



(10) **DE 10 2009 037 141 B4** 2013.01.03

(12)

Patentschrift

(21) Aktenzeichen: **10 2009 037 141.9**
(22) Anmeldetag: **31.07.2009**
(43) Offenlegungstag: **03.02.2011**
(45) Veröffentlichungstag
der Patenterteilung: **03.01.2013**

(51) Int Cl.: **G02B 27/09 (2006.01)**
B23K 26/06 (2006.01)
H01L 21/268 (2006.01)
H01L 21/324 (2006.01)

Innerhalb von drei Monaten nach Veröffentlichung der Patenterteilung kann nach § 59 Patentgesetz gegen das Patent Einspruch erhoben werden. Der Einspruch ist schriftlich zu erklären und zu begründen. Innerhalb der Einspruchsfrist ist eine Einspruchsgebühr in Höhe von 200 Euro zu entrichten (§ 6 Patentkostengesetz in Verbindung mit der Anlage zu § 2 Abs. 1 Patentkostengesetz).

(73) Patentinhaber:
**Carl Zeiss Laser Optics GmbH, 73447,
Oberkochen, DE**

(74) Vertreter:
Witte, Weller & Partner, 70173, Stuttgart, DE

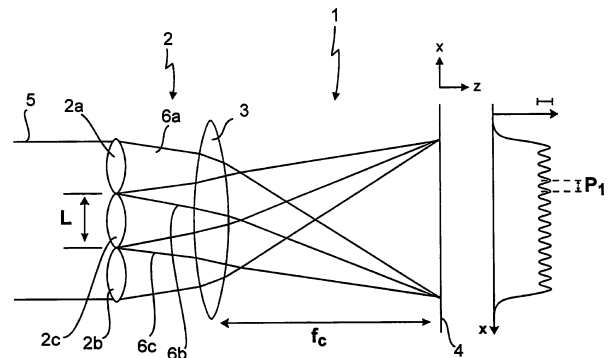
(72) Erfinder:
**Münz, Holger, 73433, Aalen, DE; Merkel,
Wolfgang, 89231, Neu-Ulm, DE; Fiolka, Damian,
73447, Oberkochen, DE; Wangler, Johannes,
89551, Königsbronn, DE**

(56) Für die Beurteilung der Patentfähigkeit in Betracht
gezogene Druckschriften:

DE	103 45 784	A1
DE	10 2006 009 212	A1
DE	11 2005 001 847	T5
US	2008 / 0 023 447	A1
US	5 253 110	A
EP	0 658 813	A1

(54) Bezeichnung: **Optisches System zum Erzeugen eines Lichtstrahls zur Behandlung eines Substrats**

(57) Hauptanspruch: Optisches System zum Erzeugen eines Lichtstrahls zur Behandlung eines in einer Substratebene (14) angeordneten Substrats, wobei der Lichtstrahl in einer ersten Dimension (X) senkrecht zur Ausbreitungsrichtung (Z) des Lichtstrahls eine Strahllänge (L) und in einer zweiten Dimension (Y) senkrecht zur ersten Dimension (X) und zur Lichtausbreitungsrichtung (Z) eine Strahlbreite (B) aufweist, mit zumindest einer mischenden optischen Anordnung (18; 18'; 18''), die den Lichtstrahl in zumindest einer der ersten und zweiten Dimension in eine Mehrzahl von Lichtpfaden (24a-c) aufteilt, die einander überlagert in die Substratebene (14) einfallen, wobei zumindest eine die Kohärenz beeinflussende optische Anordnung (50; 50'; 60; 60'; 70) im Strahlengang des Lichtstrahls vorhanden ist, die auf den Lichtstrahl so wirkt, dass der Kohärenzgrad des Lichts für zumindest einen Lichtpfadabstand eines Lichtpfades (24a-c) von zumindest einem anderen Lichtpfad (24a-c) zumindest verringert ist, und wobei der Lichtstrahl gepulst ist, dadurch gekennzeichnet, dass die zumindest eine die Kohärenz beeinflussende optische Anordnung...



Beschreibung

[0001] Die Erfindung betrifft ein optisches System zum Erzeugen eines Lichtstrahls zur Behandlung eines in einer Substratebene angeordneten Substrats, wobei der Lichtstrahl in einer ersten Dimension senkrecht zur Ausbreitungsrichtung des Lichtstrahls eine Strahllänge und in einer zweiten Dimension senkrecht zur ersten Dimension und zur Lichtausbreitungsrichtung eine Strahlbreite aufweist, mit zumindest einer mischenden optischen Anordnung, die den Lichtstrahl in zumindest einer der ersten und zweiten Dimension in eine Mehrzahl von Lichtpfaden aufteilt, die einander überlagert in die Substratebene einfallen, wobei zumindest eine die Kohärenz beeinflussende optische Anordnung im Strahlengang des Lichtstrahls vorhanden ist, die auf den Lichtstrahl so wirkt, dass der Kohärenzgrad des Lichts für zumindest einen Lichtpfadabstand eines Lichtpfades von zumindest einem anderen Lichtpfad zumindest verringert ist, und wobei der Lichtstrahl gepulst ist.

[0002] Ein solches optisches System ist aus DE 11 2005 001 847 T5 bekannt.

[0003] Ein optisches System der eingangs genannten Art wird beispielsweise zum Aufschmelzen von Materialien, insbesondere auf dem Gebiet der lichtinduzierten Kristallisation von Silizium verwendet. Ein spezieller Anwendungsfall ist die Flachbildschirmherstellung, bei der mit einer amorphen Siliziumschicht versehene Substrate mit einem Lichtstrahl behandelt werden, um das Silizium zu kristallisieren. Die verwendeten Substrate weisen dabei relativ große Abmessungen auf, beispielsweise im Bereich von über 30 cm x über 50 cm. Mit einem optischen System der eingangs genannten Art wird entsprechend ein Lichtstrahl erzeugt, der in einer ersten Dimension (die nachfolgend mit X bezeichnet wird) eine Strahllänge aufweist, die etwa der Breite des Substrats (beispielsweise etwa 30 cm) entspricht. In der zur X-Dimension senkrechten Dimension (im Nachfolgenden mit Y bezeichnet), die außerdem senkrecht zur Ausbreitungsrichtung des Lichtstrahls verläuft (die nachfolgend mit Z bezeichnet wird), ist der Lichtstrahl dünn.

[0004] Der so auf das Substrat applizierte Lichtstrahl weist ein großes Verhältnis aus Strahllänge in der X-Dimension und der Strahlbreite in der Y-Dimension auf, das je nach Strahllänge größer als 5.000, sogar größer als 10.000 sein kann.

[0005] Der Lichtstrahl, der zur Behandlung des Substrats dient, muss dabei der Anforderung genügen, dass die Intensitätsverteilung des Lichtstrahls zumindest in der (langen) X-Dimension so homogen wie möglich ist, möglichst aber auch in der kurzen Y-Dimension.

[0006] In dem eingangs genannten Dokument DE 11 2005 001 847 T5 sind ein Verfahren und eine Vorrichtung zur Bildung eines kristallisierten Films mittels Laserlichts offenbart. Ausgehend von einer Laserlichtquelle wird der Lichtstrahl durch ein erstes Linsenarray und ein zweites Linsenarray gerichtet, die jeweils eine mischende optische Anordnung bilden. Dem zweiten Linsenarray ist ein optisches Element nachgeschaltet, das aus einzelnen Teilelementen aufgebaut ist, wobei jeder Linse des zweiten Linsenarrays ein Teilelement nachgeordnet ist. Die einzelnen Teilelemente haben unterschiedliche Längen in Lichtausbreitungsrichtung, um in jedem Lichtpfad, der durch jeweils eine Linse des zweiten Linsenarrays gebildet wird, einen optischen Wegunterschied zu benachbarten Lichtpfaden zu erzeugen. Dies dient dazu, eine Strahlengangsdifferenz zwischen einzelnen Teilstrahlen so zu erzeugen, dass die Kohärenz des Laserlichts so eingestellt werden kann, dass Interferenzerscheinungen und entsprechend Moiréstreifen reduziert oder kontrolliert werden können.

[0007] Ein aus dem Dokument WO 2007/14185 A2 bekanntes optisches System weist eine mischende optische Anordnung auf, die zwei Linsenarrays, wobei jedes Linsenarray eine Mehrzahl von in der X-Dimension nebeneinander angeordneten Linsen, beispielsweise Zylinderlinsen aufweist, und eine Kondensoroptik aufweist. Allgemein dient eine mischende optische Anordnung dazu, das Licht des Lichtstrahls in der Substratebene durch Mischung, d. h. durch Aufteilung des Lichtstrahls in Teilstrahlen und deren Überlagerung zu homogenisieren.

[0008] Zur Vereinfachung des Verständnisses wird nachfolgend der Fall betrachtet, dass die mischende optische Anordnung lediglich eine Homogenisierung des Lichtstrahls in der (langen) X-Dimension bewirkt.

[0009] In [Fig. 1](#) ist das bekannte optische System weiter vereinfacht und mit dem allgemeinen Bezugszeichen 1 versehen dargestellt.

[0010] Das optische System 1 weist eine optische mischende Anordnung 2 auf, die hier zur Vereinfachung der Darstellung ein Linsenarray mit nur drei Einzellinsen 2a, 2b, 2c und eine Kondensoroptik 3 aufweist, de-

ren Brennweite mit f_c bezeichnet ist. Mit dem Bezugszeichen **4** ist eine Substratebene dargestellt, in die die Kondensoroptik **3** fokussiert.

[0011] Ein einfallender Lichtstrahl **5**, der sich in Ausbreitungsrichtung Z ausbreitet, wird durch die mischende optische Anordnung **2** in eine Mehrzahl von Teilstrahlen aufgeteilt, wobei in dem vereinfachten Beispiel, bei dem die mischende optische Anordnung **2** drei Einzellinsen **2a**, **2b**, **2c** aufweist, hier der Lichtstrahl **5** in drei Teilstrahlen aufgeteilt wird, die sich entsprechend entlang von drei Lichtpfaden **6a**, **6b**, **6c** ausbreiten. Der Abstand jeweils benachbarter Lichtpfade **6a**, **6b**, **6c** ist in [Fig. 1](#) mit L bezeichnet. Die einzelnen Teilstrahlen bzw. die Lichtpfade **6a**, **6b**, **6c** werden in der Substratebene **4** durch die Kondensoroptik **3** einander überlagert. Zu einem Feldpunkt in der Substratebene **4** gelangt das Licht somit auf drei Lichtpfaden **6a**, **6b**, **6c**.

[0012] Aufgrund der Aufteilung des Lichtstrahls **5** in mehrere Lichtpfade **6a**, **6b**, **6c** und deren Überlagerung in der Substratebene **4** können in der Substratebene **4** Intensitätskontraste entstehen, die durch Interferenzen zwischen dem Licht aus den verschiedenen Lichtpfaden **6a**, **6b**, **6c** entstehen. In [Fig. 1](#) ist in dem rechten Teilbild die Intensität I gegen die Koordinate x in der Substratebene **4** aufgetragen. Aufgrund von Interferenzerscheinungen ist die Intensität I entsprechend nicht homogen.

[0013] Bei Interferenz je zwei gegeneinander geneigter Teilstrahlen entsteht jeweils ein periodisches Interferenzmuster, die sich dann überlagern. Für den hier gezeigten Fall eines Linsenarrays mit identischen Abständen L benachbarter Linsen sind die auftretenden Interferenzperioden Vielfache voneinander. Zwischen der Interferenzperiode p_n der Interferenz von Licht aus zwei Lichtpfaden mit dem Abstand $n \cdot L$, der Wellenlänge λ und der Brennweite f_c der Kondensoroptik **3** besteht der Zusammenhang:

$$p_n = \frac{\lambda}{nL} f_c \quad (1)$$

[0014] Im Allgemeinen treten in der Substratebene **4** verschiedene Interferenzperioden p_n überlagert auf, die zu verschiedenen vielfachen nL des Lichtfadabstandes L gehören.

[0015] Es sei angemerkt, dass die vorliegende Erfindung nicht auf optische Systeme beschränkt ist, deren zumindest eine mischende optische Anordnung Lichtpfade erzeugt, die von Lichtpfad zu Lichtpfad einen konstanten Lichtfadabstand L aufweisen, sondern auch solche umfasst, bei denen der Lichtfadabstand L von Lichtpfad zu Lichtpfad variieren kann. Im letzten Fall weist das Interferenzmuster dann eine Vielzahl unterschiedlicher Interferenzperioden auf, die sich zu einem unregelmäßigen Muster überlagern.

[0016] Zur Reduzierung von Interferenzkontrasten in der Substratebene **4** wird in der WO 2007/141185 A2 vorgeschlagen, den Lichtstrahl, bevor er auf die mischende optische Anordnung einfällt, in mehrere Teilstrahlen aufzuteilen und die einzelnen Teilstrahlen unter unterschiedlichen Einfallswinkeln auf die mischende optische Anordnung einfallen zu lassen. Durch die unterschiedlichen Einfallswinkel der einzelnen Teilstrahlen auf die mischende optische Anordnung entstehen bei geeigneter Wahl der Einfallswinkel in der Substratebene gegeneinander versetzte Interferenzmuster, die in Summe zu einer in der X -Dimension konstanten Intensität I führen, wenn die einzelnen Teilstrahlen zueinander inkohärent sind.

[0017] Die Aufteilung des einfallenden Lichtstrahls in mehrere nicht parallele Teilstrahlen wird bei dem bekannten optischen System durch Spiegel erreicht, die in einem Pulsverlängerungsmodul angeordnet sind.

[0018] Ein Nachteil des bekannten optischen Systems kann darin gesehen werden, dass es schwierig ist, den Winkelversatz zwischen den einzelnen Teilstrahlen so genau einzustellen, dass die durch die einzelnen Teilstrahlen erzeugten Interferenzmuster um ein ungeradzahliges Vielfaches der halben Interferenzperiode gegeneinander versetzt sind, damit der Interferenzkontrast in der Substratebene verringert bzw. eliminiert wird. Zudem erzeugt ein Pulsverlängerungsmodul der bekannten Art im Allgemeinen eine Vielzahl immer schwächerer Teilstrahlen mit immer größeren Einfallswinkeln, was ebenfalls Schwierigkeiten bereiten kann.

[0019] In dem Dokument EP 0 658 813 A1 ist eine Strahlungsquelle zur Verwendung in einem Interferometer in einem Projektionsobjektiv offenbart. Die Strahlungsquelle weist eine Lichtquelle, einen doppelbrechenden Strahlteiler, zwei akusto-optische Modulatoren (AOM) und einen Strahlkombinierer auf. Bei einem weiteren Ausführungsbeispiel in diesem Dokument ist anstelle von zwei AOMs nur ein AOM vorhanden.

[0020] US 2008/0023447 A1 offenbart ein System zum optischen Bearbeiten von Werkstücken mit zwei Lichtstrahlen. Ein von einem Laser ausgehender Lichtstrahl wird zunächst über einen Strahlteiler in zwei Teilstrah-

len aufgeteilt. Die beiden Teilstrahlen werden jeweils durch einen akusto-optischen Modulator gerichtet und an einem Strahlkombinierer wieder vereint. An einem weiteren Strahlteiler wird der rekombinierte Lichtstrahl wieder in zwei Teilstrahlen aufgeteilt, die dann letztendlich, ohne einander überlagert zu sein, auf ein zu bearbeitendes Werkstück gerichtet werden. Die beiden akusto-optischen Modulatoren dienen dazu, den Kohärenzgrad der beiden Teilstrahlen so weit zu verringern, dass es in den beiden Bearbeitungsstrahlen, die auf das Werkstück einfallen, nicht zu Interferenzerscheinungen kommt, die die Homogenität des Lichts, mit dem das Werkstück bearbeitet wird, beeinträchtigen.

[0021] DE 103 45 784 A1 offenbart einen Kohärenzminderer. Der Kohärenzminderer weist zumindest ein doppelbrechendes Element auf, das ein zugeführtes kohärentes Strahlbündel in mehrere, in senkrecht zueinander liegenden Polarisationsrichtungen polarisierte Teilstrahlbündel so aufteilt, dass die Teilstrahlbündel zueinander in Strahlrichtung und/oder quer zur Strahlrichtung versetzt sind und/oder in unterschiedliche Richtungen propagieren. Zur Reduzierung störender Interferenzerscheinungen weist die optische Anordnung zwei doppelbrechende Plattenstapel auf, wobei die Platten des einen Stapels senkrecht zu den Platten des anderen Stapels orientiert sind. In Lichtausbreitungsrichtung gesehen hinter den Plattenstapeln ist eine optisch mischende Anordnung vorgesehen.

[0022] DE 10 2006 009 212 A1 offenbart eine optische Vorrichtung und ein optisches Verfahren zur Homogenisierung von Laserstrahlen, die zwei hintereinander angeordnete Homogenisierungsmodule und ein dazwischen angeordnetes Kohärenzminderungsmodul aufweist. Zur Homogenisierung der Laserstrahlung wird die Laserstrahlung in lateral zueinander kohärente Teilstrahlen aufgeteilt, und diese werden als kollimierte Teilstrahlen mit unterschiedlichen Ausbreitungsrichtungen zu einem ersten Laserstrahlbündel überlagert, wobei dem ersten Laserstrahlbündel unterschiedliche Phasenverschiebungen in Abhängigkeit der Position im Strahlquerschnitt eingeprägt werden, um somit ein zweites Laserstrahlbündel mit geringerer lateraler Kohärenz zu erzeugen. Das Kohärenzminderungsmodul ist durch zwei Stufenspiegel gebildet, die dem Strahlenbündel unterschiedliche Phasenverschiebungen in x-Richtung und y-Richtung einprägen. Dazu weisen die zwei Stufenspiegel unterschiedliche Stufenhöhen auf. Mit dieser Anordnung soll erreicht werden, dass die gleichzeitig auf die verschiedenen Linsen des Linsenarrays treffende Laserstrahlung zueinander inkohärent ist, so dass die unerwünschte Vielstrahlinterferenz in der Beleuchtungsebene nicht auftritt.

[0023] Der Erfindung liegt die Aufgabe zugrunde, ein optisches System der eingangs genannten Art dahingehend weiterzubilden, dass Interferenzkontraste in der Substratebene auf einfache Weise zumindest verringert werden.

[0024] Erfindungsgemäß wird diese Aufgabe hinsichtlich des eingangs genannten optischen Systems dadurch gelöst, dass die zumindest eine die Kohärenz beeinflussende optische Anordnung zumindest einen akusto-optischen Modulator aufweist, und dass im Strahlengang zumindest ein Pulsverlängerungsmodul angeordnet ist.

[0025] Die Erfindung beruht auf dem Konzept, den lateralen Kohärenzgrad des in das optische System, das zumindest eine mischende optische Anordnung aufweist, die den einfallenden Lichtstrahl in Richtung quer zur Ausbreitungsrichtung des Lichtstrahls in mehrere Lichtpfade aufteilt, einfallenden Lichts zumindest für einen Lichtpfadabstand zu verringern, vorzugsweise auf den Wert Null zu minimieren. Mit anderen Worten zielt die Erfindung darauf ab, die laterale Kohärenz so weit zu reduzieren, dass Licht aus verschiedenen Lichtpfaden weniger oder gar nicht mehr interferenzfähig ist.

[0026] Als Maßnahme zur Verringerung des Kohärenzgrades ist vorgesehen, dass die zumindest eine die Kohärenz beeinflussende optische Anordnung zumindest einen akustooptischen Modulator (AOM) aufweist.

[0027] Ein akusto-optischer Modulator (AOM) weist ein optisches Element auf, in dem beispielsweise durch ein an einem Ende des optischen Elements angeordnetes Piezoelement Schallwellen erzeugt werden. Die Ausbreitungsrichtung der Schallwelle verläuft dabei senkrecht zum einfallenden Lichtstrahl. Durch die Schallwelle wird in dem AOM eine räumliche Modulation des Brechungsindex erzeugt, die sich mit der Geschwindigkeit der Schallwelle bewegt. Das durch den AOM tretende Licht erfährt dadurch eine von der Position und der Zeit abhängige Phasenverschiebung δ , die in Bruchteilen der Wellenlänge angegeben die Form hat:

$$\delta(x, t) = \text{asin}[2\pi(x/\Lambda - f_s t)]$$

[0028] a hängt dabei von der Schallamplitude und der Erstreckung des Schallfeldes in Richtung der optischen Achse ab. Λ ist die Wellenlänge der Schallwelle, und f_s ist die Frequenz der Schallwelle. Bei durch das Material

des AOM festgelegter Schallgeschwindigkeit lässt sich die Wellenlänge Λ durch die Anregungsfrequenz f_s der Schallwelle durch das anregende Element, bspw. Piezoelement, variieren.

[0029] Durch die zeitabhängige Phasenverschiebung kommt es zu einer Dekorrelation des Lichts von unterschiedlichen Orten, wodurch die laterale Kohärenz reduziert wird. Die Reduzierung des Kohärenzgrades und damit die Reduzierung des Interferenzkontrastes für einen Lichtpfadabstand L hängt von der Amplitude a und der Wellenlänge Λ des AOM und vom Lichtpfadabstand L ab.

[0030] Des Weiteren ist vorgesehen, dass im Strahlengang zusätzlich zu dem zumindest einen AOM zumindest ein Pulsverlängerungsmodul angeordnet ist.

[0031] Wie bereits oben erläutert, bewirkt der AOM aufgrund der dynamischen Phasenunterschiede eine Dekorrelation des Lichts an verschiedenen Orten. Diese Dekorrelation ist nur dann vollständig, wenn über möglichst viele Schallperioden mit gleichmäßiger Intensität gemittelt werden kann, wie es insbesondere für einen Laser im Dauerstrichbetrieb der Fall ist. Für einen Kurzpuls laser hingegen, wie einen Excimer-Laser, bei dem die Pulsdauer von beispielsweise 20 ns im Bereich typischer AOM-Frequenzen von beispielsweise 20–100 MHz liegt (Periodendauer 10–50 ns), ist diese Bedingung nicht erfüllt und es treten verbleibende Interferenzkontraste in der Substratebene auf. Durch die vorstehend genannte Maßnahme, im Strahlengang des Lichtstrahls zumindest ein Pulsverlängerungsmodul anzuordnen, wird nun in Kombination mit dem AOM dieser vorstehend genannte Nachteil vermieden. Durch das Pulsverlängerungsmodul werden die einzelnen Lichtpulse des Lichtstrahls verlängert. Dies geschieht beispielsweise dadurch, dass der in das Pulsverlängerungsmodul einfallende Lichtstrahl in zwei Teilstrahlen aufgespalten wird, der eine der beiden Teilstrahlen die Verzögerungsleitung des Pulsverlängerungsmoduls durchläuft und an den anderen Teilstrahl, der die Verzögerungsleitung nicht durchlaufen hat, angereicht wird. Dadurch entsteht ein längerer Puls, dessen Einhüllende noch mit der Pulsdauer des Eingangspulses moduliert ist.

[0032] Es versteht sich, dass eine Mehrzahl von Pulsverlängerungsmodulen vorgesehen sein kann, um die Lichtpulse noch weiter zu verlängern, wenn dies für die Reduzierung von Interferenzkontrasten in der Substratebene nützlich ist.

[0033] Nachfolgend werden weitere bevorzugte Maßnahmen beschrieben, mit denen auf einfache Weise und ohne erhöhten Justageaufwand der Kohärenzgrad des Lichts für zumindest einen Lichtpfadabstand eines Lichtpfades von zumindest einem anderen Lichtpfad zumindest verringert werden kann.

[0034] Eine Maßnahme besteht darin, ein Verhältnis aus lateraler Kohärenzlänge des Lichtstrahls in Richtung quer zu den Lichtpfaden und dem Lichtpfadabstand zumindest zweier benachbarter Lichtpfade zu verringern und vorzugsweise kleiner als 2, weiter vorzugsweise kleiner als 1, einzustellen.

[0035] Wenn die laterale Kohärenzlänge des Lichtstrahls in Richtung quer zu den Lichtpfaden kleiner ist als der Lichtpfadabstand zweier benachbarter Lichtpfade, dann können Teilstrahlen aus diesen beiden Lichtpfaden fast nicht miteinander interferieren, d. h. Interferenzerscheinungen in der Substratebene können dabei fast vollständig vermieden werden. Bei vorgegebener natürlicher lateraler Kohärenzlänge des verwendeten Lichts, beispielsweise Licht eines Excimer-Lasers, kann dies bedingen, den Lichtpfadabstand zu vergrößern, d. h. die zumindest eine mischende optische Anordnung bei vorgegebener Erstreckung des Lichtstrahls quer zur Ausbreitungsrichtung mit weniger mischenden optischen Elementen auszugestalten, was jedoch die Homogenisierungswirkung der mischenden optischen Anordnung verringern würde.

[0036] Bei einer weiteren bevorzugten Maßnahme ist vorgesehen, dass die zumindest eine die Kohärenz beeinflussende optische Anordnung eine Strahlteileranordnung aufweist, die den Lichtstrahl in Richtung quer zu den Lichtpfaden in eine Mehrzahl von seitlich versetzten Teilstrahlen aufteilt, deren Laufwegunterschiede relativ zueinander größer als die zeitliche Kohärenzlänge des Lichts der Teilstrahlen sind.

[0037] Bei dieser Maßnahme werden die durch die Strahlteileranordnung erzeugten mehreren seitlich gegeneinander versetzten Teilstrahlen durch Laufwegunterschiede, die größer sind als die zeitliche Kohärenzlänge des Lichts, voneinander entkoppelt. Bei gleichbleibender lateraler Kohärenzlänge vervielfacht diese Anordnung die Strahlbreite, und dadurch kann das Verhältnis von lateraler Kohärenzlänge zu den Lichtpfadabständen entsprechend reduziert werden. Als Strahlteileranordnungen können halbdurchlässige Spiegel, Prismen (unter Verwendung von innerer Totalreflexion), Versatzplatten oder dergleichen verwendet werden. Im Unterschied zu dem bekannten optischen System können die Teilstrahlen parallel zueinander sein.

[0038] Eine weitere bevorzugte Maßnahme sieht vor, dass die zumindest eine die Kohärenz beeinflussende optische Anordnung eine Kohärenzwandlereinheit aufweist, die eine Strahlteileranordnung, die den Lichtstrahl in einer der beiden Dimensionen in eine Mehrzahl von Teilstrahlen aufteilt, und eine Strahlumsortieranordnung aufweist, die die Teilstrahlen in Richtung der anderen Dimension nebeneinander anordnet.

[0039] Eine solche Kohärenzwandleranordnung, die in der vorliegenden Erfindung verwendet werden kann, ist in dem Dokument DE 10 2006 018 504 A1 beschrieben. Eine solche Kohärenzwandleranordnung bewirkt in der X-Dimension des Lichtstrahls eine Erhöhung der Divergenz und eine entsprechende Verringerung des Kohärenzgrades und der lateralen Kohärenzlänge des Lichts im Verhältnis zur Strahlbreite.

[0040] In einer weiter bevorzugten Ausgestaltung weist die zumindest eine die Kohärenz beeinflussende optische Anordnung zumindest ein optisches Element auf, dessen Lichteintrittsfläche und Lichtaustrittsfläche plan und unter einem Winkel zueinander geneigt sind, wobei das zumindest eine optische Element doppelbrechend ist.

[0041] Die Verwendung von doppelbrechenden Keilen ist an sich aus dem Dokument US 5,253,110 A für das Beleuchtungssystem einer Projektionsbelichtungsanlage für die Mikrolithografie bekannt. In der vorliegenden Erfindung werden jedoch solche doppelbrechenden optischen Elemente, beispielsweise Keile, vorzugsweise in Kombination mit der vorstehend genannten Maßnahme verwendet, dass das Verhältnis von lateraler Kohärenzlänge und dem Lichtpfadabstand zweier benachbarter Lichtpfade so eingestellt wird, dass dieses Verhältnis zumindest kleiner als 2 ist. Mit den doppelbrechenden optischen Elementen kann nämlich eine Interferenzordnung (und ihre ungeradzahigen Vielfachen), insbesondere die erste Interferenzordnung, gezielt unterdrückt werden, wodurch das Verhältnis aus lateraler Kohärenzlänge und Lichtpfadabstand doppelt so groß gewählt werden kann wie ohne solche doppelbrechenden optischen Elemente, was umgekehrt bedeutet, dass bei gleichen Interferenzverhältnissen die Anzahl von Lichtpfaden der zumindest einen mischenden optischen Anordnung doppelt so groß gewählt werden kann, was die Homogenisierungswirkung der zumindest einen mischenden optischen Anordnung verbessert.

[0042] Verbessert werden kann die interferenzunterdrückende Wirkung des zumindest einen doppelbrechenden optischen Elements dadurch, dass der Winkel zwischen der Lichteintrittsfläche und der Lichtaustrittsfläche des optischen Elements so gewählt ist, dass der durch das optische Element eingeführte Phasenunterschied zwischen dem ordentlichen und dem außerordentlichen Teilstrahl für den zumindest einen Lichtpfadabstand ein ungeradzahliges Vielfaches der halben Wellenlänge des Lichtes beträgt.

[0043] Hierdurch werden die durch den ordentlichen und den außerordentlichen Teilstrahl erzeugten Interferenzmuster um eine halbe Wellenlänge gegeneinander versetzt, so dass die Summe der beiden Interferenzmuster ein in der entsprechenden Dimension des Lichtstrahls konstantes Intensitätsprofil ergibt.

[0044] Besonders bevorzugt ist eine Kombination aus der vorstehend genannten zumindest einen Strahlteileranordnung, dem zumindest einen doppelbrechenden Element und der vorstehend genannten Maßnahme der Einstellung des Verhältnisses aus lateraler Kohärenzlänge und Lichtpfadabstand von kleiner als 2, vorzugsweise kleiner als 1. Ebenso kann zusätzlich der vorstehend genannte zumindest eine Kohärenzwandler mit diesen Maßnahmen kombiniert werden.

[0045] Die Kombination dieser Maßnahmen führt zu einer noch wirksameren Verringerung des Kohärenzgrades bzw. Minimierung der Kohärenzfunktion zur Vermeidung von Interferenzkontrasten in der Substratebene.

[0046] Das zumindest eine doppelbrechende optische Element ist in Ausbreitungsrichtung des Lichtstrahls vorzugsweise hinter der zumindest einen mischenden optischen Anordnung angeordnet.

[0047] Eine weitere bevorzugte Maßnahme sieht vor, dass statt einer mischenden Anordnung mehrere hintereinandergeschaltete mischende optische Anordnungen vorhanden sind.

[0048] Hierbei ist von Vorteil, dass die räumliche Periode des Interferenzmusters in der Substratebene verkleinert und die Verwendung eines doppelbrechenden Elements erleichtert wird.

[0049] In einer weiteren Ausgestaltung sind die akustische Wellenlänge Λ und die akustische Amplitude a des AOM so eingestellt, dass die Bedingung $J_0[2asin(\pi L/\Lambda)] \ll 1$ für den zumindest einen Lichtpfadabstand erfüllt ist, wobei J_0 die Besselfunktion 0-ter Ordnung ist.

[0050] Mit Ausnahme des Falls, dass die akustische Wellenlänge Λ gleich dem Lichtpfadabstand L ist, lässt sich die vorstehend genannte Bedingung durch geeignete Schallamplituden a stets erfüllen. Aufgrund der Periodizität des Arguments der Besselfunktion gilt die Bedingung auch für Werte $L + m\Lambda$ und wegen der Symmetrie auch für die Werte $(\Lambda - L) + m\Lambda$, wobei m eine ganze Zahl ist.

[0051] Damit wird bereits durch einen AOM die laterale Kohärenz für eine Vielzahl von Lichtpfadabständen deutlich reduziert. Auch für dazwischen liegende Lichtpfadabstände ist der AOM nicht ohne Wirkung, auch wenn nicht das gleiche Ausmaß der Verringerung erreicht wird.

[0052] Besonders bevorzugt ist es, wenn mehrere AOM vorhanden sind, bei denen die akustische Wellenlänge und/oder die akustische Amplitude von AOM zu AOM unterschiedlich eingestellt sind, um den Kohärenzgrad für mehrere Lichtpfadabstände zumindest zu verringern.

[0053] Alternativ kann zugunsten einer Verringerung der Anzahl an vorzusehenden optischen Baugruppen vorgesehen sein, dass nur ein AOM vorhanden ist, bei dem gleichzeitig mehrere unterschiedliche akustische Wellenlängen mit möglicherweise unterschiedlichen akustischen Amplituden erzeugt werden, um den Kohärenzgrad für mehrere Lichtpfadabstände zumindest zu verringern.

[0054] Es ist weiterhin bevorzugt, wenn die akustische Schallfrequenz des AOM auf die verlängerten Pulse so abgestimmt ist, dass ein Interferenzkontrast in der Bildebene weniger als 10%, vorzugsweise weniger als 5%, weiter vorzugsweise weniger als 1 beträgt.

[0055] Hierbei wird vorteilhafterweise berücksichtigt, dass es auch bei einer Pulsverlängerung akustische Frequenzbereiche des AOM gibt, die zu einem erhöhten Interferenzkontrast in der Substratebene Anlass geben. Diese akustischen Frequenzbereiche korrespondieren zur Umlaufdauer der Pulse im Pulsverlängerungsmodul, das periodische Intensitätsmodulationen erzeugt, die nach Möglichkeit nicht mit der Schallfrequenz zusammenfallen sollen.

[0056] In einer weiteren bevorzugten Ausgestaltung der vorstehend genannten Maßnahme ist die Schallfrequenz f_s des AOM ungleich der Umlauffrequenz der Pulse in dem zumindest einen Pulsverlängerungsmodul und ungleich den ganzzahligen Vielfachen der Umlauffrequenz.

[0057] „Ungleich“ bedeutet hier, dass die Schallfrequenz des AOM so hinreichend verschieden von der Umlauffrequenz in dem einen oder in den mehreren Pulsverlängerungsmodulen ist (und entsprechend auch hinreichend verschieden von den ganzzahligen Vielfachen dieser Umlauffrequenz bzw. Umlauffrequenzen), dass Restkontraste in der Substratebene, die sich durch ein Zusammenfallen der Schallfrequenz mit der Umlauffrequenz ergibt, möglichst vermieden werden. Vorzugsweise unterscheidet sich die Schallfrequenz des AOM von den Umlauffrequenzen und ihren ganzzahligen Vielfachen um jeweils mehr als 10%.

[0058] Durch die vorstehende Maßnahme der Abstimmung der akustischen Schallfrequenz wird erreicht, dass bei der Kombination des AOM mit dem Pulsverlängerungsmodul in der Substratebene Interferenzkontraste so weit wie möglich reduziert sind.

[0059] Auch hier versteht sich wieder, dass die Maßnahme des Vorhandenseins zumindest eines AOM und/oder eines Pulsverlängerungsmoduls mit den oben genannten Maßnahmen (Einstellung des Verhältnisses aus lateraler Kohärenzlänge und Lichtpfadabstand, doppelbrechende optische Elemente, Kohärenzwandler, usw.) kombiniert werden können, um Interferenzerscheinungen im Lichtstrahl in der Substratebene so weit wie möglich zu reduzieren oder ganz zu eliminieren.

[0060] Weitere Vorteile und Merkmale ergeben sich aus der nachfolgenden Beschreibung und der beigefügten Zeichnung.

[0061] Es versteht sich, dass die vorstehend genannten und nachstehend noch zu erläuternden Merkmale nicht nur in der jeweils angegebenen Kombination, sondern auch in anderen Kombinationen oder in Alleinstellung verwendbar sind, ohne den Rahmen der vorliegenden Erfindung zu verlassen.

[0062] Ausführungsbeispiele der Erfindung sind in der Zeichnung dargestellt und werden in Bezug auf diese hiernach näher beschrieben. Es zeigen:

- [0063] [Fig. 1](#) ein optisches System gemäß dem Stand der Technik zur Erläuterung von Interferenzeffekten, die bei dem optischen System auftreten;
- [0064] [Fig. 2](#) ein Basisschema eines erfindungsgemäßen optischen Systems;
- [0065] [Fig. 3a](#)) und [Fig. 3b](#)) zwei Balkendiagramme, die den Anteil verschiedener Interferenzordnungen bei großer Kohärenzlänge ([Fig. 3a](#)) und kleiner Kohärenzlänge ([Fig. 3b](#)) zeigen;
- [0066] [Fig. 4](#) ein Ausführungsbeispiel einer Maßnahme zur Unterdrückung von Interferenzeffekten in dem optischen System in [Fig. 2](#) durch Vorsehen eines doppelbrechenden Elements;
- [0067] [Fig. 5a](#)) bis [c](#)) drei Balkendiagramme, die den Einfluss des Verhältnisses aus lateraler Kohärenzlänge und Lichtpfadabstand einer mischenden optischen Anordnung mit und ohne doppelbrechendes optisches Element in [Fig. 4](#) zeigen;
- [0068] [Fig. 6](#) eine Abwandlung des Ausführungsbeispiels in [Fig. 4](#);
- [0069] [Fig. 7](#) ein weiteres Ausführungsbeispiel einer Maßnahme zur Verringerung von Interferenzeffekten des optischen Systems in [Fig. 2](#);
- [0070] [Fig. 8](#) ein noch weiteres Ausführungsbeispiel ähnlich zu [Fig. 7](#) einer Maßnahme zur Verringerung von Interferenzeffekten des optischen Systems in [Fig. 2](#);
- [0071] [Fig. 9](#) ein weiteres Ausführungsbeispiel einer Maßnahme zur Verringerung von Interferenzeffekten des optischen Systems in [Fig. 2](#);
- [0072] [Fig. 10](#) ein Diagramm, das drei Lichtpulsformen zeigt;
- [0073] [Fig. 11](#) ein Diagramm, das die Abhängigkeit von Interferenzeffekten in Abhängigkeit von der akustischen Frequenz eines akusto-optischen Modulators gemäß [Fig. 9](#) für die Pulsformen in [Fig. 10](#) veranschaulicht;
- [0074] [Fig. 12](#) einen vergrößerten Ausschnitt des Diagramms in [Fig. 11](#);
- [0075] [Fig. 13](#) ein Beispiel einer Kohärenzfunktion des optischen Systems in [Fig. 2](#), wenn keine Maßnahmen zur Interferenzverringern vorgesehen sind;
- [0076] [Fig. 14](#) bis [Fig. 21](#) verschiedene Kohärenzfunktionen, wobei mit unterbrochenen Linien die Kohärenzfunktion gemäß [Fig. 13](#) und mit durchgezogenen Linien die Kohärenzfunktionen dargestellt sind, wie sie durch verschiedene Maßnahmen zur Interferenzverringern gegenüber der Kohärenzfunktion gemäß [Fig. 13](#) beeinflusst werden.
- [0077] In [Fig. 2](#) ist ein mit dem allgemeinen Bezugszeichen **10** versehenes optisches System zum Erzeugen eines Lichtstrahls zur Behandlung eines Substrats schematisch dargestellt.
- [0078] Das System **10** wird insbesondere in einer Anlage zum flächigen Aufschmelzen von Schichten auf Substraten mittels eines Lichtstrahls verwendet. Spezieller wird das optische System **10** in einer Anlage zur Kristallisation von Siliziumschichten aus amorphem Silizium für die Flachbildschirmherstellung verwendet.
- [0079] Das optische System **10** ist in einer solchen Anlage zum flächigen Aufschmelzen von Schichten auf Substraten ein Bestandteil eines optischen Gesamtsystems, das neben dem optischen System **10** noch weitere nicht dargestellte optische Einheiten aufweist, beispielsweise eine Lichtquelle, insbesondere einen Laser, Strahlaufweitungsoptiken und dergleichen. Das optische System **10** gemäß [Fig. 2](#) kann in einem solchen optischen Gesamtsystem in Lichtausbreitungsrichtung gesehen die letzte optisch wirksame Einheit vor dem Substrat sein, wie hier dargestellt. Das System **10** ist entsprechend in Lichtaufweitungsrichtung gesehen von einer gedachten Lichteintrittsebene **12** des Lichteintritts in das optische System **10** bis zu einer Substratebene **14** gezeigt, in der sich ein nicht dargestelltes Substrat befindet.
- [0080] Das optische System **10** ist dazu ausgelegt, in der Substratebene **14** einen Lichtstrahl zu erzeugen, der in einer ersten Dimension, die nachfolgend als X-Dimension bezeichnet wird, eine Strahllänge L_x und in einer

zweiten Dimension, die nachfolgend als Y-Dimension bezeichnet wird, eine Strahlbreite aufweist, wobei die Y-Dimension senkrecht zur Zeichenebene von [Fig. 2](#) steht. Die Strahllänge L ist dabei sehr viel größer als die Strahlbreite. Die Strahllänge L_s beträgt mehr als 100 mm, beispielsweise etwa 300 mm, und die Strahlbreite beträgt weniger als 50 μm .

[0081] In [Fig. 2](#) ist die Lichtausbreitungsrichtung, die sowohl senkrecht zur X-Dimension, als auch senkrecht zur Y-Dimension verläuft, mit Z bezeichnet. In [Fig. 2](#), die das optische System **10** in der XZ-Ebene zeigt, ist ferner ein Koordinatenkreuz **16** zur Veranschaulichung eingezeichnet.

[0082] Das optische System **10** weist eine erste mischende optische Anordnung **18** auf. Die mischende optische Anordnung **18** weist ein optisches Element **20** auf. Das optische Element **20** teilt den einfallenden Lichtstrahl in der X-Dimension in eine Mehrzahl von nebeneinander angeordneten Lichtkanälen oder Lichtpfaden **24a–c** auf, wobei in dem gezeigten Ausführungsbeispiel zur Vereinfachung der Darstellung nur drei solcher Lichtpfade **24a–c** gezeigt sind.

[0083] Das optische Element **20** ist in Form eines Zylinderlinsenarrays ausgebildet, wobei sich die jeweiligen Zylinderachsen der einzelnen Zylinderlinsen in der Y-Dimension, also senkrecht zur Zeichenebene in [Fig. 2](#) erstrecken. Anstelle eines einzelnen Zylinderlinsenarrays kann auch ein aus zwei Zylinderlinsenarrays aufgebauter Wabenkondensator verwendet werden.

[0084] In [Fig. 2](#) sind die einzelnen Linsen als bikonvexe Zylinderlinsen dargestellt, wobei es sich versteht, dass die Linsen auch andere Formen, wie beispielsweise plankonvex, aufweisen können.

[0085] Die Lichtpfade **24a–c** des optischen Elements **20** teilen den in das optische Element **20** einfallenden Lichtstrahl in der X-Dimension in eine Mehrzahl von Teilfeldern auf, wobei in [Fig. 2](#) drei Teilfelder **28a**, **28b** und **28c** beispielhaft dargestellt sind.

[0086] Die erste optische Anordnung **18** weist außer dem Zylinderlinsenarray noch eine zusätzliche Kondensoroptik **30** auf.

[0087] Das optische System **10** weist eine weitere mischende optische Anordnung **36** auf, die der mischenden optischen Anordnung **18** vorgeschaltet ist, und die ein diffraktives oder streuendes optisches Element **38** und eine Kondensoroptik **40** aufweist, wobei die optische Anordnung **36** den einfallenden Lichtstrahl bereits vorgemischt auf die mischende optische Anordnung **18** richtet.

[0088] Ferner weist das optische System **10** eine optische Anordnung **46** auf, die auf den Lichtstrahl nur in der Y-Dimension wirkt, um den Lichtstrahl mit geringer Strahlbreite in der Substratebene **14** zu fokussieren.

[0089] In Bezug auf die mischende optische Anordnung **18** gilt, wie bereits oben mit Bezug auf [Fig. 1](#) erläutert wurde, dass bei Aufteilung des auf die mischende optische Anordnung **18** einfallenden Lichtstrahls in eine Mehrzahl von Teilstrahlen gemäß der Lichtpfade **24a–c** in der Substratebene **14** in der X-Dimension Interferenzeffekte auftreten können, die zu einem Interferenzkontrast im linienförmigen Lichtstrahl in der Substratebene **14** führen.

[0090] Nachfolgend werden verschiedene Maßnahmen beschrieben, um solche Interferenzerscheinungen bzw. Interferenzkontraste in der Substratebene **14** zumindest zu verringern, wenn nicht sogar zu eliminieren.

[0091] Die Erfindung beruht auf dem Konzept, zumindest eine die Kohärenz beeinflussende optische Anordnung im Strahlengang des Lichtstrahls vorzusehen, die auf den Lichtstrahl so wirkt, dass der Kohärenzgrad des Lichts für zumindest einen Lichtpfadabstand eines Lichtpfades von zumindest einem anderen Lichtpfad zumindest verringert wird.

[0092] Bevor auf die verschiedenen Maßnahmen zur Interferenzkontrastverringering im Einzelnen eingegangen wird, werden nachfolgend die Begriffe "laterale Kohärenzlänge" und "Kohärenzfunktion" erläutert.

[0093] In [Fig. 13](#) ist der Verlauf einer typischen Kohärenzfunktion dargestellt. Auf der Abszisse ist der Abstand L in beliebigen Einheiten aufgetragen. Als Einheit kann beispielsweise der Lichtpfadabstand einzelner der Lichtpfade **24a–c** der mischenden optischen Anordnung **18** in [Fig. 2](#) untereinander gewählt werden. Ein Abstand von $L = 2$ bedeutet dann den Abstand eines Lichtpfades von dem übernächsten Lichtpfad zu einer Seite des betrachteten Lichtpfades.

[0094] Auf der Ordinate ist der Kohärenzgrad angegeben, der Werte zwischen 0 und 1 (0% und 100%) annehmen kann. Der Wert 1 bedeutet vollständige Kohärenz, und der Wert 0 bedeutet vollständige Inkohärenz.

[0095] Ohne Beschränkung der Allgemeinheit wird hier die laterale Kohärenz in der X-Dimension betrachtet, wobei im Fall, dass das mischende optische System **18** auch eine Mischung in der Y-Dimension vornimmt oder eine entsprechende mischende optische Anordnung zusätzlich zur Anordnung **18** vorgesehen ist, Gleiches gilt.

[0096] Die beispielhafte Kohärenzfunktion gemäß **Fig. 13** hat ein etwa Gauss-förmiges Profil. Alle nachfolgenden Ausführungen sind gleichermaßen auf andere, insbesondere nicht Gauss-förmige, nicht monoton fallende oder auch auf solche Kohärenzfunktionen übertragbar, die bereits Minima oder Nullstellen aufweisen.

[0097] Unter Kohärenzlänge wird der Abstand L verstanden, bei dem der Kohärenzgrad K auf einen vorbestimmten Wert abfällt. Ohne Beschränkung der Allgemeinheit wird in der vorliegenden Beschreibung als Kohärenzlänge der Abstand L betrachtet, bei dem der Kohärenzgrad K auf einen Wert von 10% (0,1) abgefallen ist. In **Fig. 13** ist dies bei einem Abstand $L = 3$ der Fall.

[0098] Die nachfolgend zu beschreibenden Maßnahmen zielen darauf ab, die laterale Kohärenzlänge zu verringern.

[0099] Eine erste Maßnahme besteht darin, das Verhältnis aus lateraler Kohärenzlänge des Lichtstrahls und dem Lichtpfadabstand (Abstand L) so einzustellen, dass das Verhältnis kleiner als 2, vorzugsweise kleiner als 1 ist.

[0100] Wird das Verhältnis aus lateraler Kohärenzlänge des Lichtstrahls in Richtung quer zu den Lichtpfaden **24a–c** und dem Lichtpfadabstand L zweier benachbarter Lichtpfade kleiner als 1 eingestellt, so können Interferenzerscheinungen beinahe vollständig vermieden werden. In diesem Fall können nämlich benachbarte der Lichtpfade **24a–c** nicht oder allenfalls in geringem Ausmaß miteinander interferieren.

[0101] In **Fig. 3a)** ist der Beitrag, den die verschiedenen Interferenzperioden P_n zum gesamten Interferenzkontrast liefern, in Abhängigkeit der Lichtpfade n , für den Fall einer großen Kohärenzlänge dargestellt, während in **Fig. 3b)** der Beitrag der verschiedenen Interferenzperioden P_n für den Fall einer kleinen Kohärenzlänge dargestellt ist. Durch Verkleinerung der lateralen Kohärenzlänge lässt sich somit der Anteil der Interferenzen weitgehend reduzieren.

[0102] In **Fig. 4** ist eine die Kohärenz beeinflussende optische Anordnung **50** dargestellt. Die optische Anordnung **50** weist hier ein doppelbrechendes optisches Element **52** auf, dessen Lichteintrittsfläche **50** und Lichtaustrittsfläche **56** plan und unter einem Winkel zueinander geneigt sind.

[0103] Das doppelbrechende optische Element **52** teilt den in die Lichteintrittsfläche **54** einfallenden Lichtstrahl in einen ordentlichen und einen außerordentlichen Lichtstrahl auf, wobei der ordentliche Lichtstrahl hier mit durchgezogenen und der außerordentliche Lichtstrahl mit unterbrochenen Linien dargestellt ist. Der Winkel zwischen der Lichteintrittsfläche **54** und der Lichtaustrittsfläche **56** wird nun so gewählt, dass der durch das optische Element **52** eingeführte Phasenunterschied zwischen dem ordentlichen und dem außerordentlichen Teilstrahl für zumindest einen Lichtpfadabstand ein ungeradzahliges Vielfaches der halben Wellenlänge des Lichts des Lichtstrahls beträgt. Auf diese Weise werden die Interferenzstreifen, die von dem ordentlichen Teilstrahl erzeugt werden, und die Interferenzstreifen, die von dem außerordentlichen Teilstrahl erzeugt werden, um eine halbe Interferenzperiode gegeneinander versetzt, so dass sich die Intensitäten der Lichtstrahlen in der X-Dimension in der Substratebene **14** aufgrund ihrer Inkohärenz zueinander zu einer homogenen Intensitätsverteilung I addieren.

[0104] Hierbei ist es bevorzugt, die räumliche Orientierung des Kristalls des doppelbrechenden Elements **52** so zu wählen, dass die Intensitäten des ordentlichen und außerordentlichen Strahls möglichst gleich sind, damit die gegeneinander versetzten Interferenzmuster sich gerade aufheben. Dies ist dann erfüllt, wenn die Kristallachsen in der XY-Ebene unter einem Winkel von 45° zur Polarisationssebene des Lichts stehen.

[0105] **Fig. 5a)** zeigt ein Balkendiagramm, dass die Anteile P_n der verschiedenen Interferenzordnungen n für den Fall zeigt, dass die laterale Kohärenzlänge kleiner oder gleich dem Lichtpfadabstand benachbarter Lichtpfade **24'** der mischenden optischen Anordnung **18'** ist. Interferenzerscheinungen werden durch die Wahl einer solchen kleinen lateralen Kohärenzlänge gut unterdrückt. **Fig. 5b)** zeigt den Fall, dass die laterale Kohärenzlänge nur kleiner oder gleich dem Zweifachen des Lichtpfadabstandes benachbarter Lichtpfade ist. In diesem

Fall ist der Beitrag der ersten Interferenzordnung P_1 noch groß, und erst der Beitrag von P_2 und aller weiteren Interferenzordnungen P_n mit $n > 2$ sind unterdrückt. **Fig. 5c)** zeigt nun den Fall, dass die laterale Kohärenzlänge kleiner oder gleich des Zweifachen des Lichtpfadabstandes benachbarter Lichtpfade ist, wobei zusätzlich das doppelbrechende optische Element **52** im Strahlengang vorhanden ist. Mit unterbrochenen Linien in **Fig. 5c)** ist der Beitrag von P_1 gemäß **Fig. 5b)** dargestellt, und mit durchgezogenen Linien ist der Beitrag von P_1 bei Verwendung des doppelbrechenden optischen Elements **52** gezeigt.

[0106] Es ergibt sich aus **Fig. 5c)**, dass durch Verwendung zumindest eines doppelbrechenden optischen Elements **52** mit nicht planparallelen Lichteintritts- und Lichtaustrittsflächen eine Interferenzordnung (und ihre ungeraden Vielfachen), insbesondere die erste (P_1) gezielt unterdrückt werden können. Dies ermöglicht es, die laterale Kohärenzlänge im Verhältnis zum Lichtpfadabstand oder umgekehrt die Zahl der Lichtpfade größer wählen zu können wie ohne solche doppelbrechenden optischen Elemente.

[0107] In **Fig. 6** ist ein gegenüber **Fig. 4** abgewandeltes Ausführungsbeispiel dargestellt, bei dem eine die Kohärenz beeinflussende optische Anordnung **50'** ein doppelbrechendes optisches Element **52'** mit nicht planparalleler Lichteintrittsfläche **54'** und Lichtaustrittsfläche **56** aufweist. Im Unterschied zu dem Ausführungsbeispiel gemäß **Fig. 4** sind zwei mischende optische Anordnungen **18''** und **36''** ähnlich zu **Fig. 2** vorhanden.

[0108] Die Verwendung einer Mehrzahl mischender optischer Anordnungen hat den Vorteil, dass der Lichtpfadabstand L insbesondere bei dem in Ausbreitungsrichtung des Lichtstrahls zweiten mischenden optischen Element **20''** größer gewählt werden kann, wodurch die Interferenzperioden in der Substratebene **14''** entsprechend kleiner werden und ebenso der Winkel zwischen der Lichteintrittsfläche **54'** und der Lichtaustrittsfläche **56'** des doppelbrechenden optischen Elements **52'** kleiner gewählt werden kann. Trotz größerem Lichtpfadabstand L wird durch die mehrstufige Mischung eine höhere Mischungswirkung erreicht, und die Interferenzmuster des ordentlichen und außerordentlichen Teilstrahls werden in der Substratebene **14''** weniger gegeneinander versetzt, außerdem werden chromatische Fehler reduziert und die Anforderungen an die Justagegenauigkeiten des optischen Systems herabgesetzt.

[0109] Während das doppelbrechende optische Element **52** in **Fig. 4** und das doppelbrechende optische Element **52'** in **Fig. 6** jeweils zwischen dem Zylinderlinsenarray **20'** bzw. **22''** und einer nachfolgenden Kondensoroptik **40'** bzw. **40''** angeordnet ist, können die doppelbrechenden optischen Elemente auch an anderen Stellen im Strahlengang des Lichtstrahls angeordnet sein, beispielsweise auch vor der jeweils mischenden optischen Anordnung **18'** bzw. **18''** oder auch vollständig hinter dieser, also hinter den Kondensoroptiken **40'** und **40''**.

[0110] Des Weiteren können in dem optischen System **10** in **Fig. 2** zwei oder mehr solcher doppelbrechender optischer Elemente **52** bzw. **52'** verwendet werden, wenn dies für die Reduzierung von Interferenzkontrasten in der Substratebene **14** vorteilhaft ist.

[0111] Eine weitere Maßnahme zur Reduzierung von Interferenzkontrasten in der Substratebene **14**, die alternativ oder zusätzlich zu den vorstehend beschriebenen Maßnahmen in dem optischen System **10** in **Fig. 2** vorgesehen sind, ist in **Fig. 7** und **Fig. 8** dargestellt.

[0112] **Fig. 7** zeigt eine die Kohärenz beeinflussende optische Anordnung **60**, die eine Strahlteileranordnung **62** aufweist. Die Strahlteileranordnung **62**, die beispielsweise einen teildurchlässigen Spiegel **64** aufweist, teilt den Lichtstrahl in Richtung quer zu den Lichtpfaden **24** bzw. **26** (also in der X-Dimension) in eine Mehrzahl von seitlich versetzten parallelen Teilstrahlen **66**, **68** auf, wobei der Laufwegunterschied der Teilstrahlen **66** und **68** relativ zueinander größer als die zeitliche Kohärenzlänge des Lichts der Teilstrahlen **66**, **68** ist. In dem Ausführungsbeispiel gemäß **Fig. 7** bewirkt die Strahlteileranordnung **62** eine Aufteilung des Lichtstrahls in zwei Teilstrahlen **66**, **68**. Der Teilstrahl **68** entsteht durch Reflexion des einfallenden Lichtstrahls an dem teildurchlässigen Spiegel **64** und Reflexion an einem vollständig reflektierenden Spiegel **66**. Die Teilstrahlen **66** und **68** sind durch die optische Anordnung **60** in der X-Dimension seitlich nebeneinander gesetzt. Das Aufteilen des einfallenden Lichtstrahls in mehrere seitlich nebeneinander gesetzte Teilstrahlen **66**, **68** bewirkt, dass das Verhältnis von lateraler Kohärenzlänge zum Strahldurchmesser des gesamten Strahls reduziert wird, und ebenso wird das Verhältnis aus lateraler Kohärenzlänge und Lichtpfadabstand verkleinert, bei gleicher Gesamtzahl der Lichtpfade.

[0113] **Fig. 8** zeigt eine gegenüber **Fig. 7** abgewandelte die Kohärenz beeinflussende optische Anordnung **60**, bei der der einfallende Lichtstrahl in drei Teilstrahlen **66'**, **68'** und **70'** aufgeteilt wird, wodurch die laterale Kohärenzlänge im Verhältnis zu den Lichtpfadabständen der Lichtpfade **24** noch weiter verringert werden kann.

[0114] Unter Umständen ist es von Vorteil, einen durch die optische Anordnung **60** bzw. **60'** eingeführten seitlichen Strahlversatz zu korrigieren, wie in [Abb. 8](#) mit einer Anordnung **63** dargestellt ist.

[0115] Die optischen Anordnungen **60** bzw. **60** können in dem optischen System **10** beispielsweise vor der Lichteintrittsebene **12** angeordnet sein.

[0116] Anstelle von teildurchlässigen Spiegeln können solche Strahlteileranordnungen auch Platten, Prismen (unter Verwendung von innerer Totalreflexion) und/oder Strahlteilerschichten verwenden.

[0117] Insbesondere kann die optische Anordnung **60** bzw. **60'** auch als planparallele, gegen den Strahl geneigte Platte ausgebildet sein, durch die der Teilstrahl **66** hindurchtritt, während der Teilstrahl **68** im Inneren der Platte zweimal reflektiert wird. Weitere Teilstrahlen können durch mehrfache Reflexion erzeugt werden. Hierbei ist es von Vorteil, wenn die verschiedenen Bereiche der Platte Beschichtungen mit unterschiedlicher, jeweils angepasster Reflektivität aufweisen, so dass die Teilstrahlen die gleiche Intensität aufweisen.

[0118] Eine weitere Maßnahme zur Reduzierung der lateralen Kohärenzlänge besteht darin, eine die Kohärenz beeinflussende optische Anordnung (nicht dargestellt) in dem Strahlengang des Lichtstrahls anzuordnen, die eine Kohärenzwandleranordnung gemäß DE 10 2006 018 504 A1 aufweist. Eine solche Kohärenzwandleranordnung weist ebenfalls eine Strahlteileranordnung auf, die den einfallenden Lichtstrahl in der X-Dimension in eine Mehrzahl von Teilstrahlen aufteilt, und außerdem eine Strahlumsortieranordnung, die die Teilstrahlen dann in Richtung der anderen Dimension nebeneinander anordnet. Anschließend findet eine Komprimierung des Lichtstrahls in der letzteren Dimension und eine Aufweitung in der ersteren Dimension statt. Zur genaueren Beschreibung einer solchen Kohärenzwandleranordnung wird auf das vorstehend genannte Dokument verwiesen, dessen Offenbarung durch Bezugnahme in der vorliegenden Offenbarung inbegriffen ist.

[0119] Mit Bezug auf [Fig. 9](#) werden weitere Maßnahmen zur Verringerung von Interferenzkontrasten in der Substratebene **14** des optischen Systems **10** in [Fig. 2](#) beschrieben. Die nachfolgend beschriebenen Maßnahmen können alternativ oder kumulativ zu den bereits vorstehend beschriebenen Maßnahmen verwendet werden.

[0120] In [Fig. 9](#) ist eine die Kohärenz beeinflussende optische Anordnung **70** dargestellt, die einen akustooptischen Modulator (AOM) **72** aufweist. Der AOM **72** weist ein optisches Element **74**, bspw. eine Platte, auf, in dem eine Schallwelle **76** erzeugt wird, die sich quer zum einfallenden Lichtstrahl **78** in dem optischen Element **74** ausbreitet, wie mit einem Pfeil **80** veranschaulicht ist. Die Schallwelle **76** kann bspw. durch einen an einem Ende **82** angeordneten Piezoaktuator (nicht dargestellt) erzeugt werden. Die sich durch das optische Element **74** ausbreitende Schallwelle **76** bewirkt, dass das optische Element **74** als Beugungs- bzw. Phasengitter für den einfallenden Lichtstrahl **78** wirkt. Die Schallwelle **76** kann bspw. eine akustische Frequenz f_s im Ultraschallbereich von etwa 5 MHz bis 1 GHz aufweisen.

[0121] Beim Durchlaufen der Schallwelle **76** durch das optische Element **74** bewirkt diese eine periodische Dichtemodulation und damit eine periodische Brechzahlmodulation im optischen Element **74**, die die Wirkung des vorstehend genannten Beugungs- bzw. Phasengitters erzeugt. Das durch den AOM **72** tretende Licht erfährt dadurch eine von der Position und der Zeit abhängige Phasenverschiebung δ , die in Bruchteilen der optischen Wellenlänge angegeben die Form hat:

$$\delta(x, t) = a \sin[2\pi(x/\Lambda - f_s t)]. \quad (2)$$

[0122] a hängt dabei von der Schallamplitude und der Erstreckung des Schallfeldes in Richtung der optischen Achse ab. Λ bezeichnet die Wellenlänge der Schallwelle, f_s die Frequenz der Schallwelle.

[0123] Durch die zeitabhängige Phasenverschiebung kommt es zu einer Dekorrelation des Lichts von unterschiedlichen Orten, wodurch die laterale Kohärenz reduziert wird.

[0124] Die Reduzierung des Kohärenzgrades und damit die Reduzierung des Interferenzkontrastes für einen Lichtpfadabstand L hängt von der Amplitude a und der Wellenlänge Λ des AOM **72** und vom Lichtpfadabstand L ab.

[0125] Der AOM **72** ist nun im Zusammenwirken mit der mischenden optischen Anordnung **18** in [Fig. 2](#), die den auf die mischende optische Anordnung **18** einfallenden Lichtstrahl in eine Mehrzahl von Teilfeldern **28a**, **28b**, **28c** aufteilt, die in der Substratebene **14** einander überlagert sind, in Bezug auf die Lichtpfade **24** bzw.

26 so ausgelegt, dass die laterale Kohärenz für den Abstand dieser Lichtpfade verringert und Interferenzen entsprechend reduziert werden.

[0126] Insbesondere ist die akustische Wellenlänge Λ und die akustische Amplitude a des AOM **72** so einstellbar bzw. eingestellt, dass die Bedingung

$$J_0[|2a \sin(\pi L/\Lambda)|] \ll 1 \tag{3}$$

für zumindest einen Lichtpfadabstand L erfüllt ist, wobei J_0 die Besselfunktion 0-ter Ordnung ist.

[0127] Mit der Definition $x_0 = |2a \sin(\pi L/\Lambda)|$ liegen die Nullstellen der Besselfunktion J_0 bei $x_0 = 2,40483, 5, 52008, 8,65373, 11,7915, \dots$

[0128] Wenn nicht gerade $L = \Lambda$ gilt, so lässt sich die Bedingung (3) durch geeignete Wahl der Amplitude a der Schallwelle **76** stets erfüllen. Aufgrund der Periodizität des Sinus gilt die Bedingung ebenfalls für Werte $L + m\Lambda$ und aufgrund der Symmetrie auch für $(\Lambda - L) + m\Lambda$. Besonders bevorzugt sind die Fälle, bei denen die Bedingung (3) darüber hinaus für weitere Lichtpfadabstände L erfüllt ist oder das Integral zumindest ein Wert $\ll 1$ hat:

a	L/Λ	$J_0[2a \sin(\pi L/\Lambda)]$
$\frac{x_0}{2}$	$\frac{1}{2} + m$	0
$\frac{x_0}{\sqrt{3}}$	$\frac{1}{3} + m$	0
$\frac{x_0}{\sqrt{3}}$	$\frac{2}{3} + m$	0
$1,92 x_0$	$\frac{1}{5} + m$	0,033
$1,92 x_0$	$\frac{2}{5} + m$	0,033
$1,92 x_0$	$\frac{3}{4} + m$	0,033
$1,92 x_0$	$\frac{4}{5} + m$	0,033

[0129] Spezialfälle der Bedingung (3) werden später noch mit Bezug auf [Fig. 17](#) und [Fig. 18](#) beschrieben.

[0130] Möglich sind bei gleicher Wirkung auch teilerfremde Vielfache des Verhältnisses L/Λ und entsprechende größere Frequenzen f_s des AOM **72** sowie entsprechend größere Amplituden, die zu weiteren Nullstellen X_0 der Besselfunktion J_0 gehören. Die Auslegung des AOM **72** ist jedoch nicht auf diese Fälle beschränkt, vielmehr gibt es eine Vielzahl von Kombinationen von Frequenzen f_s und Amplituden a des AOM **72**, die eine oder mehrere Interferenzordnungen in der Substratebene **14** deutlich reduzieren.

[0131] Um hier ein Optimum zu finden, ist die akustische Wellenlänge Λ und/oder die akustische Amplitude a des AOM **72** einstellbar, um die o. g. Bedingung (3) so gut wie möglich zu erfüllen.

[0132] Insbesondere ist aber der gesamte Bereich nützlich, in dem die Bedingung

$$\sin(\pi L/\Lambda) > 0,75 \tag{4}$$

für einen bestimmten oder typischen Lichtpfadabstand L erfüllt ist.

[0133] Wenn die vorstehend genannte Bedingung erfüllt ist, ist die Besselfunktion $J_0 < 0,5$.

[0134] Wieder mit Bezug auf [Fig. 9](#) wird nun ein weiterer Aspekt des optischen Systems **10** für den Fall beschrieben, dass der von einer nicht dargestellten Lichtquelle, beispielsweise einem Laser, erzeugte Lichtstrahl

84 gepulst ist, d. h. aus einer Abfolge einzelner Lichtpulse besteht. In [Fig. 9](#) ist ein solcher Lichtpuls **86** schematisch dargestellt.

[0135] Wie bereits oben erläutert, bewirkt der AOM **72** aufgrund der dynamischen Phasenunterschiede eine Dekorrelation des Lichts an verschiedenen Orten. Diese Dekorrelation ist nur dann vollständig, wenn über möglichst viele Schallperioden mit gleichmäßiger Intensität gemittelt werden kann, wie es insbesondere für einen Laser im Dauerstrichbetrieb der Fall ist. Für einen Kurzpulslaser hingegen, wie einen Excimer-Laser, bei dem die Pulsdauer von beispielsweise 20 ns im Bereich typischer AOM-Frequenzen von beispielsweise 20–100 MHz liegt (Periodendauer 10–50 ns), ist diese Bedingung nicht erfüllt und es ergibt sich somit ein verbleibender Interferenzkontrast in der Substratebene **14**.

[0136] Zur Vermeidung solcher Interferenzkontraste in der Substratebene **14** ist der AOM **72** gemäß [Fig. 9](#) daher mit einem Pulsverlängerungsmodul **88** kombiniert. Das Pulsverlängerungsmodul **88** ist hier schematisch und nur beispielhaft als Anordnung von vier Spiegeln **90, 92, 94, 96** dargestellt. Jede andere Bauart des Pulsverlängerungsmoduls **88**, insbesondere solche, wie sie an sich bekannt sind, können hier verwendet werden. Das Pulsverlängerungsmodul **88** weist eingangsseitig einen Strahlteiler **98**, beispielsweise einen halbdurchlässigen Spiegel, auf, der den einfallenden Lichtstrahl **84** in einen ersten (reflektierten) Teilstrahl **100** und einen (durchgelassenen) zweiten Teilstrahl **102** aufteilt. Während der Teilstrahl **102** durch das Pulsverlängerungsmodul **88** auf kurzem Weg hindurchtritt, durchläuft der Teilstrahl **100** die durch die Spiegel **90, 92, 94, 96** gebildete Verzögerungsstrecke und wird nach erneutem Auftreffen auf den Strahlteiler **98** aus dem Pulsverzögerungsmodul **88** mit dem anderen Teilstrahl **102** ausgekoppelt. Durch entsprechende Bemessung der durch die Spiegel **90, 92, 94, 96** definierten Verzögerungsstrecke reiht sich der Lichtpuls, der die Verzögerungsstrecke durchlaufen hat, unmittelbar an einen Lichtpuls an, der die Verzögerungsstrecke nicht durchlaufen hat, wodurch ein Lichtpuls **104** entsteht, der etwa doppelt so lang ist wie der Lichtpuls **86**.

[0137] In [Fig. 10](#) ist die Intensität I des Lichtpulses **104** gegen die Zeit t aufgetragen. Gegenüber dem Lichtpuls **86** klingt die Intensität des Pulses **104** langsamer ab. Außerdem weist die Intensität des Lichtpulses **104** eine Modulation mit einer charakteristischen Zeitskala auf, die der Umlaufdauer des Pulses **100** im Pulsverlängerungsmodul **88** entspricht.

[0138] Es versteht sich, dass anstelle nur eines Pulsverlängerungsmoduls **88** eine Mehrzahl von Pulsverlängerungsmodulen, die in Reihe geschaltet sind, vorgesehen sein kann. In [Fig. 10](#) ist die Intensität eines Lichtpulses **106** dargestellt, der aus dem ursprünglichen Lichtpuls **86** nach Durchgang durch drei nacheinander angeordnete Pulsverlängerungsmodule geformt worden ist. Auch hier zeigt sich in der Einhüllenden der Intensität eine Modulation.

[0139] Die Kombination aus dem zumindest einen Pulsverlängerungsmodul **88** und dem AOM **72** wird nun vorteilhafterweise dazu verwendet, den durch Interferenzen verursachten Kontrast in der Substratebene **14** zu verringern. Dazu wird die akustische Frequenz f_s bzw. deren ganzzahlige Vielfache $n \cdot f_s$ auf die verlängerten Pulse so abgestimmt, dass der durch Interferenzen in der Bildebene verursachte Bildkontrast weniger als 10%, vorzugsweise weniger als 5%, weiter vorzugsweise weniger als 1% beträgt.

[0140] Um den Effekt der Pulsverlängerung auf den Interferenzkontrast in der Substratebene **14** zu veranschaulichen, ist in [Fig. 11](#) ein Diagramm gezeigt, in dem auf der Abszisse die akustische Frequenz f_s und auf der Ordinate der verbleibende Interferenzkontrast bei Verwendung eines AOM für die drei Pulsformen **86, 104, 106** in [Fig. 10](#) aufgetragen ist.

[0141] In [Fig. 11](#) ist mit einer Kurve **108** der Verlauf des Interferenzkontrastes in der Substratebene **14** für die Pulsform des Pulses **86** in [Fig. 10](#), also für den ursprünglichen (kurzen) Lichtpuls **86** in Abhängigkeit von der akustischen Frequenz f_s , dargestellt. Je höher die akustische Frequenz f_s ist, desto kleiner wird das Verhältnis von akustischer Periodendauer und Pulsdauer des Laserlichtes, und desto kleiner ist der verbleibende Interferenzkontrast, da über eine größere Zahl von Schallperioden gemittelt werden kann. Die Kurve **110** zeigt die Abhängigkeit des Interferenzkontrastes von der akustischen Frequenz f_s für den Puls **104** (Durchgang des Lichtstrahls durch ein Pulsverlängerungsmodul **88**), und die Kurve **112** zeigt die Abhängigkeit des Interferenzkontrastes von der akustischen Frequenz f_s für den Puls **106** in [Fig. 10](#), die dem Durchgang des Lichtstrahls durch drei hintereinander angeordnete Pulsverlängerungsmodule entspricht.

[0142] Wie aus [Fig. 11](#) hervorgeht, wird durch die Verlängerung der Pulsdauer der Lichtpulse durch eine entsprechende Anzahl von Pulsverlängerungsmodulen der Interferenzkontrast in der Substratebene **14** im Wesentlichen über einen großen Bereich akustischer Frequenzen f_s reduziert. Somit bewirkt bereits eine Verlän-

gerung der Pulsauern des gepulsten Lichtstrahls eine Verringerung der Interferenzkontraste und somit eine Verbesserung der Homogenität des Lichtstrahls in der Substratebene **14**.

[0143] Wie **Fig. 12** zeigt, die eine Feindarstellung des Diagramms in **Fig. 11** in Bezug auf die Streckung der Ordinate ist, gibt es jedoch auch im Fall des dreifach verlängerten Lichtpulses gemäß der Kurve **112** Frequenzbereiche, in denen der Interferenzkontrast immer noch deutlich höher ist als in den übrigen akustischen Frequenzbereichen f_s . Im vorliegenden Fall befindet sich ein solcher erhöhter Interferenzkontrast bspw. im Bereich $f_s \approx 40$ MHz. Die Frequenzbereiche f_s , in denen der Interferenzkontrast noch erhöht ist, entsprechen den Umlauffrequenzen (Kehrwerten der Umlaufdauern) in den jeweiligen Pulsverlängerungsmodulen. Daneben treten weitere Maxima bei den Vielfachen dieser Umlauffrequenzen auf.

[0144] Die Wahl der akustischen Frequenz f_s muss daher so erfolgen, dass die Frequenzbereiche mit minimalem Interferenzkontrast getroffen werden. Die akustische Frequenz f_s der Schallwelle **76** ist am AOM **72** entsprechend einzustellen.

[0145] Insbesondere muss die akustische Frequenz f_s so gewählt werden, dass sie von den Umlauffrequenzen der Pulsverzögerungsmodule sowie deren ganzzahligen Vielfachen verschieden ist, wie aus **Fig. 12** hervorgeht.

[0146] Mit Bezug auf **Fig. 14** bis **Fig. 21** wird ausgehend von der beispielhaften Kohärenzfunktion in **Fig. 13** der Einfluss der oben beschriebenen verschiedenen Maßnahmen auf die laterale Kohärenzlänge des Lichts relativ zum Abstand der Lichtpfade **24** bzw. **26** beschrieben.

[0147] **Fig. 14** zeigt den Verlauf der Kohärenzfunktion (mit durchgezogener Linie) im Fall der Maßnahme, dass im Strahlengang eine Strahlteileranordnung vorhanden ist, wie sie in **Fig. 7** beispielhaft dargestellt ist. Die Strahlauftteilung in zwei Teilstrahlen (Teilstrahlen **66**, **68** in **Fig. 7**) bewirkt eine Reduzierung der Kohärenzlänge bei gleichem Strahlquerschnitt um einen Faktor 2, wie aus **Fig. 14** hervorgeht. Der 10%-Wert des Kohärenzgrades K ist demnach bereits bei einem Abstand L von 1,5 erreicht.

[0148] **Fig. 15** zeigt die Wirkung von doppelbrechenden Elementen auf die Kohärenzfunktion. Es wurde hier zumindest ein doppelbrechendes keilförmiges Element verwendet, dessen Winkel zwischen Lichteintritts- und Lichtaustrittsfläche so gewählt wurde, dass der Kohärenzgrad zwischen zwei benachbarten Lichtpfaden, die Kohärenzfunktion also für $L = 1$ null ist. Wie aus **Fig. 15** hervorgeht, ergeben sich weitere Nullstellen der Kohärenzfunktion bei $L = 3$, $L = 5$.

[0149] **Fig. 16** zeigt die Wirkung einer Kombination aus doppelbrechenden keilförmigen Elementen, deren Wirkung auf den Abstand $L = 1$ angepasst sind, und einer Strahlauftteilung in zwei Teilstrahlen (vgl. **Fig. 7**) auf die Kohärenzfunktion. Beträgt der Lichtpfadabstand benachbarter Lichtpfade $L = 1$, so geht aus **Fig. 20** hervor, dass Interferenzen zwischen den einzelnen Lichtpfaden nahezu vollständig unterdrückt sind. Sogar die Kohärenz von Licht eines Lichtpfades mit Licht eines unmittelbar benachbarten Lichtpfades ist auf unter 10% reduziert.

[0150] **Fig. 17** zeigt die Wirkung des akusto-optischen Modulators **72** mit einer Amplitude a der Schallwelle **76** von $a = 1,20241$ und einer Schallwellenlänge Λ von $\Lambda = 2$ (in den Einheiten der Abszisse in **Fig. 17**).

[0151] Es ergeben sich Nullstellen der Kohärenzfunktion bei der halben Schallwellenlänge Λ ($L = 1$) und ungeraden Vielfachen davon ($L = 3, 5$).

[0152] **Fig. 18** zeigt die Wirkung des akusto-optischen Modulators **72** mit einer Amplitude der Schallwelle **76** von $a = 1,38843$ und einer Schallwellenlänge $\Lambda = 3$.

[0153] In diesem Fall ergeben sich Nullstellen der Kohärenzfunktion bei Vielfachen von $\Lambda/3$, d. h. bei $L = 1$, $L = 2$, $L = 4$.

[0154] **Fig. 19** zeigt die Wirkung des akusto-optischen Modulators mit den gleichen Parameter wie in **Fig. 18**, jedoch in Kombination mit einer Strahlteileranordnung, die den einfallenden Lichtstrahl in zwei Teilstrahlen gemäß **Fig. 7** aufteilt.

[0155] In diesem Fall werden durch diese Kombination von interferenzunterdrückenden Maßnahmen Interferenzeffekte zwischen benachbarten Lichtpfaden der mischenden optischen Anordnung beinahe vollständig eliminiert.

[0156] [Fig. 20](#) zeigt die Kohärenzfunktion für den Fall, dass der akusto-optische Modulator **72** mit zwei verschiedenen Schallwellenlängen Λ bzw. zwei verschiedenen Schallfrequenzen f_s betrieben wird, wobei die Schallwellenlängen Λ aus den Beispielen der [Fig. 17](#) und [Fig. 18](#) verwendet wurden.

[0157] Diese Wirkung entspricht einer Hintereinanderschaltung von zwei akusto-optischen Modulatoren mit den Parameter gemäß [Fig. 17](#) und [Fig. 18](#). Anstelle der Verwendung zweier oder mehrerer akusto-optischer Modulatoren, die mit verschiedenen Frequenzen und/oder Schallamplituden betrieben werden, kann auch ein einziger akusto-optischer Modulator verwendet werden, der mit unterschiedlichen Frequenzen und Amplituden angeregt wird.

[0158] Gemäß [Fig. 20](#) ergeben sich Nullstellen der Kohärenzfunktion bei $L = 1, 2, 3, 4, 5$ und im Bereich zwischen den Nullstellen ist der Kohärenzgrad K ebenfalls unter 10% verringert.

[0159] [Fig. 21](#) zeigt die Kohärenzfunktion für den Fall der Verwendung des akusto-optischen Modulators mit den Parametern gemäß [Fig. 18](#) in Kombination mit doppelbrechenden Elementen, deren Wirkung auf die Kohärenzfunktion derjenigen von [Fig. 15](#) entspricht.

[0160] In diesem Fall ergibt sich eine Nullstelle bei $L = 1$, die vom akusto-optischen Modulator und von den doppelbrechenden Elementen herrührt. Für den Fall, dass die interferenzreduzierende Wirkung des AOM **72** oder der doppelbrechenden Elemente **52** bzw. **52'** jeweils für sich nicht optimal ist, ergänzen sich diese beiden Maßnahmen bei $L = 1$ somit vorteilhafterweise, um den Kohärenzgrad auf 0 zu drücken.

[0161] Weitere Nullstellen der Kohärenzfunktion in [Fig. 21](#) existieren bei $L = 2$, die vom AOM herrührt, bei $L = 3$, die von den doppelbrechenden Elementen herrührt und bei $L = 4$, die vom AOM herrührt, usw.

[0162] Die Kohärenzfunktionen gemäß [Fig. 14](#) bis [Fig. 21](#) sind nur beispielhaft zu verstehen. Es sind weitere Kohärenzfunktionen als diejenige in [Fig. 13](#) denkbar, die also nicht Gauss-förmig sind. Je nach den Erfordernissen können die vorstehend beschriebenen Maßnahmen zur Interferenzverringern auch so ausgelegt sein, dass sie entsprechend andere Wirkungen auf die Kohärenzfunktion haben, beispielsweise können die Nullstellen der Kohärenzfunktion im Unterschied zu den gezeigten Beispielen der [Fig. 14](#) bis [Fig. 21](#) auch nicht äquidistant verteilt sein.

Patentansprüche

1. Optisches System zum Erzeugen eines Lichtstrahls zur Behandlung eines in einer Substratebene (**14**) angeordneten Substrats, wobei der Lichtstrahl in einer ersten Dimension (X) senkrecht zur Ausbreitungsrichtung (Z) des Lichtstrahls eine Strahlänge (L) und in einer zweiten Dimension (Y) senkrecht zur ersten Dimension (X) und zur Lichtausbreitungsrichtung (Z) eine Strahlbreite (B) aufweist, mit zumindest einer mischenden optischen Anordnung (**18**; **18'**; **18''**), die den Lichtstrahl in zumindest einer der ersten und zweiten Dimension in eine Mehrzahl von Lichtpfaden (**24a-c**) aufteilt, die einander überlagert in die Substratebene (**14**) einfallen, wobei zumindest eine die Kohärenz beeinflussende optische Anordnung (**50**; **50'**; **60**; **60'**; **70**) im Strahlengang des Lichtstrahls vorhanden ist, die auf den Lichtstrahl so wirkt, dass der Kohärenzgrad des Lichts für zumindest einen Lichtpfadabstand eines Lichtpfades (**24a-c**) von zumindest einem anderen Lichtpfad (**24a-c**) zumindest verringert ist, und wobei der Lichtstrahl gepulst ist, **dadurch gekennzeichnet**, dass die zumindest eine die Kohärenz beeinflussende optische Anordnung (**70**) zumindest einen akusto-optischen Modulator (AOM) (**72**) aufweist, und dass im Strahlengang zumindest ein Pulsverlängerungsmodul (**88**) angeordnet ist.

2. Optisches System nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass ein Verhältnis aus lateraler Kohärenzlänge des Lichtstrahls in Richtung quer zu den Lichtpfaden (**24a-c**) und dem Lichtpfadabstand zumindest zweier benachbarter Lichtpfade (**24a-c**) kleiner als 2 ist.

3. Optisches System nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass ein Verhältnis aus lateraler Kohärenzlänge des Lichtstrahls in Richtung quer zu den Lichtpfaden (**24a-c**) und dem Lichtpfadabstand zumindest zweier benachbarter Lichtpfade (**24a-c**) kleiner als 1 ist.

4. Optisches System nach einem der Ansprüche 1 bis 3, dadurch gekennzeichnet, dass die zumindest eine die Kohärenz beeinflussende optische Anordnung (**60; 60'**) zumindest eine Strahlteileranordnung (**62; 62'**) aufweist, die den Lichtstrahl in Richtung quer zu den Lichtpfaden (**24a–c**) in eine Mehrzahl von seitlich versetzten Teilstrahlen (**66, 68; 66', 68; 70'**) aufteilt, deren Laufwegunterschiede relativ zueinander größer als die zeitliche Kohärenzlänge des Lichts der Teilstrahlen sind.

5. Optisches System nach einem der Ansprüche 1 bis 4, dadurch gekennzeichnet, dass die zumindest eine die Kohärenz beeinflussende optische Anordnung eine Kohärenzwandleranordnung aufweist, die eine Strahlteileranordnung, die den Lichtstrahl in einer der beiden Dimensionen in eine Mehrzahl von Teilstrahlen aufteilt, und eine Strahlumsortieranordnung aufweist, die die Teilstrahlen in Richtung der anderen Dimension nebeneinander anordnet.

6. Optisches System nach einem der Ansprüche 1 bis 5, dadurch gekennzeichnet, dass die zumindest eine die Kohärenz beeinflussende optische Anordnung (**50; 50**) zumindest ein optisches Element (**52; 52'**) aufweist, dessen Lichteintrittsfläche (**54; 54'**) und Lichtaustrittsfläche (**56; 56'**) plan und unter einem Winkel zueinander geneigt sind, und dass das zumindest eine optische Element (**52; 52'**) doppelbrechend ist.

7. Optisches System nach Anspruch 6, dadurch gekennzeichnet, dass der Winkel zwischen der Lichteintrittsfläche (**54; 54'**) und der Lichtaustrittsfläche (**56; 56'**) so gewählt ist, dass der durch das optische Element (**52; 52'**) eingeführte Phasenunterschied zwischen dem ordentlichen und dem außerordentlichen Teilstrahl für den zumindest einen Lichtpfadabstand ein ungeradzahliges Vielfaches der halben Wellenlänge des Lichts beträgt.

8. Optisches System nach Anspruch 6 oder 7, dadurch gekennzeichnet, dass das zumindest eine optische Element (**52; 52'**) in Ausbreitungsrichtung des Lichtstrahls hinter der zumindest einen mischenden optischen Anordnung (**18; 18'; 18''**) angeordnet ist.

9. Optisches System nach einem der Ansprüche 1 bis 8, dadurch gekennzeichnet, dass mehrere mischende optische Anordnungen (**18, 36; 18'', 36''**) vorhanden sind.

10. Optisches System nach einem der Ansprüche 1 bis 9, dadurch gekennzeichnet, dass die akustische Wellenlänge Λ und/oder die akustische Amplitude a des AOM (**72**) einstellbar ist.

11. Optisches System nach einem der Ansprüche 1 bis 10, dadurch gekennzeichnet, dass die akustische Wellenlänge Λ und die akustische Amplitude a des AOM (**72**) so gewählt oder eingestellt sind, dass die Bedingung $J_0[2asin(\pi L/\Lambda)] \ll 1$ für den zumindest einen Lichtpfadabstand (L) erfüllt ist, wobei J_0 die Besselfunktion 0-ter Ordnung ist.

12. Optisches System nach Anspruch 11, dadurch gekennzeichnet, dass die akustische Amplitude a des AOM (**72**) und die akustische Wellenlänge Λ so gewählt sind, dass $asin(\pi L/\Lambda) < 0,75$ für den zumindest einen Lichtpfadabstand L erfüllt ist.

13. Optisches System nach einem der Ansprüche 1 bis 12, dadurch gekennzeichnet, dass mehrere AOM (**72**) vorhanden sind, bei denen die akustische Wellenlänge und/oder die akustische Amplitude von AOM zu AOM unterschiedlich eingestellt sind, um den Kohärenzgrad für mehrere Lichtpfadabstände zumindest zu verringern.

14. Optisches System nach einem der Ansprüche 1 bis 12, dadurch gekennzeichnet, dass nur ein AOM (**72**) vorhanden ist, bei dem gleichzeitig mehrere unterschiedliche akustische Wellenlängen und/oder akustische Amplituden eingestellt sind, um den Kohärenzgrad für mehrere Lichtpfadabstände zumindest zu verringern.

15. Optisches System nach einem der Ansprüche 1 bis 14, dadurch gekennzeichnet, dass die akustische Wellenlänge Λ des AOM bzw. deren ganzzahlige Vielfache auf die verlängerten Pulse so abgestimmt ist bzw. sind, dass ein Interferenzkontrast in der Substratebene (**14**) weniger als 10% beträgt.

16. Optisches System nach einem der Ansprüche 1 bis 14, dadurch gekennzeichnet, dass die akustische Wellenlänge Λ des AOM bzw. deren ganzzahlige Vielfache auf die verlängerten Pulse so abgestimmt ist bzw. sind, dass ein Interferenzkontrast in der Substratebene (**14**) weniger als 5% beträgt.

17. Optisches System nach einem der Ansprüche 1 bis 14, dadurch gekennzeichnet, dass die akustische Wellenlänge Λ des AOM bzw. deren ganzzahlige Vielfache auf die verlängerten Pulse so abgestimmt ist bzw. sind, dass ein Interferenzkontrast in der Substratebene (**14**) weniger als 1% beträgt.

18. Optisches System nach einem der Ansprüche 1 bis 17, dadurch gekennzeichnet, dass die Schallfrequenz f_s des AOM (72) ungleich der Umlauffrequenz der Pulse in dem zumindest einen Pulsverlängerungsmodul (88) und ungleich dem ganzzahligen Vielfachen der Umlauffrequenz ist.

19. Optisches System nach Anspruch 18, dadurch gekennzeichnet, dass sich die Schallfrequenz f_s des AOM (72) von der Umlauffrequenz der Pulse und aller ganzzahligen Vielfachen in zumindest einem Pulsverlängerungsmodul (88) um mehr als 5% unterscheidet.

20. Optisches System nach Anspruch 18, dadurch gekennzeichnet, dass sich die Schallfrequenz f_s des AOM (72) von der Umlauffrequenz der Pulse und aller ganzzahligen Vielfachen in zumindest einem Pulsverlängerungsmodul (88) um mehr als 10% unterscheidet.

21. Optisches System nach Anspruch 19 oder 20, dadurch gekennzeichnet, dass sich die Schallfrequenz f_s des AOM (72) von der jeweiligen Umlauffrequenz der Pulse und aller ganzzahligen Vielfachen davon in allen verwendeten Pulsverlängerungsmodulen (88) um mehr als 5% unterscheidet.

22. Optisches System nach Anspruch 19 oder 20, dadurch gekennzeichnet, dass sich die Schallfrequenz f_s des AOM (72) von der jeweiligen Umlauffrequenz der Pulse und aller ganzzahligen Vielfachen davon in allen verwendeten Pulsverlängerungsmodulen (88) um mehr als 10% unterscheidet.

Es folgen 13 Blatt Zeichnungen

Anhängende Zeichnungen

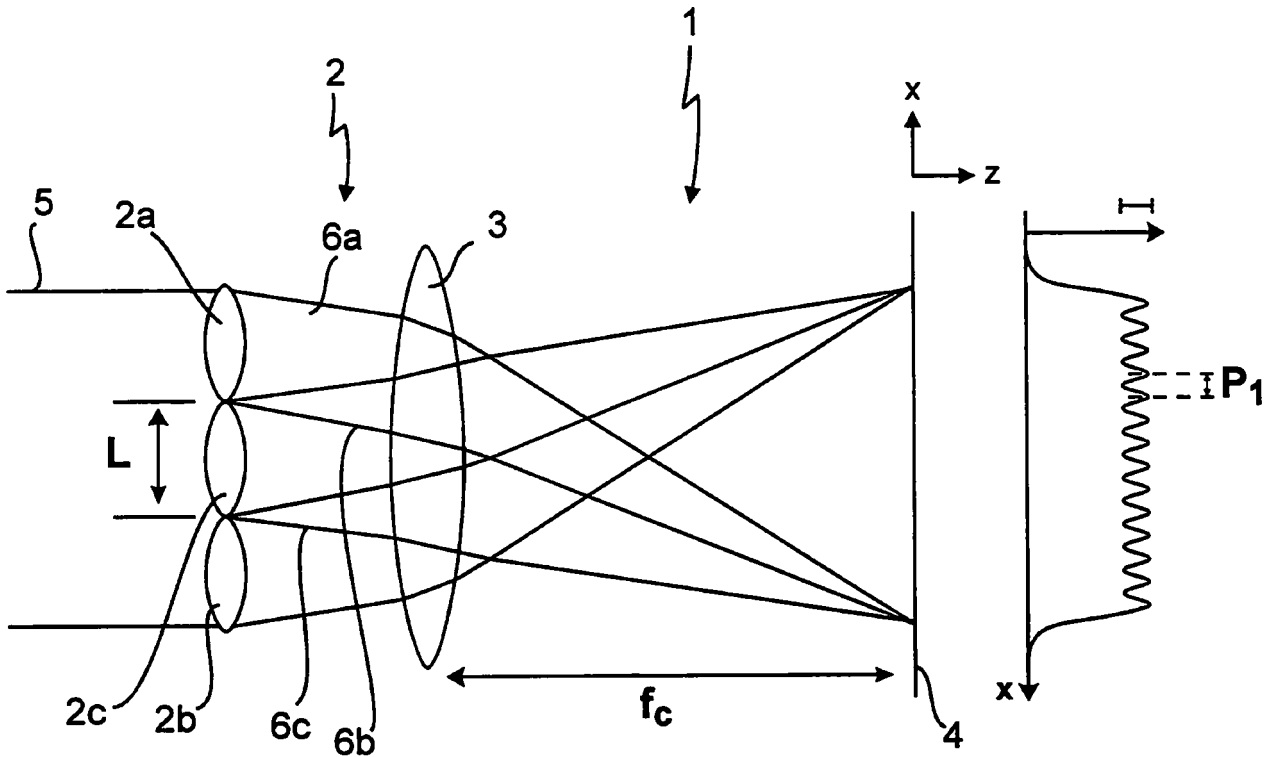
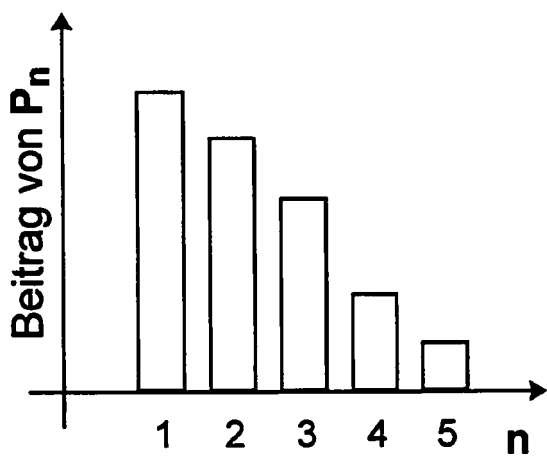
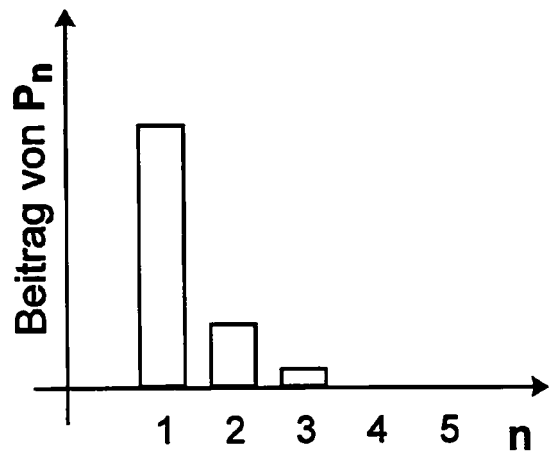


Fig. 1
(Stand der Technik)



a)



b)

Fig. 3

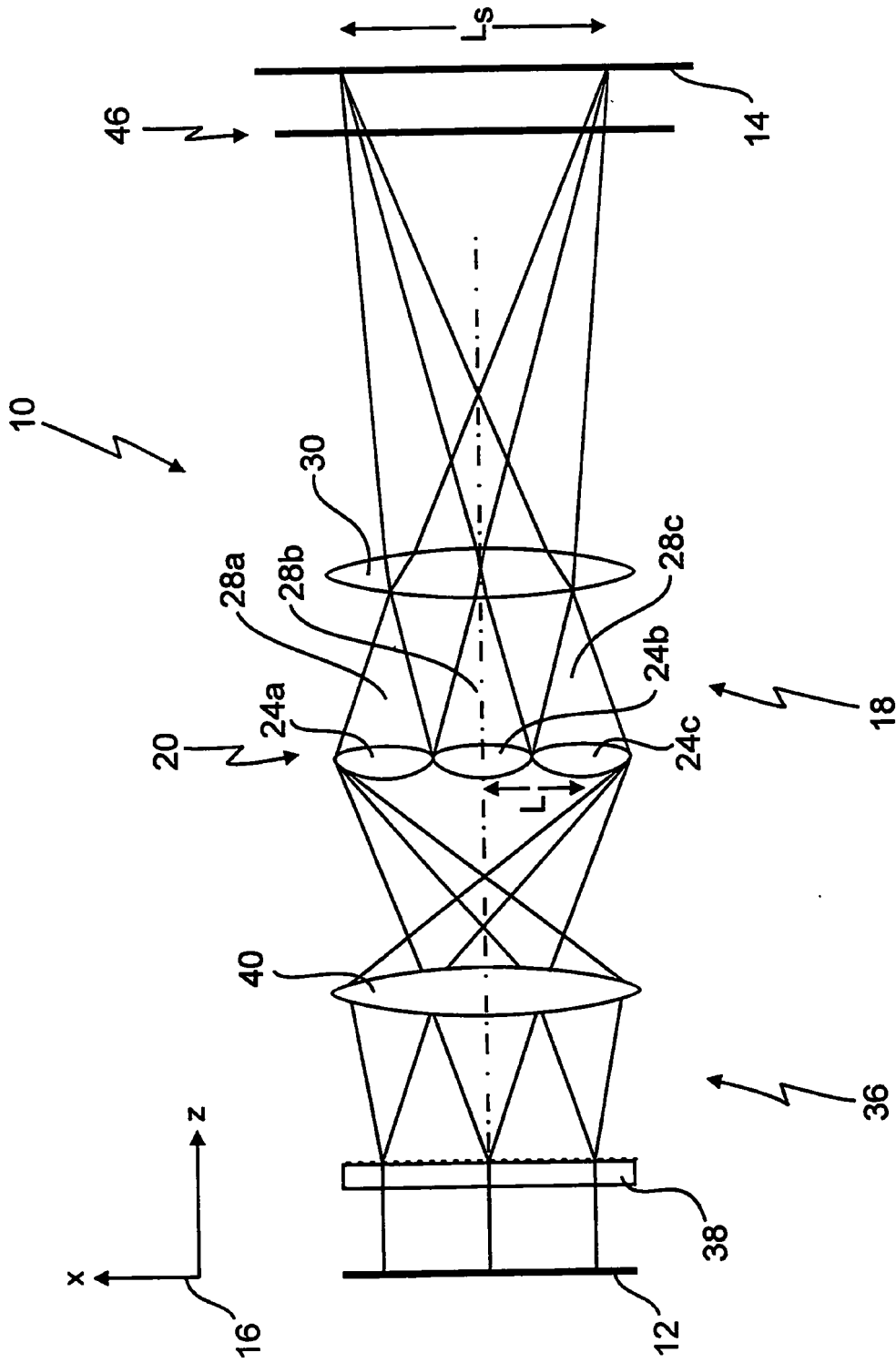


Fig. 2

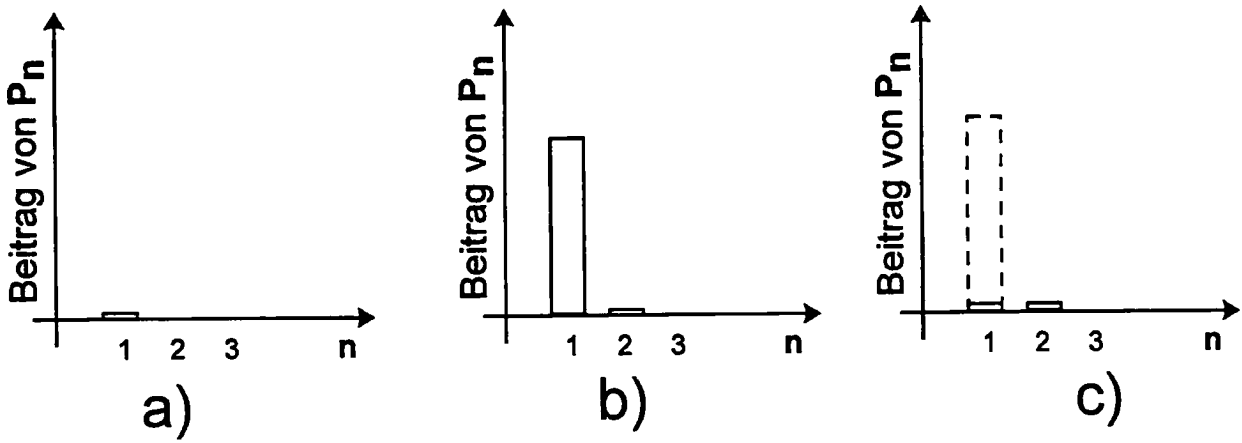


Fig. 5

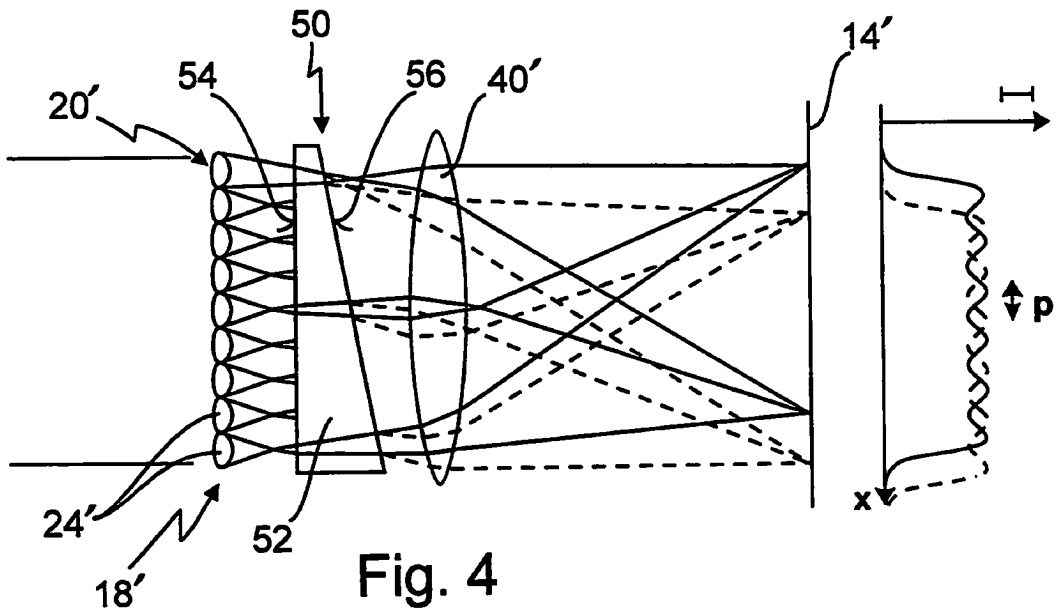


Fig. 4

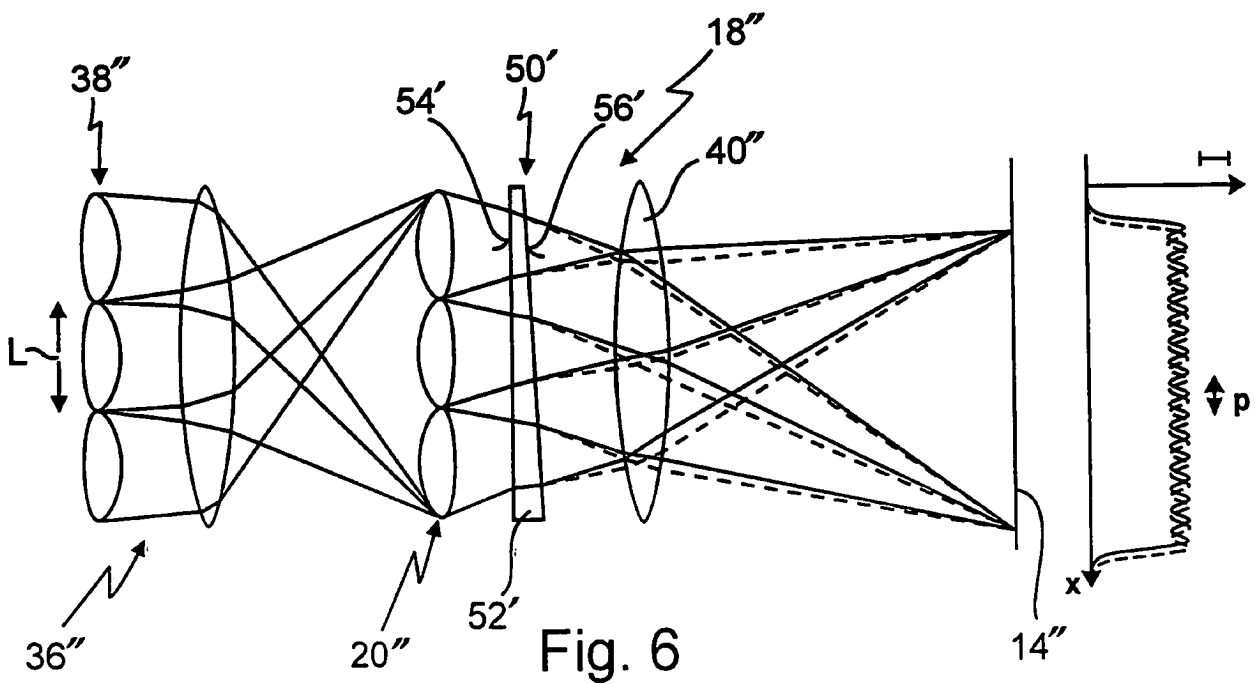


Fig. 6

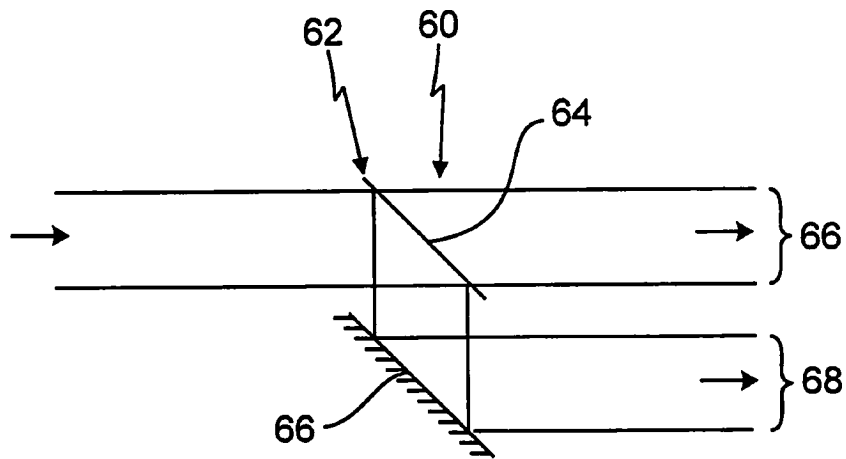


Fig. 7

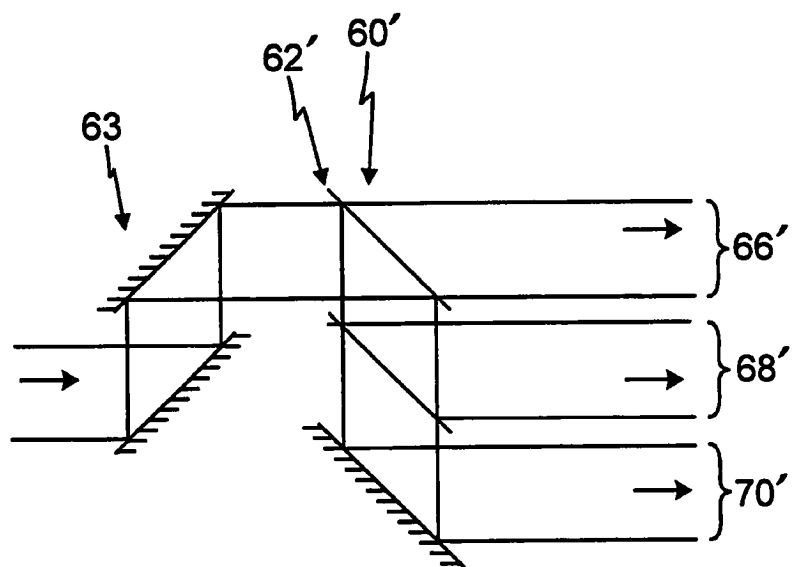


Fig. 8

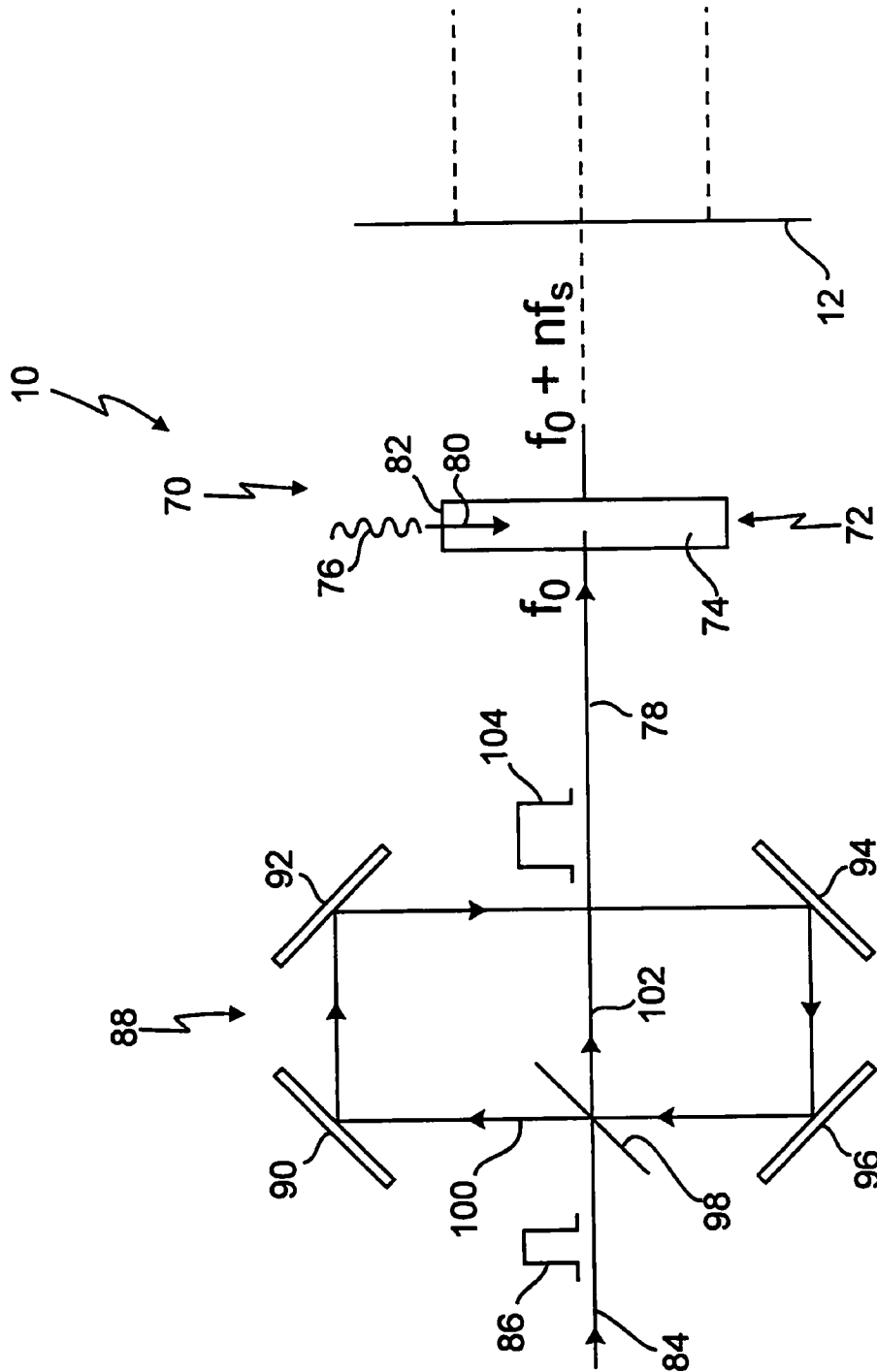


Fig. 9

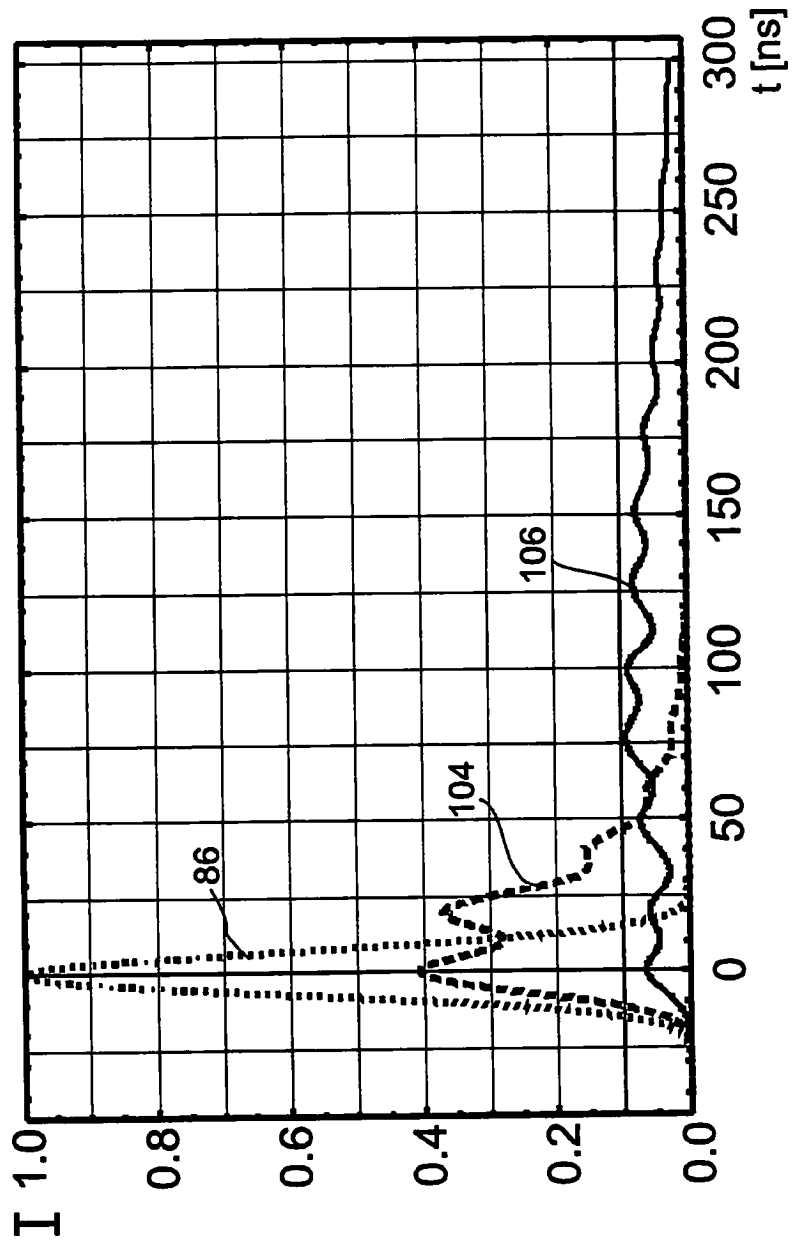


Fig. 10

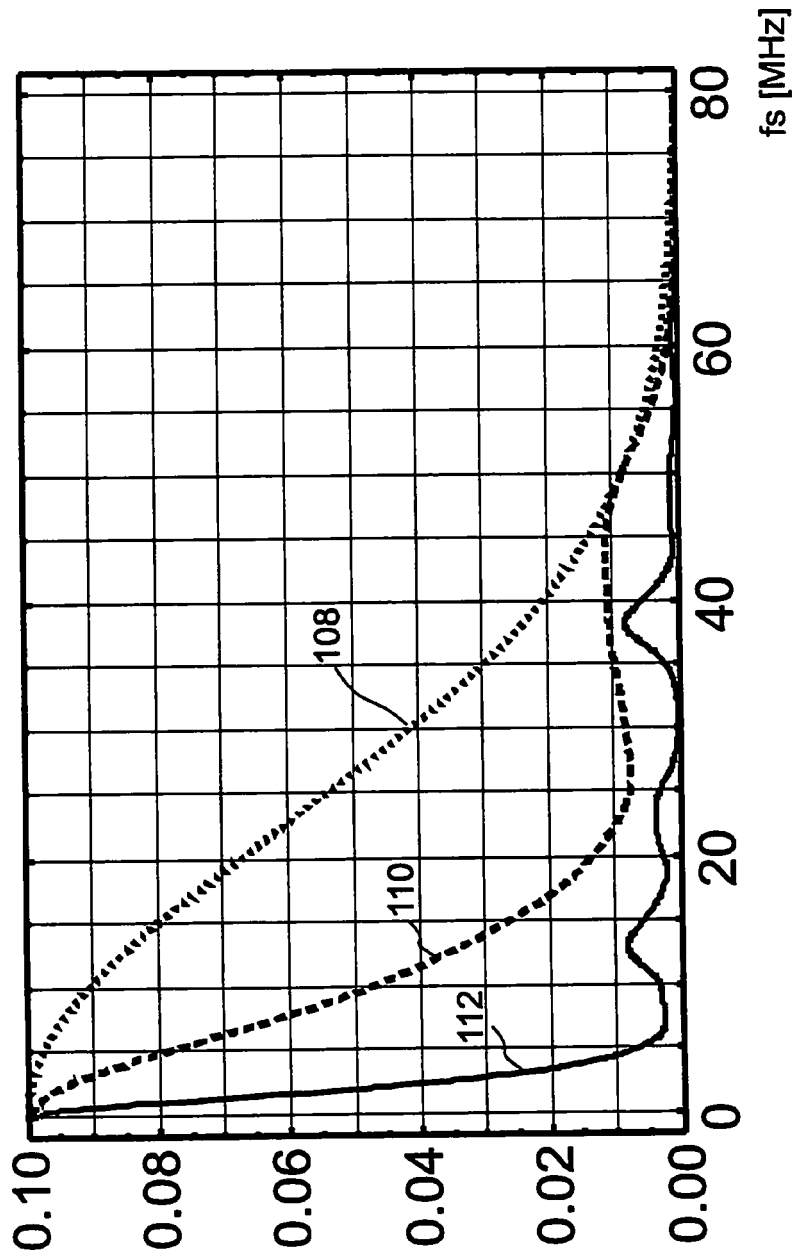


Fig. 11

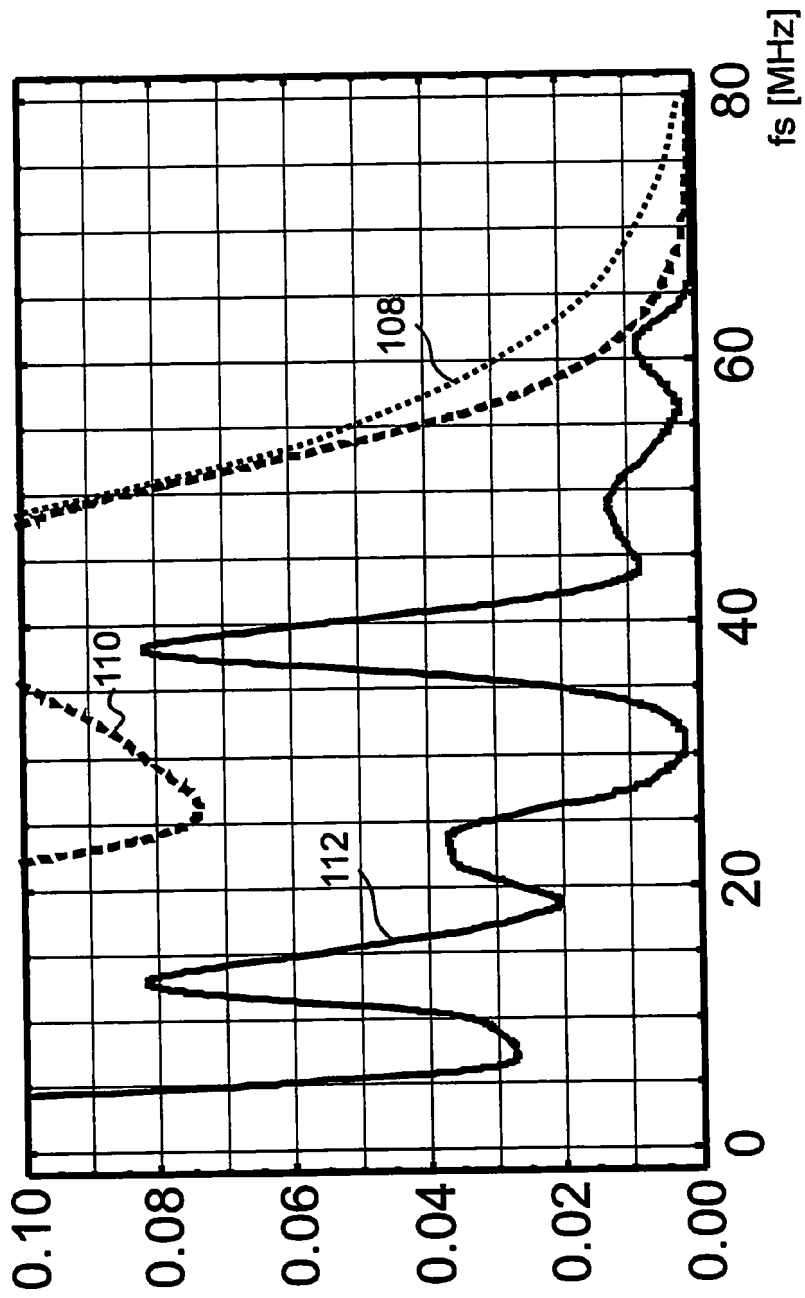


Fig. 12

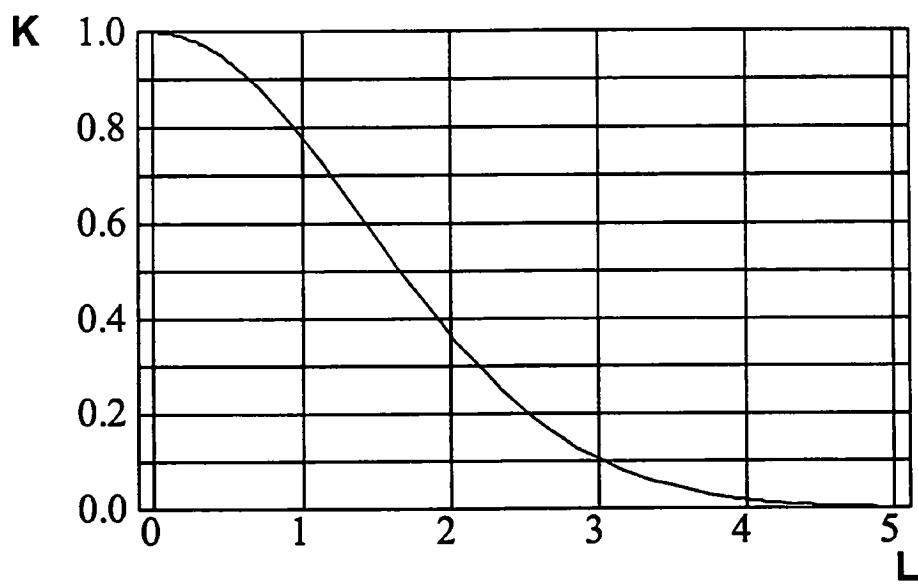


Fig. 13

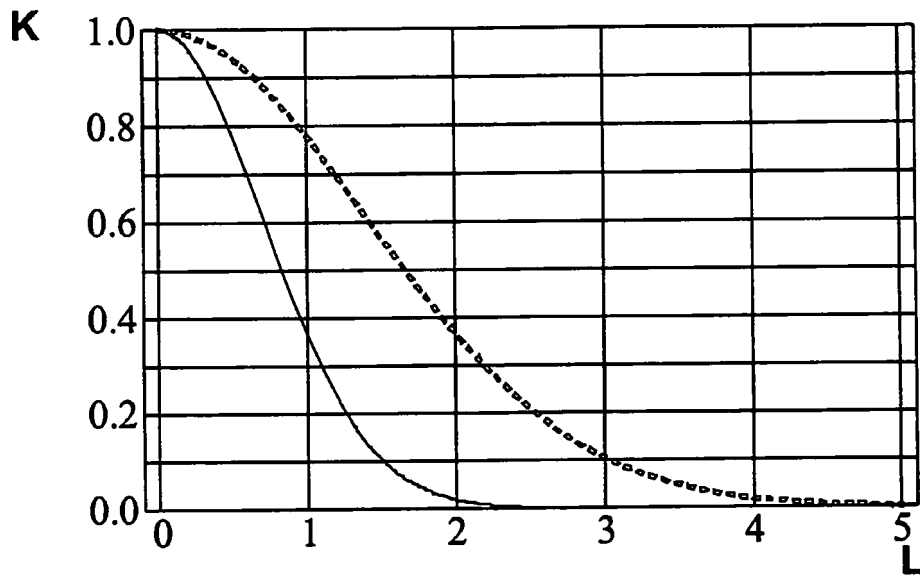


Fig. 14

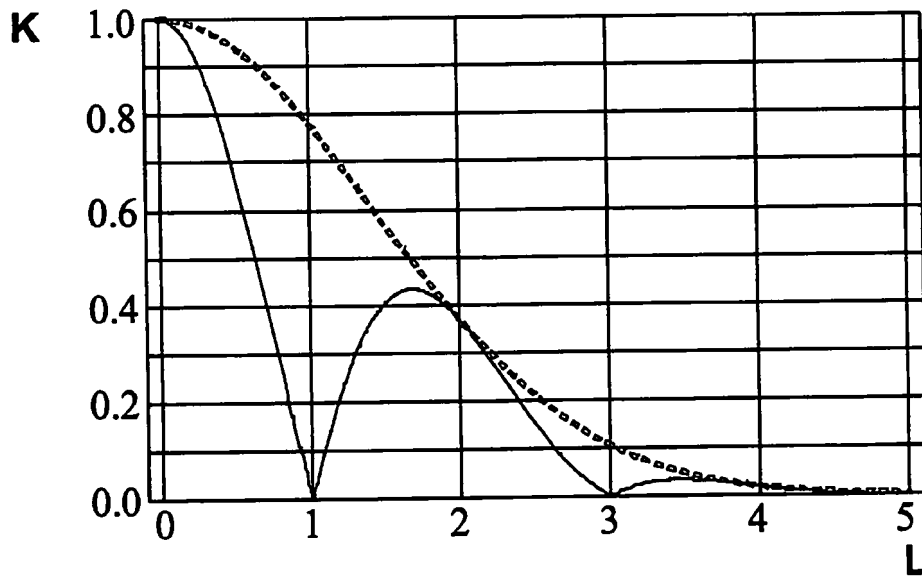


Fig. 15

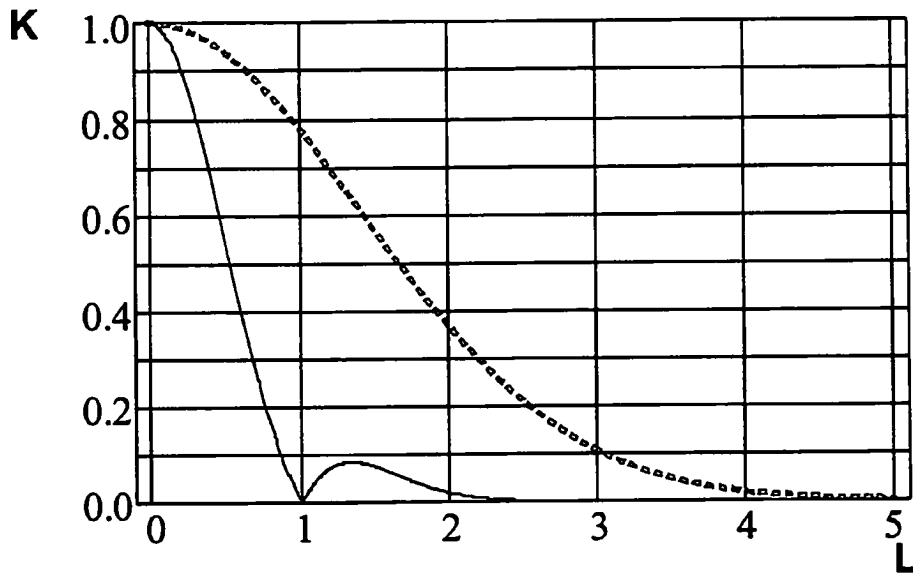


Fig. 16

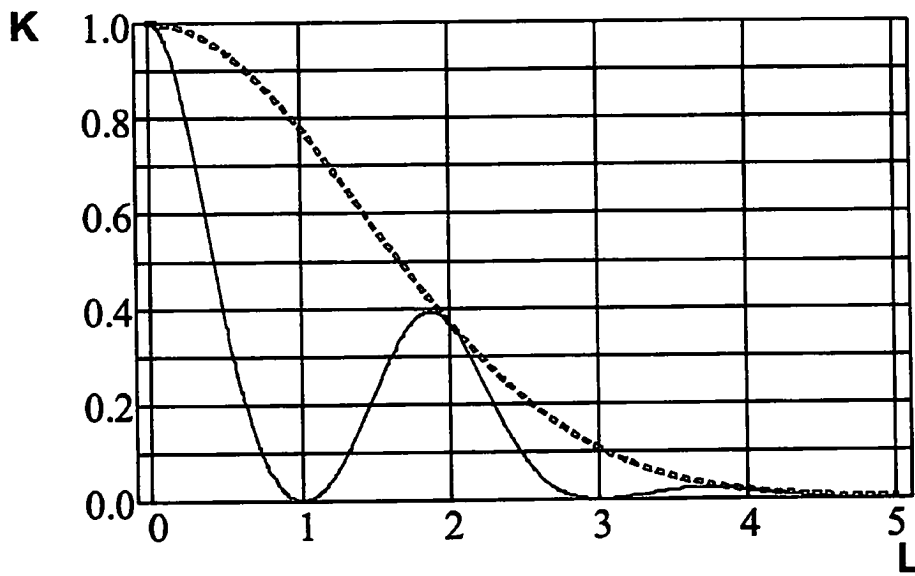


Fig. 17

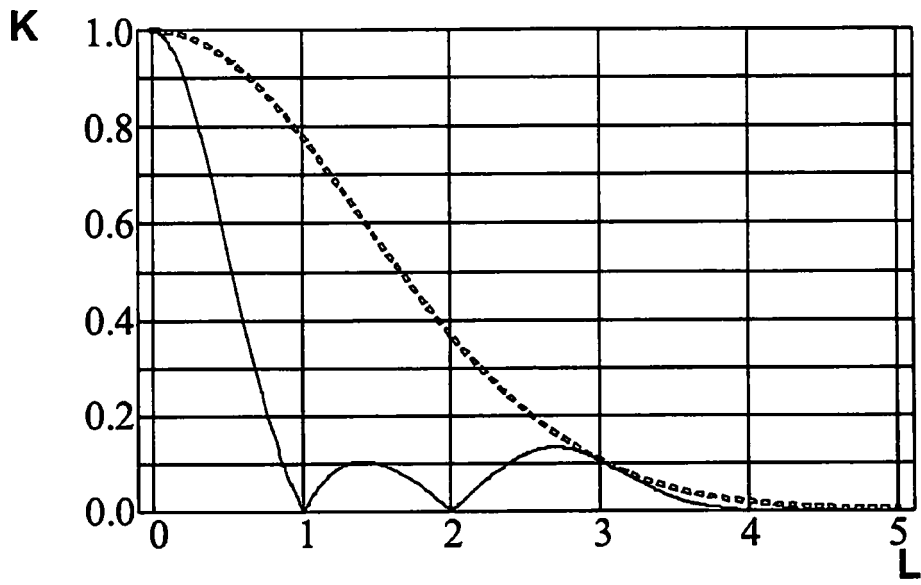


Fig. 18

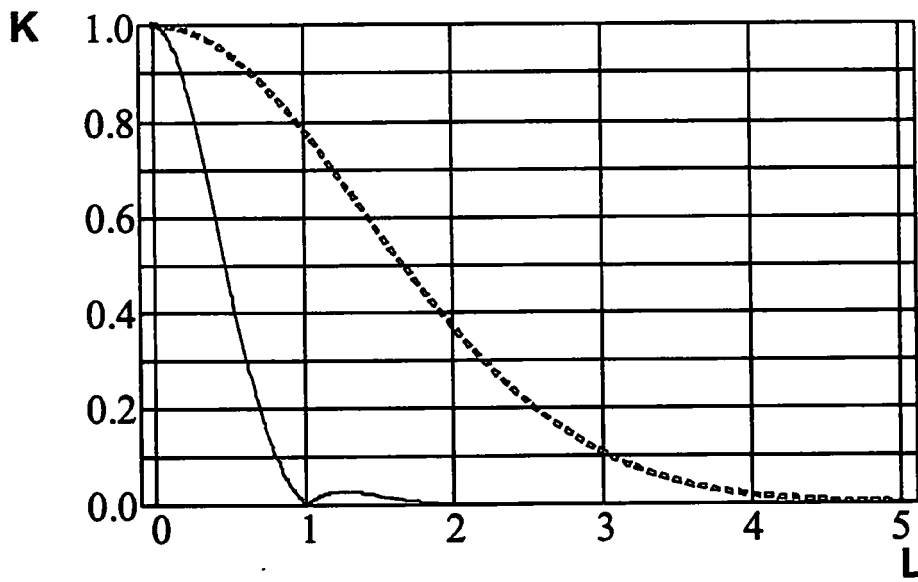


Fig. 19

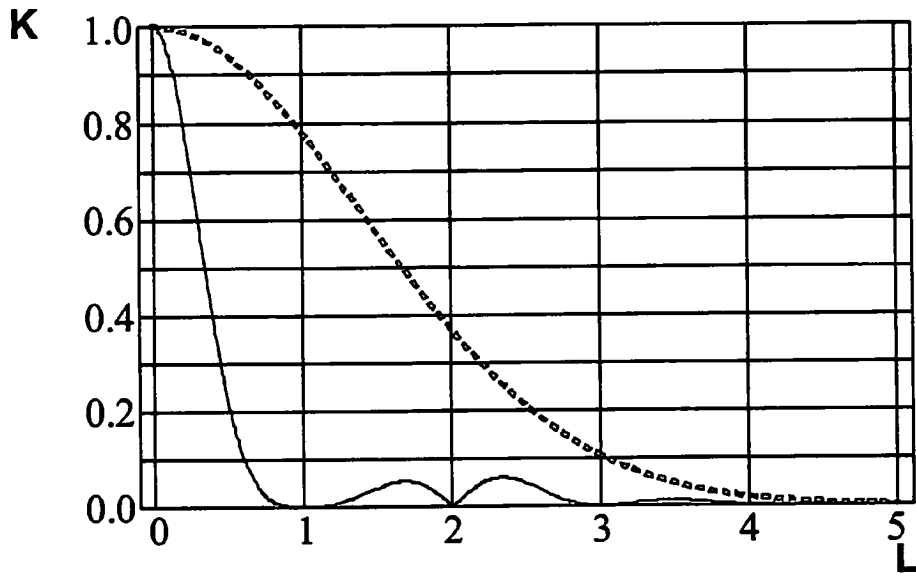


Fig. 20

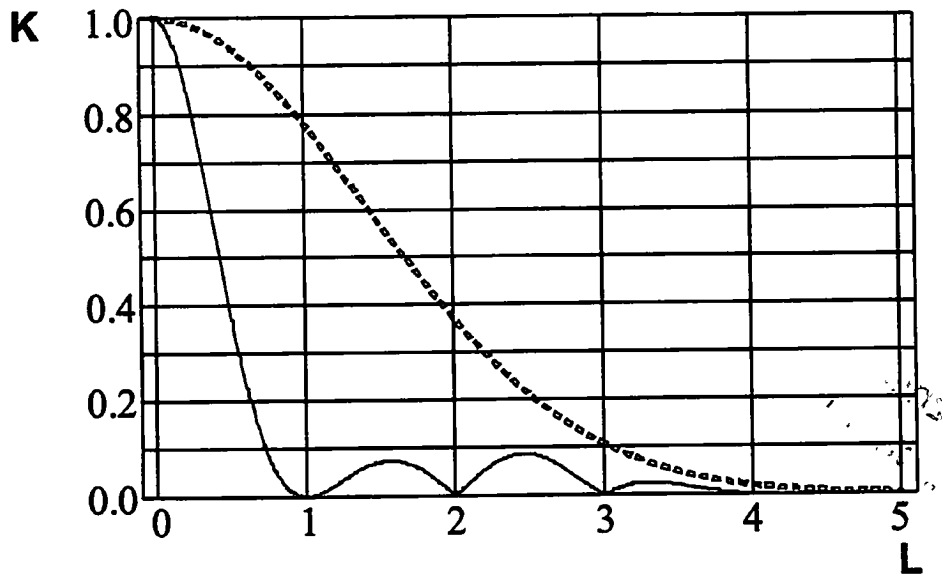


Fig. 21