. 3a

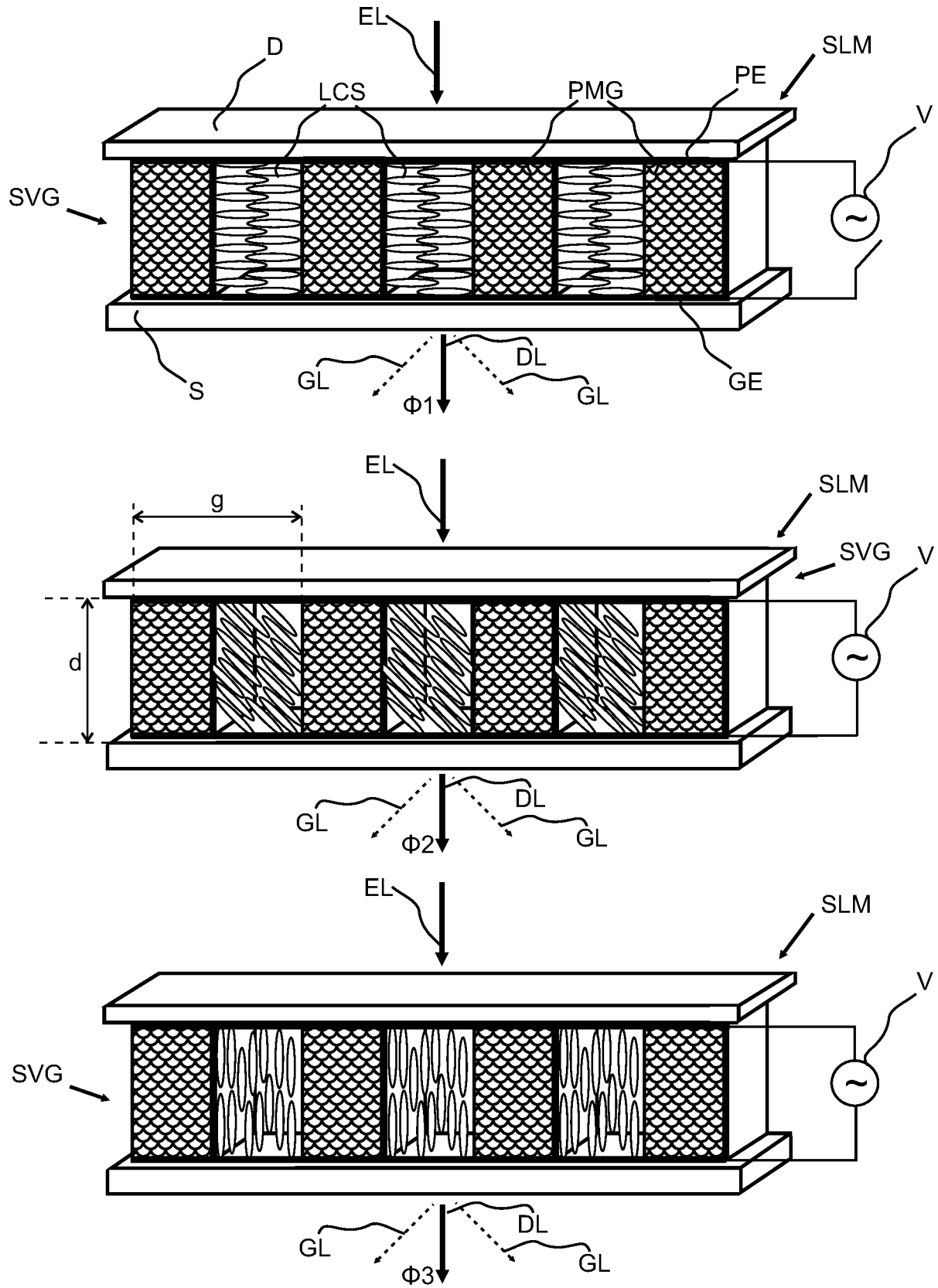


Fig. 3b

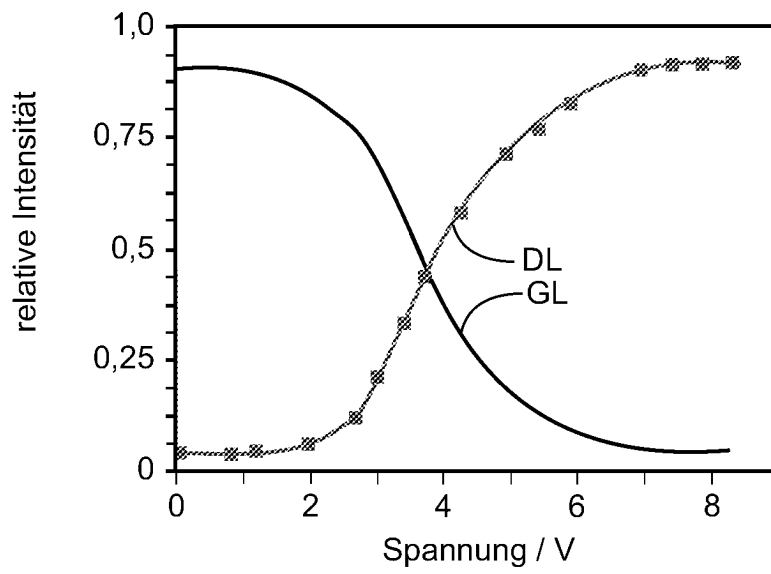


Fig. 4a

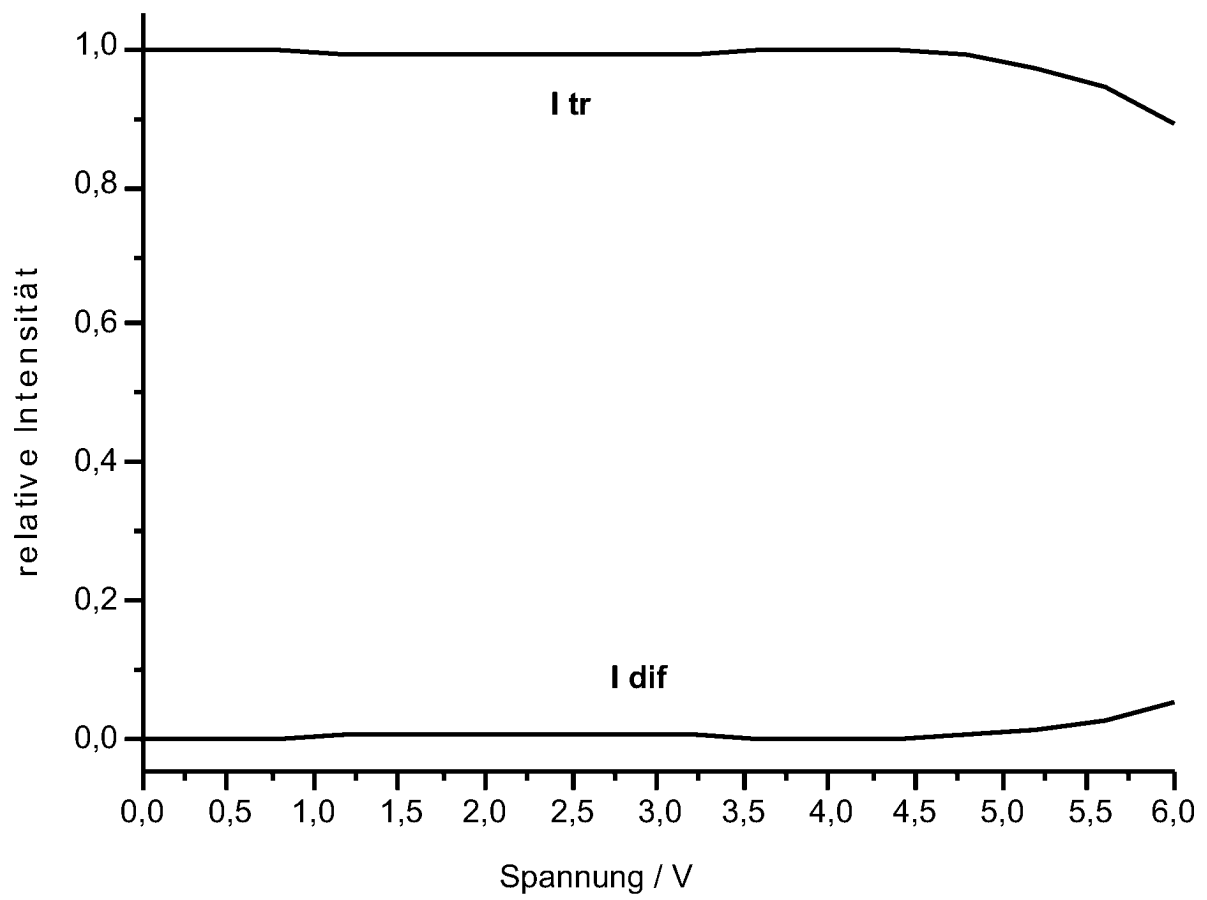


Fig. 4b

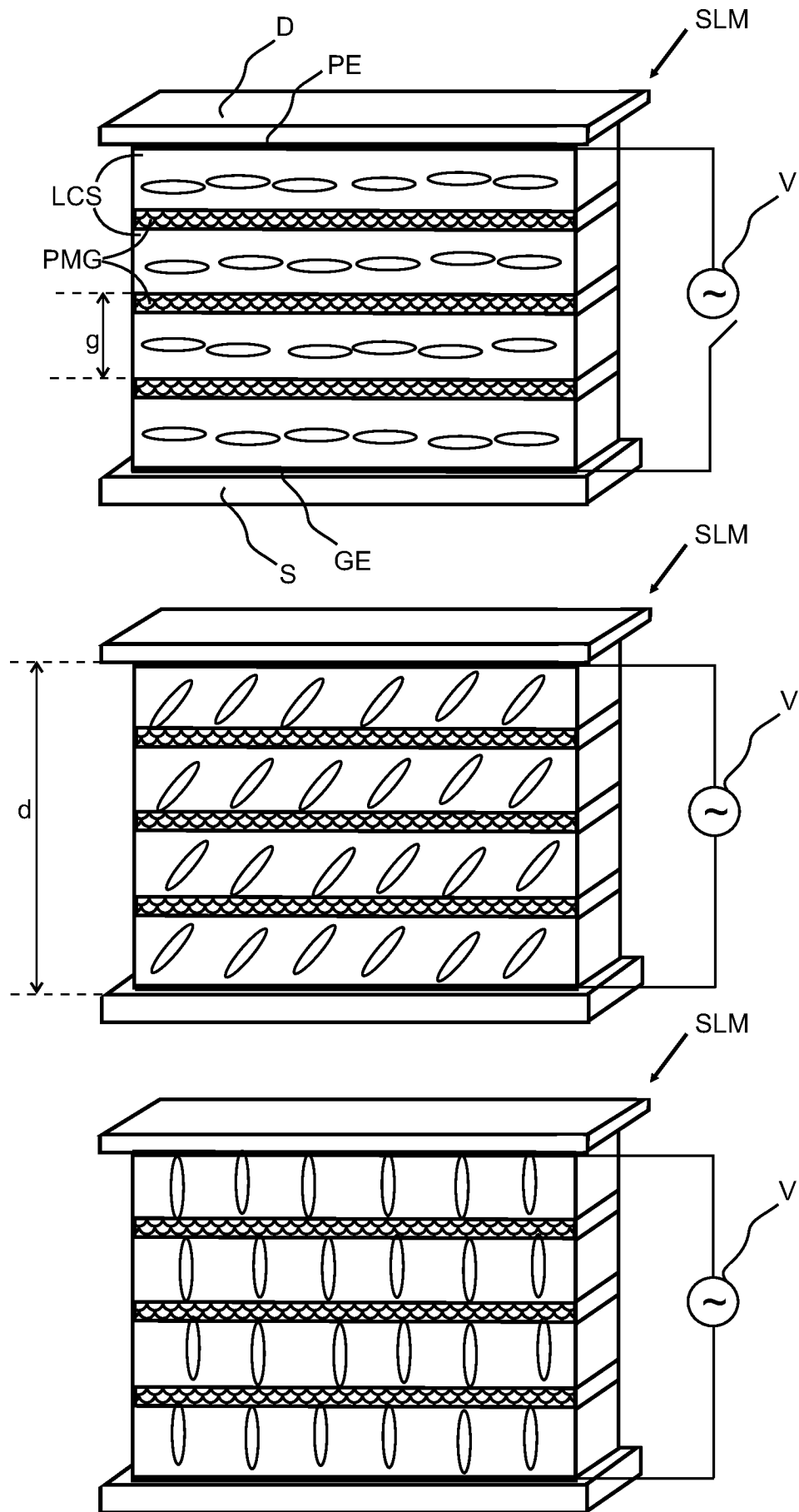


Fig. 6

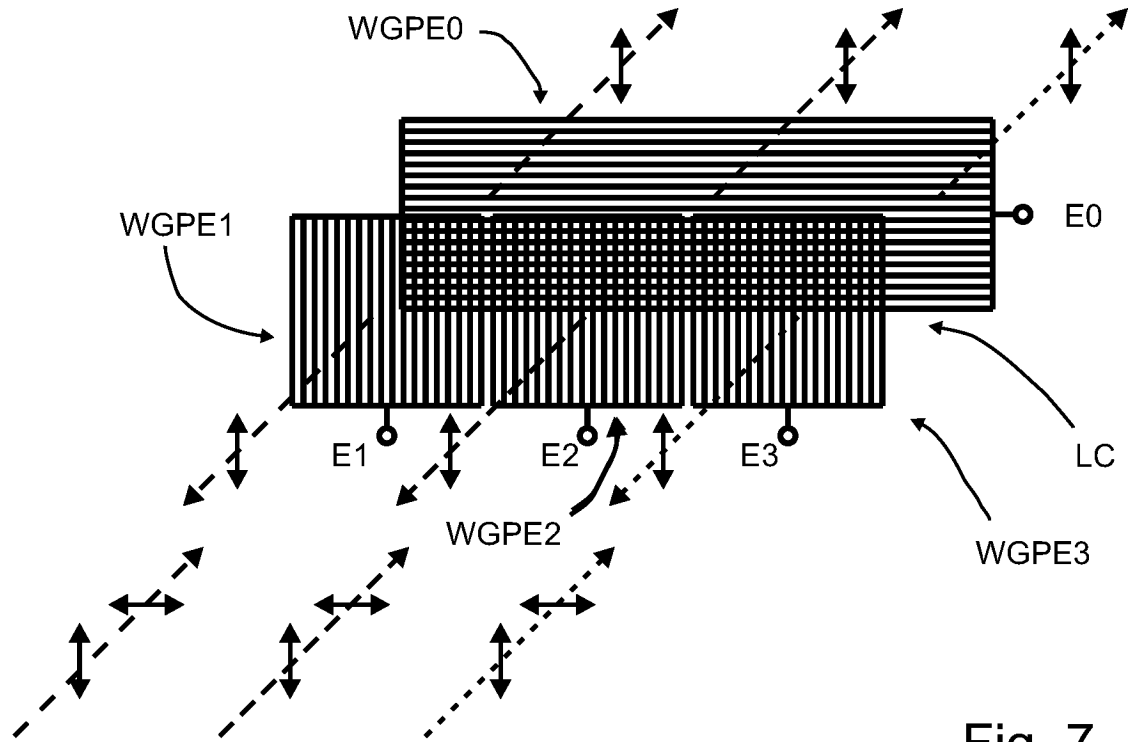


Fig. 7

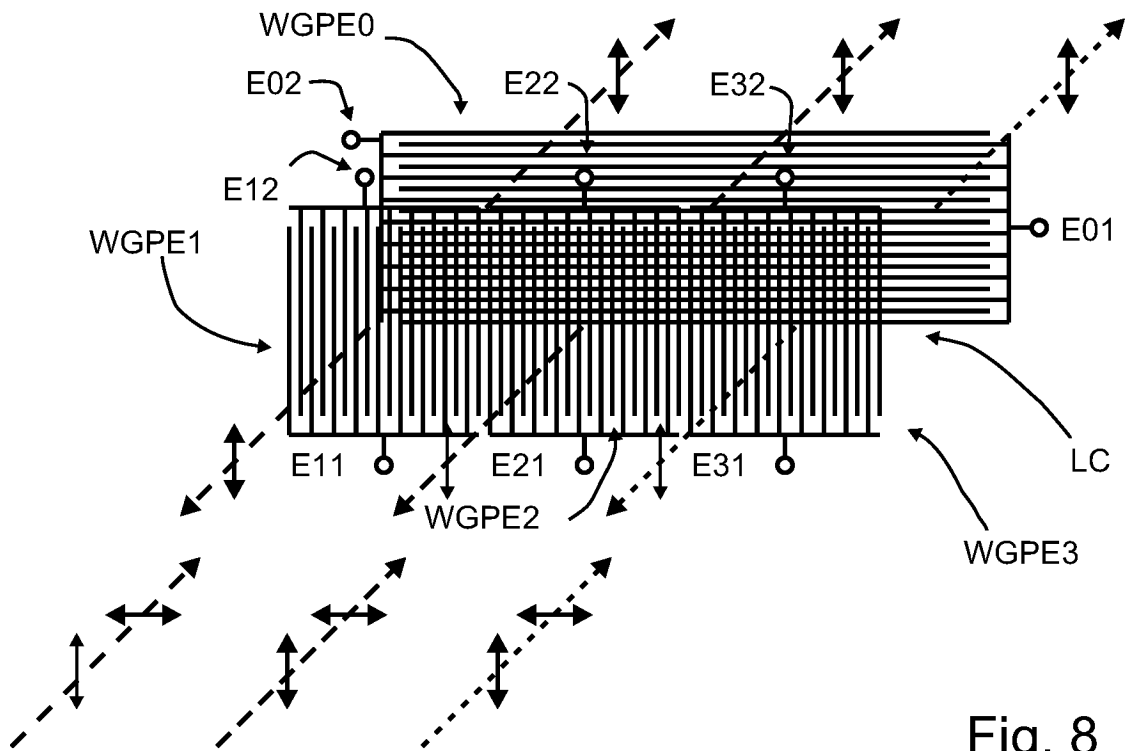
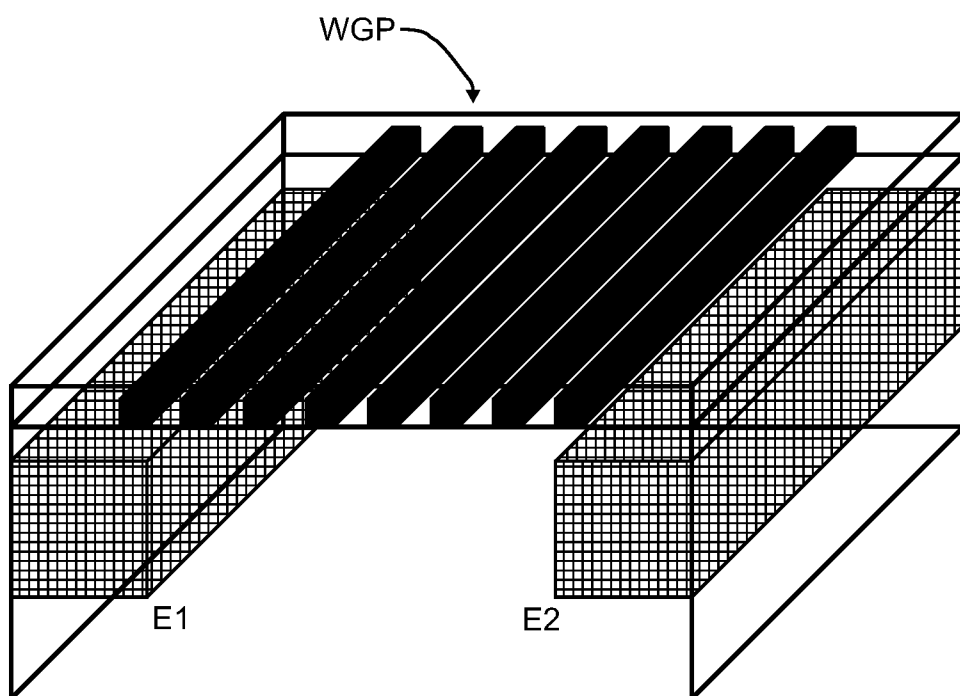
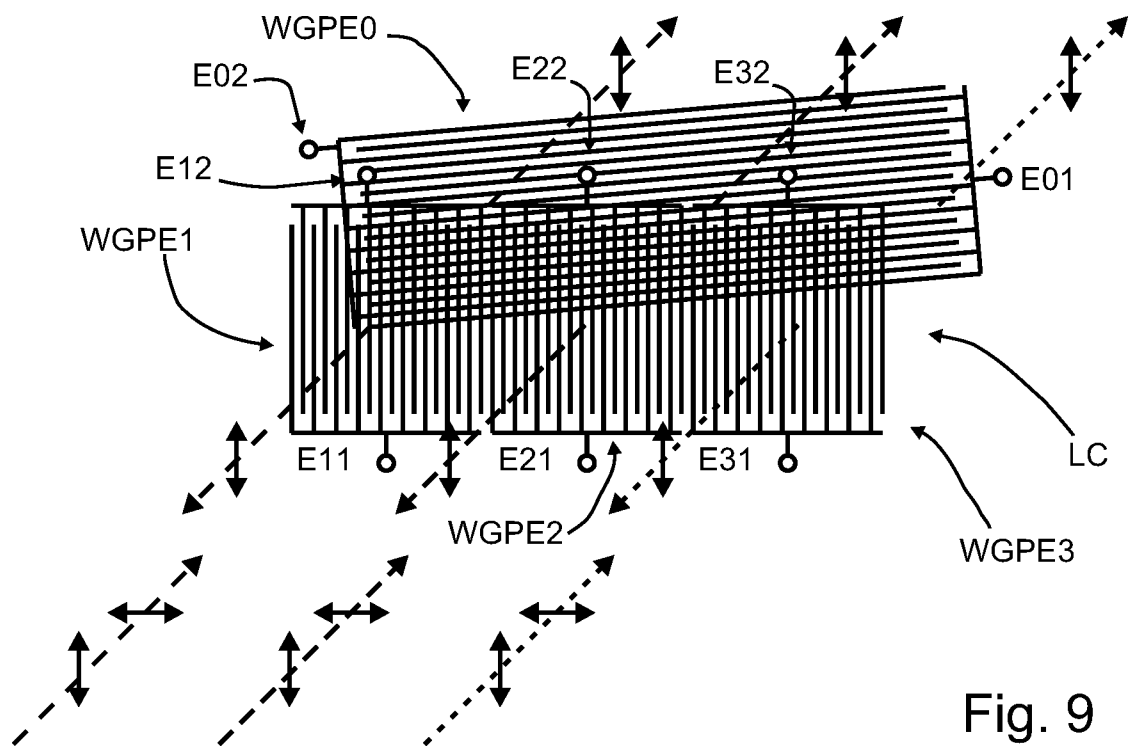


Fig. 8



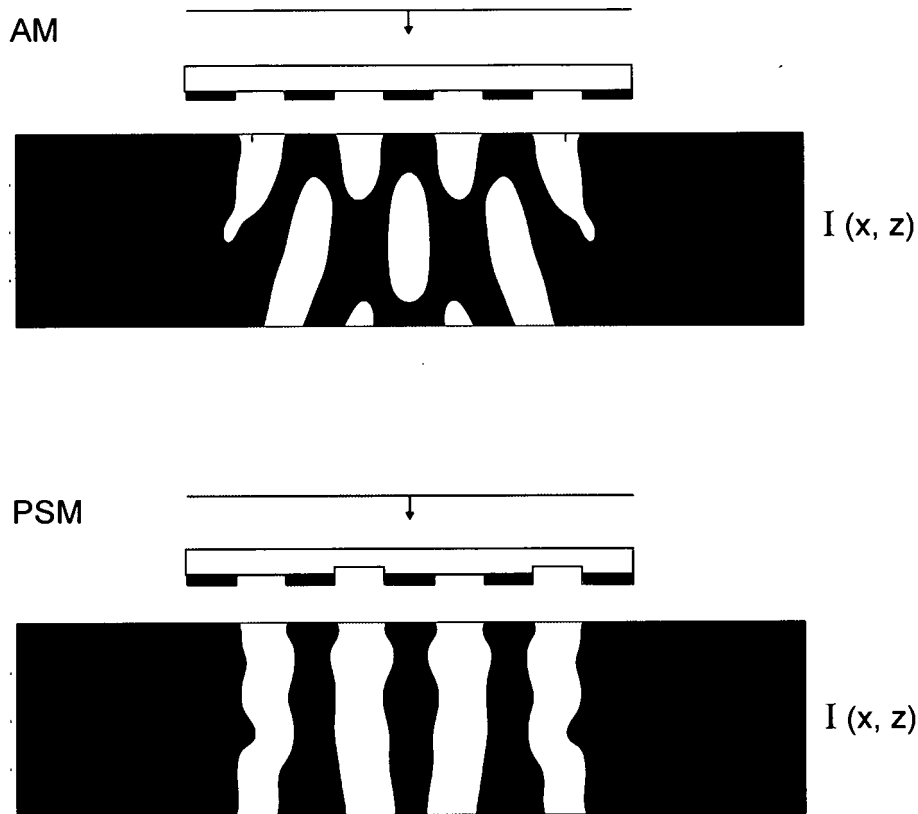


Fig. 11

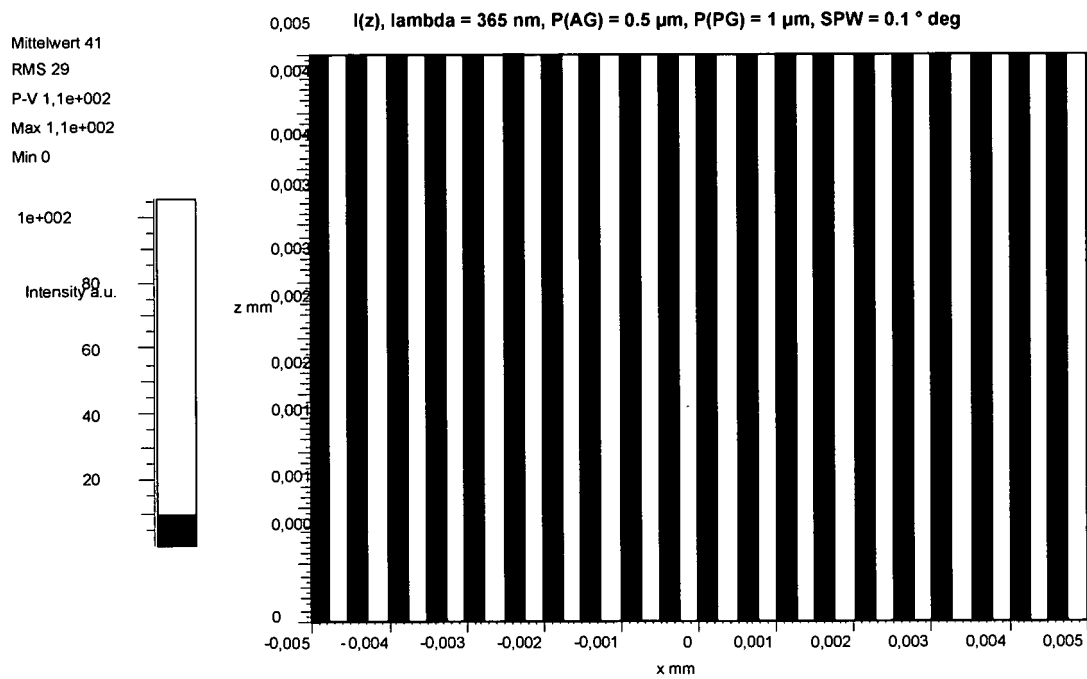


Fig. 12

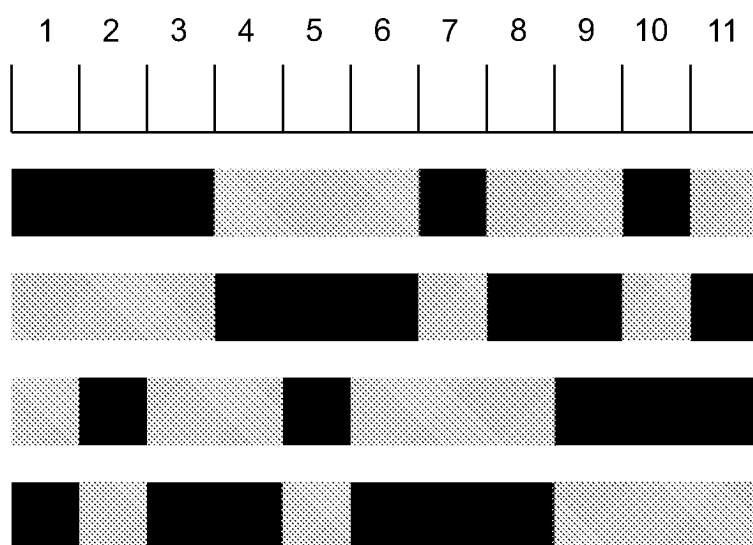


Fig. 13

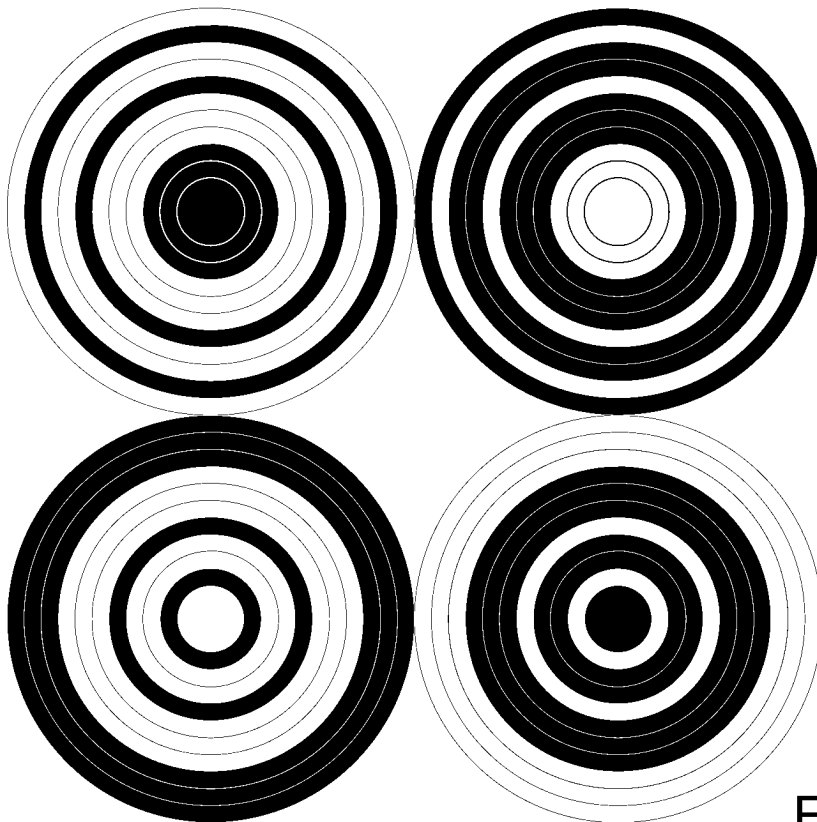


Fig. 14

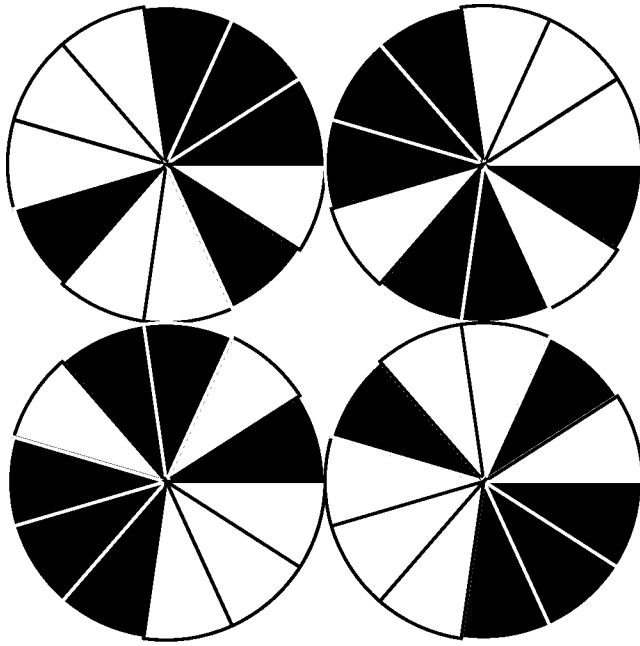


Fig. 15

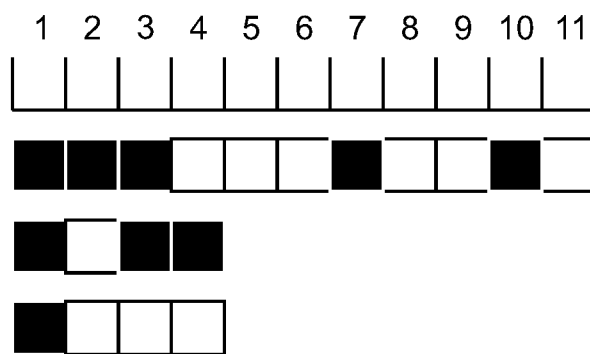
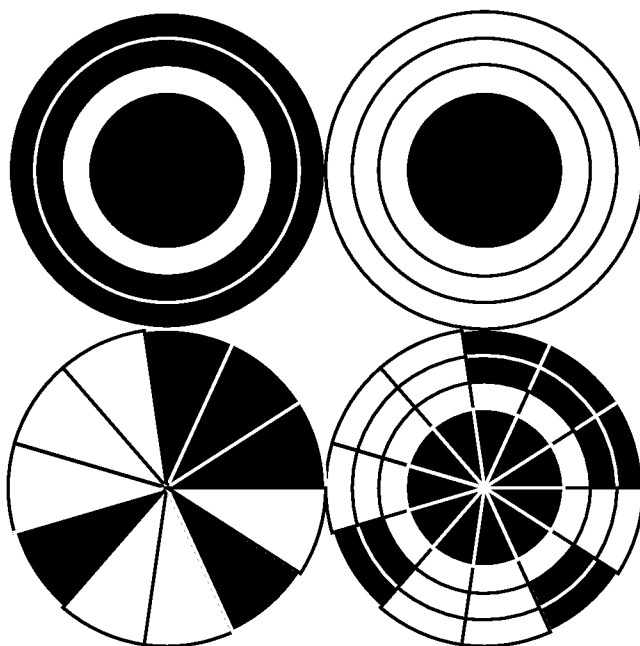


Fig. 16