



(12) **Patentschrift**

(21) Deutsches Aktenzeichen: **11 2015 004 394.2**  
(86) PCT-Aktenzeichen: **PCT/US2015/051538**  
(87) PCT-Veröffentlichungs-Nr.: **WO 2016/049074**  
(86) PCT-Anmeldetag: **22.09.2015**  
(87) PCT-Veröffentlichungstag: **31.03.2016**  
(43) Veröffentlichungstag der PCT Anmeldung  
in deutscher Übersetzung: **14.06.2017**  
(45) Veröffentlichungstag  
der Patenterteilung: **11.04.2024**

(51) Int Cl.: **H01S 3/10 (2006.01)**  
**G01N 21/39 (2006.01)**  
**H01S 3/00 (2006.01)**  
**G02F 1/37 (2006.01)**

Innerhalb von neun 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).

(30) Unionspriorität:

<b>62/055,605</b>	<b>25.09.2014</b>	<b>US</b>
<b>62/136,403</b>	<b>20.03.2015</b>	<b>US</b>
<b>14/859,122</b>	<b>18.09.2015</b>	<b>US</b>

(73) Patentinhaber:

**KLA-Tencor Corporation, Milpitas, Calif., US**

(74) Vertreter:

**Reichert & Lindner Partnerschaft Patentanwälte,  
93049 Regensburg, DE**

(72) Erfinder:

**Deng, Yujun, San Jose, Calif., US; Chuang, Yung-Ho Alex, Cupertino, Calif., US; Fielden, John, Los Altos, Calif., US; Armstrong, J. Joseph, Fremont, Calif., US; Dribinski, Vladimir, Livermore, Calif., US**

(56) Ermittelter Stand der Technik:

**siehe Folgeseiten**

(54) Bezeichnung: **LASERANORDNUNG UND INSPEKTIONSSYSTEM UNTER VERWENDUNG EINER MONOLITISCHEN APPARATUR ZUM VERRINGERN DER BANDBREITE**

(57) Hauptanspruch: Eine Laseranordnung (800), umfassend:

einen Grundlaser (601), der derart ausgebildet ist, dass er Grundlicht (L) erzeugt, das Lichtpulse (LP) mit einer Grundwellenlänge ( $\lambda_f$ ) erzeugt, die innerhalb einer Grundwellenlängen-Bandbreite ( $\Delta\lambda_f$ ) liegen;

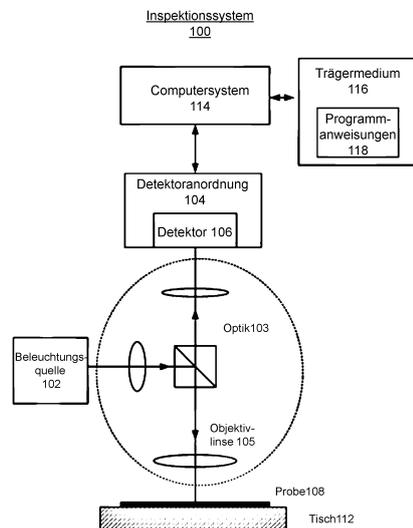
ein optisches Gerät (803) zur Filterung der Bandbreiten, das derart ausgebildet ist, dass ein erster Teil eines jeden Grundlichtpulses (LP) mit Frequenzen außerhalb einer verengten Frequenzbandbreite ablenkbar ist, und derart ausgebildet ist, dass ein zweiter Teil eines jeden Grundlichtpulses (LP) innerhalb der verengten Frequenzbandbreite passiert;

ein Gerät (610) zur Verringerung der Bandbreite, welches umfasst:

ein Trennelement (602) für den Puls, das derart konfiguriert ist, dass der erste Abschnitt eines jeden Laserlichtpulses (LP) in ein Paar von entsprechenden Teilpulsen aufteilbar ist, das einen ersten Teilpuls (LSP1) und einen zweiten Teilpuls (LSP2) umfasst;

mindestens ein monolithisches Gerät (607), das derart konfiguriert ist, dass der erste Teilpuls (LSP1) eines jeden gestreckten Teilpuls (LSSP1) mit einem positiven Chirp umwandelbar und derart konfiguriert ist, dass der zweite

Teilpuls (LSP2) eines jedes Paares von entsprechenden Teilpulsen in einen zweiten gestreckten Teilpuls (LSSP2) mit einem negativen Chirp umwandelbar ist; und ein erstes Modul zur Frequenzmischung (608), das derart konfiguriert ...



(56) Ermittelte Stand der Technik:

**GB** 2 506 014 **A**  
**US** 2013 / 0 313 440 **A1**

**Glebov, Leonid, et al. "Volume-chirped Bragg gratings: monolithic components for stretching and compression of ultrashort laser pulses." *Optical Engineering* 53.5 (2014): 051514-051514.**

**Raoult, F., et al. "Efficient generation of narrow-bandwidth picosecond pulses by frequency doubling of femtosecond chirped pulses." *Optics letters* 23.14 (1998): 1117-1119**

**Beschreibung**

## VERWANDTE ANMELDUNGEN

**[0001]** Die vorliegende Anmeldung ist verwandt mit der US-Patentanmeldung US 2014/ 0 204 963 A1, mit dem Titel „193 nm Laser und Inspection System“, eingereicht von Chuang et al. am 17. Januar 2014, der US-Patentanmeldung US 2013/ 0 313 440 A1, mit dem Titel „Solid-State Laser and Inspection System Using 193 nm Laser“, eingereicht von Chuang et al. am 12. März 2013; der US-Patentanmeldung US 2014/ 0 226 140 A1, mit dem Titel „193 nm Laser and Inspection System“, eingereicht von Chuang et al. am 31. Januar 2014, der US-Patentanmeldung US 2014/ 0 153 596 A1, mit dem Titel „Semiconductor Inspection and Metrology System Using Laser Pulse Multiplier“, eingereicht von Chuang et al. am 11. Dezember 2012, der US-Patentanmeldung US 2012/ 0 314 286 A1, mit dem Titel „Semiconductor Inspection and Metrology System Using Laser Pulse Multiplier“, eingereicht von Chuang et al. am 1. Juni 2012 und der US-Patentanmeldung US 2015/ 0 268176 A1 mit dem Titel „A System and Method for Reducing the Bandwidth of a Laser and an Inspection System and Method Using a Laser“, eingereicht von Deng et al. am 14. Juni 2014. Alle diese Anmeldungen sind durch Bezugnahme hierin aufgenommen.

## HINTERGRUND DER OFFENBARUNG

## Gebiet der Offenbarung

**[0002]** Die vorliegende Anmeldung bezieht sich auf Laser, die Strahlung bei Wellenlängen im tiefen UV (DUV) und Vakuum-UV (VUV) erzeugen und auf Verfahren zur Erzeugung von Laserlicht mit Wellenlängen im DUV und VUV. Insbesondere bezieht sich die Erfindung auf Systeme und Verfahren zum Reduzieren und zur Kontrolle der spektralen Bandbreite von DUV und VUV-Lasern. Die Laser sind besonders geeignet für den Einsatz bei Inspektionssystemen einschließlich derjenigen für die Inspektion von Fotomasken, Masken und Halbleiterwafern.

## Stand der Technik

**[0003]** Die Industrie für integrierte Schaltungen erfordert Inspektionswerkzeuge mit zunehmend höherer Empfindlichkeit, um immer kleinere Defekte und Teilchen zu detektieren, deren Größen etwa 100 nm oder kleiner sein können. Außerdem müssen diese Inspektionswerkzeuge mit hoher Geschwindigkeit arbeiten, um einen großen Teil oder sogar 100% der Fläche der Photomaske, der Maske oder des Wafers in kurzer Zeit, beispielsweise einer Stunde oder weniger, zu inspizieren.

**[0004]** Im Allgemeinen haben kurze Wellenlängen, wie z.B. DUV- und VUV-Wellenlängen, im Vergleich zu längeren Wellenlängen eine höhere Empfindlichkeit bei der Erkennung kleiner Defekte. Die Inspektion einer Photomaske oder einem Retikel erfolgt vorzugsweise mit der gleichen Wellenlänge, die für die Lithographie verwendet wird, wenn von der Photomaske oder dem Retikel gedruckt wird. Derzeit wird eine Wellenlänge von im Wesentlichen 193,4 nm für den kritischsten Lithographieschritt verwendet, und eine Wellenlänge von im Wesentlichen 248 nm wird für weniger kritische Lithographieschritte verwendet. Für den Fall, dass ein Wellenlängenwert hier ohne Eignung erwähnt wird, sollte angenommen werden, dass der Wert sich auf die Vakuumwellenlänge des Lichts oder der Strahlung bezieht.

**[0005]** Die Hochgeschwindigkeits-Inspektion erfordert Hochleistungslaser, um die zu inspizierenden Proben mit hoher Intensität zu beleuchten, um die geringe Lichtmenge zu detektieren, die von kleinen Teilchen oder Defekten gestreut wird oder die Detektion kleiner Änderungen in der Reflektivität aufgrund von Fehlern im Muster zu ermöglichen. Die erforderlichen Laserleistungspegel können von etwa 100 mW für die Inspektion von Photomasken oder Retikel bis zu mehr als 10 W für die Detektion von kleinen Teilchen und Fehlstellen auf einem blanken Siliziumwafer reichen.

**[0006]** Typischerweise erfordert die Inspektion in der Halbleiterindustrie Laser mit sehr enger Bandbreite. Solche Inspektionssysteme verwenden in der Regel ein Objektiv mit einem großen Sichtfeld (in der Regel in Dimensionen von einigen hundert Mikrometern bis zu einigen mm), um die Abbildung eines großen Gebiets zu ermöglichen, um hohe Inspektionsgeschwindigkeiten zu erreichen. Eine Objektivlinse mit niedriger Verzerrung und einem großen Sichtfeld ist teuer und komplex. Das Erfordernis, dass die Objektivlinse in einer großen Bandbreite (beispielsweise mehr als einigen zehn pm) arbeiten kann, erhöht die Kosten und die Komplexität deutlich. DUV-Laser mit Bandbreiten von etwa 20 pm oder weniger sind sehr wünschenswert für die Inspektionsanwendungen in der Halbleiterindustrie.

**[0007]** DUV-Laser sind aus dem Stand der Technik bekannt. US 5 144 630 A mit dem Titel „Multiwave Solid State Laser Using Frequency Conversion Techniques“, erteilt am 1. September 1992 für Lin, und US 5 742 626, mit dem Titel „Ultraviolet Solid State Laser Method Of Using Same And Laser Surgery Apparatus“, erteilt am 21. April 1998 für Mead et al., beschreiben exemplarisch DUV-Laser. Vierte und fünfte Oberschwingungen werden von einem gepulsten Infrarotgrundlaser erzeugt, der bei einer Wellenlänge in der Nähe von 1064 nm arbeitet und daraus resultieren Wellenlängen von etwa 266 nm und 213 nm. Lin und Mead lehren auch eine InfrarotWellen-

länge eines Grundlasers von mehr als 1064 nm unter Verwendung eines optisch parametrischen Oszillators (OPO).

**[0008]** GB 2 506 014 A offenbart eine Laseranordnung umfassend einen Grundlaser (femtosecond laser), der derart ausgebildet ist, dass er Laserlichtpulse mit einer Grundfrequenz erzeugt, die innerhalb einer Grundfrequenz-Bandbreite angeordnet sind; ein Trennelement (BS 50:50) für den Puls, das derart ausgebildet ist, dass jeder Laserlichtpuls in ein Paar von entsprechenden Teilpulsen aufteilbar ist und einen ersten Teilpuls und einen zweiten Teilpuls umfasst; mindestens ein monolithisches Gerät (chirped volume Bragg grating), das derart ausgebildet ist, dass der erste Teilpuls eines jeden Paares von Teilpulsen in einen ersten gestreckten Teilpuls mit einem positiven Chirp umwandelbar ist, und dass der zweite Teilpuls eines jeden Paares von Teilpulsen in einen zweiten gestreckten Teilpuls mit negativen Chirp umwandelbar ist; und ein Modul zur Frequenzmischung (nonlinear crystal), das derart ausgebildet ist, dass jeder erste gestreckte Teilpuls mit seinem entsprechenden zweiten gestreckten Teilpuls mischbar ist, so dass das Mischen ein Summenfrequenzlicht erzeugt, so dass Summenfrequenzpulse Frequenzen besitzen, die gleich dem Zweifachen der Grundfrequenz sind.

**[0009]** Weiterer Stand der Technik ist bekannt aus Glebov, Leonid, et al. „Volume-chirped Bragg gratings: monolithic components for stretching and compression of ultrashort laser pulses.“ *Optical Engineering* 53.5 (2014): 051514-051514, sowie aus US 2013 / 0 313 440 A1.

**[0010]** Die Ausgangsbandbreite eines Laseroszillators wird durch seine resonatorinterne Dynamik bestimmt. Bei Pulslasern des Standes der Technik werden zur weiteren Reduzierung der Bandbreite des Lasers verschiedene Elemente zur Begrenzung der Bandbreite, wie beispielsweise ein Etalon, ein doppelbrechender Filter oder ein optisches Gitter, in einen Laserhohlraum eingebaut. Da alle diese Ansätze invasiv sind, führen sie zwangsläufig nachteilige Auswirkungen auf die Laser ein. Diese nachteiligen Effekte sind unter anderem zusätzliche Leistungsverluste und eine höhere Komplexität, was oft zu niedrigerer Lasereffizienz, geringer thermischer Stabilität, schärfere Empfindlichkeit hinsichtlich einer falschen Ausrichtung und einer längeren Aufwärmzeit des Lasersystems führt. Da ferner die resonatorinterne Strahlgröße häufig klein und durch das Design des Laserresonators vorgegeben ist, ist die Leistungsdichte in der Laserkavität normalerweise viel höher als die Ausgangsleistung des Lasers. Diese resonatorinternen Komponenten sind viel anfälliger für Beschädigungen.

**[0011]** Bei gepulsten DUV-Lasern des Standes der Technik hängt die Bandbreite der DUV-Leistung direkt von der Bandbreite des infraroten Grundlasers ab. Das heißt, je breiter die Bandbreite des Grundlasers ist, desto breiter ist das DUV und desto breiter ist die DUV-Ausgangsbandbreite. Eine Reduzierung der Bandbreite eines Lasers erfordert eine Neugestaltung des Oszillatorhohlraums des Lasers. Da der Hohlraum viele Eigenschaften des Lasers einschließlich der Bandbreite, der Wiederholungsrate sowie der Durchschnitts- und Spitzenleistungen beeinflussen kann, ist eine Neugestaltung des Hohlraums zur Reduzierung der Bandbreite bei gleichzeitigem Erhalt anderer Laserparameter eine komplexe und zeitaufwendige Aufgabe. Weiterhin kann es nicht möglich sein, eine spezifische Spezifikation einer DUV-Laser-Bandbreite unter Verwendung eines griffbereiten infraroten Grundlasers zu erreichen.

**[0012]** Die Verringerung der Bandbreite durch Frequenzverdopplung aufgrund der Kombination von zwei Femtosekundenpulsen mit entgegengesetzten Chirp ist aus dem Stand der Technik bekannt (siehe Raoult et al., *Opt. Lett.* 23, 1117-1119 (1998)). Ein Femtosekundenpuls wurde zuerst gecirpt und dann unter Verwendung eines Gitter-Paares auf über 1 ns gestreckt und nach einer anschließenden Verstärkung in zwei Pulse aufgeteilt. Die beiden Pulse wurden unvollständig durch die Verwendung von zwei Gitter-Paar Dispergatoren in mehrere Pikosekundenpulse mit gegenläufigem Chirp komprimiert. Die Summenfrequenzzeugung dieser beiden Pulse resultiert in einer wesentlich schmalere Bandbreite. Allerdings beruht dieser Ansatz auf gitterbasierte Stecker und Verdichter, die sperrig sind und nicht über die benötigte mechanische Stabilität für kommerzielle industrielle Anwendungen verfügen. Weiterhin sind Femtosekundenpulse zur Verwendung bei Inspektionsanwendungen von Halbleitern im Allgemeinen ungeeignet, da die breite Bandbreite (mehrere nm) den Aufbau der Systemoptik sehr kompliziert und die hohe Spitzenleistung die zu inspizierende Probe leicht beschädigen kann.

**[0013]** Daher wird ein Bedarf für DUV-Laser geweckt, der einige oder alle der obigen Nachteile überwindet. Insbesondere ergibt sich ein Bedarf für ein Mittel zur Reduzierung oder Steuerung der Bandbreite eines DUV-Lasers, einschließlich DUV Laser mit Pulslängen zwischen wenigen Pikosekunden und einigen hundert Pikosekunden.

#### ZUSAMMENFASSUNG DER OFFENBARUNG

**[0014]** Die vorliegende Erfindung bezieht sich im allgemeinen auf Vorrichtungen und Verfahren zur Verringerung der Bandbreite, die die Bandbreite des Ausgangslichts des Lasers reduzieren und/oder steuern, indem die Lichtpulse des Grundlasers in zwei Teilpulse aufgeteilt, die beiden Teilpulse

gestreckt und ihnen gegenläufige Chirps hinzugefügt werden, wobei ein oder mehrere monolithische, optische Geräte (z.B. ein oder mehrere Chirp-Volumen-Bragg-Gitter oder Chirp-Faser-Bragg-Gitter) verwendet werden. Anschließend werden die gestreckten/gechirpten Teilpulse wieder kombiniert (gemischt), um ein Summenfrequenzlicht (Ausgang) zu erzeugen, das aus Pulsen mit Frequenzen besteht, die gleich dem Zweifachen der Grundfrequenz sind (d.h. wo die Pulse Wellenlängen aufweisen, die einer Hälfte der Grundwellenlänge der Lichtpulse des Grundlasers entsprechen). Gemäß einer Ausführung der Erfindung wird das Mischen der beiden Teilpulse unter Verwendung eines Moduls zur Frequenzmischung durchgeführt, so dass die gegensätzlichen (positiv und negativ) Chirps der beiden gestreckten/gechirpten Teilpulse während des Vorgangs der Frequenzmischung eliminiert werden, wodurch das Summenfrequenzlicht des Ausgangs eine viel geringere Bandbreite aufweist, als es durch die direkte Erzeugung der zweiten Oberschwingung haben würde. Ein Vorteil des auf diese Weise erzeugten Summenfrequenzausgangslichts ist, dass dieser Ansatz sehr wenig von der grundlegenden Laserleistung verschwendet, wie dies bei Methoden der Fall ist, die einfach einen Filter oder ein Etalon verwenden, um unerwünschte Wellenlängen auszusondern.

**[0015]** Gemäß beispielhaften Ausführungsbeispielen, die nicht zur vorliegenden Erfindung gehören, umfasst diese eine Laseranordnung mit einem Grundlaser und einen Apparat zur Verringerung der Bandbreite, der im allgemeinen ein Trennelement für den Puls, ein einziges monolithisches Gerät (wie z.B. einen monolithischen gechirpten Volumen Bragg-Gitter (monolithisches CBG)), ein Modul zur Frequenzmischung und zusätzliche optische Elemente (wie z.B. Spiegel, Polarisationsstrahlteiler, Viertelwellenplatten (QWPs) und Faltspiegel) umfasst, die betriebsbereit derart angeordnet sind, dass sie Lichtpfade für die Teilpulse zwischen dem Trennelement für den Puls und dem monolithischen Gerät und zwischen dem monolithischen Gerät und dem Modul zur Frequenzmischung bereitstellen. Der Grundlaser (beispielsweise ein Nd:YAG oder ein Nd-dotierter Vanadat-Laser, der in einer Ausführungsform ein Modul zur Umwandlung einer zweiten Oberschwingung umfasst) erzeugt Grundlicht, das Pulse erzeugt, die mit einer Frequenz innerhalb einer Grundfrequenz-Bandbreite angeordnet sind. Die Apparatur zur Einengung der Bandbreite ist stromabwärts vom Grundlaser angeordnet (d.h. außerhalb der Laserkavität), um dadurch die schädlichen Effekte eines Systems in der Kavität zur Steuerung der Bandbreite zu vermeiden, und auch andere Laserparameter (d.h. andere, als die Bandbreite) beizubehalten ohne den Oszillatorhohlraum des Lasers neu gestalten zu müssen. Speziell ist das Trennelement für den Puls (beispielsweise ein partie-

ller Reflektor oder ein Strahlteiler) derart angeordnet, dass es Licht des Grundlasers empfängt, und derart konfiguriert, dass es jeden Lichtpuls des Grundlasers in ein Paar von entsprechenden (ersten und zweiten) Teilpulsen mit etwa gleicher Energie unterteilt. In einer derzeit bevorzugten Ausführungsform werden die beiden Teilpulse jeweils entlang getrennter Lichtpfade auf die gegenüberliegenden Oberflächen des monolithischen Geräts gerichtet, wobei zwei einander gegensätzlich gechirpte und gestreckte Teilpulse erzeugt werden, die Spiegelbilder voneinander sind (d.h. dass die beiden gestreckten Teilpulse Änderungen in der Frequenz über die Zeit aufweisen, die in etwa gleich groß sind, aber im Vorzeichen entgegengesetzt). Die Verwendung in dieser Weise von einem einzigen monolithischen Gerät stellt eine überlegene optische und mechanische Stabilität zur Verfügung und nimmt nur einen Bruchteil des Platzes im Vergleich zu Ausgestaltungen mit einem gitterbasierten Strecker und Verkürzer ein und gewährleistet, dass die beiden gestreckten Teilpulse mit im Wesentlichen spiegelbildlichen Pulsfrequenzmustern gechirpt sind. Weiterhin hat ein richtig ausgelegtes CBG eine viel höhere Dispersion als gitterbasierte Strecker und Verkürzer und kann verwendet werden, um schmalbandige Pikosekundenpulse zu strecken, was sehr anspruchsvoll aufgrund des Fehlens der Winkeldispersion von Gittern ist. Die beiden gestreckten, entgegengesetzt gechirpten Teilpulse werden dann entlang getrennter Lichtwege in das Modul zur Frequenzmischung gerichtet. Die Lichtwege der beiden Teilpulse sind zwischen dem Trennelement für den Puls und dem Modul zur Frequenzmischung vorzugsweise derart abgestimmt angeordnet, dass sie bis etwa 10% der Pulslänge voneinander abweichen können. Optische Elemente (z.B. Spiegel), die die Lichtwege bilden, können leicht neu positioniert werden, um die relative Zeitverzögerung zwischen den beiden am Modul zur Frequenzmischung ankommenden gestreckten Teilpulse zu ändern, wodurch eine Feinabstimmung der zentralen Wellenlänge der Summenfrequenz der Ausgangspulse unterstützt wird, was für einige Anwendungen, die eine genaue spezifische Wellenlänge benötigen, wie z.B. 193 nm Licht für die Inspektion von Photomasken, von Vorteil ist. Das Summenfrequenzmodul (wie z.B. ein BBO-, LBO- oder CLBO-Kristall, der entweder für eine Typ I oder Typ II Frequenzmischung ausgebildet ist oder ein periodisch gepolter, nichtlinearer Kristall, wie beispielsweise Lithiumniobat oder stöchiometrisches Lithiumtantalat, SLT) ist konfiguriert, um die entsprechenden positiv gechirpten und negativ gechirpten gestreckten Teilpulse zu mischen, dass die sich ergebenden Summenfrequenzpulse Mittenfrequenzen besitzen, die dem zweifachen der Grundfrequenz (wie z. B. derart, dass die Summenfrequenzpulse Mittelwellenlängen haben, die gleich sind zu einer Mittelwellenlänge von etwa 532 nm und etwa 266 nm) entsprechen.

**[0016]** Nach alternativen Ausführungsformen verwenden die Geräte zur Verringerung der Bandbreite der verschiedenen Laseranordnungen unterschiedliche Anordnungen der optischen Elemente, um unterschiedliche Vorteile zu erzielen. Beispielsweise sind in einem Ansatz die optischen Elemente, die die zwei Lichtwege der Teilpulse bilden so konfiguriert, dass die beiden gestreckten Teilpulse im Wesentlichen orthogonale Polarisierungen besitzen und in das Modul zur Frequenzmischung entlang kollinearere Pfade eintreten und das Modul zur Frequenzmischung ist derart konfiguriert, dass die beiden gestreckten Teilpulse mit Typ-II-Frequenzmischtechniken gemischt werden. Der Ansatz der orthogonalen Polarisierung und des kollinearen Pfades vereinfacht die optische Anordnung und bewirkt, dass die gestreckten Teilpulse überlappen, während sie durch das Modul zur Frequenzmischung laufen, was in einer effizienten Erzeugung des Summenfrequenzlichts als eine zweite Oberschwingung des Grundlaserlichts resultiert. In einem alternativen Ansatz sind die optischen Elemente, die die zwei Lichtwege der Teilpulse bilden so ausgebildet, dass die beiden gestreckten Teilpulse im Wesentlichen parallele Polarisierungen haben und in das Modul zur Frequenzmischung unter einem spitzen Winkel (z.B. weniger als etwa  $4^\circ$ ) eintreten. Der Ansatz der parallelen Polarisierung und des nicht kollinearen Pfades bietet den Vorteil, eine Typ I Mischung zu unterstützen, die effizienter ist als eine Typ II Mischung, und unterstützt somit die Verwendung entweder kürzerer Kristalle oder die Erzeugung von mehr Ausgangsleistung (d.h., für eine gegebene Eingangsleistung und Kristalllänge). Der Ansatz der parallelen Polarisierung und des nicht kollinearen Pfades ermöglicht die Frequenzmischung in einem periodisch gepolten Kristall, wie z.B. periodisch gepoltes Lithiumniobat (PPLN) oder periodisch gepoltes SLT (PPSLT). Periodisch gepolte Kristalle können höhere, nichtlineare Koeffizienten aufweisen als Materialien, wie z.B. LBO, BBO und CLBO, und können als längere Kristalle verwendet werden, wodurch eine effizientere Umwandlung der ersten Oberschwingung in die zweite Oberschwingung möglich ist.

**[0017]** Gemäß weiteren alternativen Ausführungsformen nutzen Laseranordnungen der vorliegenden Erfindung das oben erwähnte CGB basierte Gerät zur Verringerung der Bandbreite in Kombination mit zumindest einem Modul zur Umwandlung der Oberschwingung, einem optischen Gerät zur Filterung der Bandbreite und einem zusätzlichen Modul zur Frequenzmischung, um ein Laserausgangslicht zu erzielen, das die oben beschriebene reduzierte und/oder gesteuerte Bandbreite aufweist, wobei die zusätzlichen Strukturen die Erzeugung des Laserausgangslichts bei einer höheren Oberschwingung (d.h. über  $2x$ ) einer Grundlichtfrequenz (d.h. über einer zweiten Oberschwingung der Grundfrequenz) erleichtern. In einer beispielhaften Ausführungsform

nutzt eine DUV-Laserbaugruppe ein, wie oben beschrieben, CGBbasiertes Gerät zur Verringerung der Bandbreite, um Summenfrequenzlicht bei der zweiten Oberschwingung des Grundlichts zu erzeugen. Anschließend durchläuft das Summenfrequenzlicht ein Modul zur Umwandlung der Oberschwingung, um Laserausgangslicht bei einer höheren Oberschwingung (z.B. vierten) des Grundlichts zu erzeugen. In einem anderen Ausführungsbeispiel leitet eine DUV-Laseranordnung das Grundlicht in eine optische Filteranordnung für die Bandbreite (z.B. ein Etalon), die einen ersten Teil eines jeden Grundlichtpulses reflektiert (abgelehnt), der Frequenzen außerhalb der schmalen Bandbreite besitzt, und einen zweiten Teil eines jeden Grundlichtpulses durchlässt, der Frequenzen innerhalb der schmalen Bandbreite besitzt. Der aussortierte erste Teil eines jeden Grundlichtpulses, der in herkömmlichen Systemen verworfen und somit verschwendet werden würde, wird, wie zuvor beschrieben, durch ein CGB basiertes Gerät zur Verringerung der Bandbreite geleitet, wobei die zuvor nicht verwertbaren und außerhalb des Bandes liegenden Frequenzen des ersten Teils in nutzbares Summenfrequenzlicht umgewandelt wird, das Frequenzen innerhalb der schmalen Bandbreite besitzt. Das Summenfrequenzlicht wird dann durch ein optionales Modul zur Umwandlung der Oberschwingung geleitet, und anschließend wird entweder das Summenfrequenzlicht oder das Licht der (ersten) Oberschwingung, das das optionale Modul zur Umwandlung der Oberschwingung verlässt, zu einem zweiten Modul zur Frequenzmischung geleitet. Das zweite Modul zur Frequenzmischung ist derart konfiguriert, dass das Summenfrequenzlicht (oder die optionale erste Oberschwingung) mit dem zweiten Teil des Grundlichts (d.h. der schmale Teil der Bandbreite, der durch das optische Gerät zur Filterung der Bandbreite gelaufen ist) oder einer Oberschwingung davon gemischt wird, um Laserausgangslicht mit einer höheren Oberschwingung und einer höheren Energie zu erzeugen, als dies ohne die Verwendung des CGB basierten Geräts zur Verringerung der Bandbreite der Fall wäre.

**[0018]** Ein beispielhaftes Inspektionssystem wird beschrieben. Dieses Inspektionssystem umfasst eine Beleuchtungsquelle, Optik und einen Detektor. Die Beleuchtungsquelle umfasst eine DUV-Laseranordnung, die das CGB basierte Gerät zur Verringerung der Bandbreite, wie oben erwähnt, verwendet (d.h. ein Trennelement für den Puls, ein oder mehrere ein monolithische Geräte, ein Modul zur Frequenzmischung und zugehörigen optischen Elementen), um DUV-Strahlung einer gewünschten Wellenlänge und Bandbreite zu erzeugen. Die Optik ist derart konfiguriert, dass die DUV-Strahlung von der Beleuchtungsquelle auf eine Probe gerichtet und fokussiert wird. Die Probe wird von einem Tisch getragen, der während der Inspektion relativ zur Optik bewegt wird. Der Detektor ist derart konfigu-

riert, dass er von der Probe reflektiertes oder gestreutes Licht empfängt, wobei die Optik ferner derart konfiguriert ist, dass sie das reflektierte oder gestreute Licht sammelt, lenkt und auf den Detektor fokussiert. Der Detektor umfasst einen oder mehrere Bildsensoren. Mindestens ein Bildsensor kann ein Zeitverzögerungs- und Integrationssensor (TDI) sein.

**[0019]** Das beispielhafte Inspektionssystem kann eine oder mehrere Beleuchtungsquellen umfassen, die die Probe aus unterschiedlichen Einfallswinkeln und/oder unterschiedlichen Azimut-Winkeln und/oder mit unterschiedlichen Wellenlängen und/oder Polarisationszuständen beleuchten, wobei eine oder mehrere der Beleuchtungsquellen den oben beschriebenen Ansatz der neuen Bandbreitensteuerung integriert haben. Das beispielhafte Inspektionssystem kann eine oder mehrere Pfade zum Sammeln umfassen, die Licht, das durch die Probe in verschiedenen Richtungen reflektiert oder gestreut wurde, sammeln und/oder die empfindlich gegenüber verschiedenen Wellenlängen und/oder verschiedenen Polarisationszuständen sind. Das beispielhafte Inspektionssystem kann einen TDI-Sensor mit Ausleseschaltungen auf zwei Seiten umfassen, die verwendet werden, um gleichzeitig zwei verschiedene Signale auszulesen. Das beispielhafte Inspektionssystem kann einen elektronbombardierten Bildsensor umfassen.

**[0020]** Ebenso wird ein beispielhaftes Verfahren zur Inspektion einer Probe beschrieben. Das beispielhafte Verfahren schließt das Richten und Fokussieren der Strahlung von einer DUV-Laser-Beleuchtungsquelle auf die Probe ein, wobei die DUV-Laser-Beleuchtungsquelle, derart konfiguriert ist, dass die Bandbreitensteuerung in der oben beschriebenen Art und Weise implementiert wird. Die Probe wird von einem Tisch getragen, der sich während der Inspektion relativ zur Optik bewegt. Das Verfahren verwendet ferner Optik, um das von der Probe reflektierte oder gestreute Licht zu sammeln, zu richten und auf einen Detektor zu fokussieren. Der Detektor umfasst einen oder mehrere Bildsensoren. Mindestens ein Bildsensor kann ein Zeitverzögerungs- und Integrationssensor (TDI) sein. Das Verfahren umfasst ferner das Steuern der Bandbreite des DUV-Lasers mit einem Chirp-Volumen-Bragg-Gitter (CBG).

#### KURZE BESCHREIBUNG DER ZEICHNUNGEN

**Fig. 1** zeigt ein beispielhaftes Inspektionssystem einer Beleuchtungsquelle, die einen DUV-Laser umfasst.

**Fig. 2A** und **2B** veranschaulichen ein beispielhaftes Inspektionssystem, das eine Linienbeleuchtung mit einen oder mehreren Detektionskanälen und einen DUV-Laser verwendet.

**Fig. 3** zeigt ein beispielhaftes Inspektionssystem mit senkrechter und schiefer Beleuchtung.

**Fig. 4** zeigt ein beispielhaftes Inspektionssystem mit Hellfeld- und Dunkelfeldbeleuchtungskanälen.

**Fig. 5** veranschaulicht ein beispielhaftes Inspektionssystem, das einen gespaltenen Bildauslesesensor und eine Beleuchtungsquelle, die ein DUV-Laser ist, umfasst.

**Fig. 6A** veranschaulicht einen beispielhaften DUV-Laser, der zur Verringerung der Laserbandbreite ein CBG umfasst und nicht zur Erfindung gehört.

**Fig. 6B** veranschaulicht beispielhaft eine alternative Ausführungsform des DUV-Lasers, der zur Verringerung der Laserbandbreite ein CBG umfasst und nicht zur Erfindung gehört.

**Fig. 6C** veranschaulicht beispielhaft eine alternative Ausführungsform des DUV-Lasers, der zur Verringerung der Laserbandbreite ein CBG umfasst und nicht zur Erfindung gehört.

**Fig. 7** veranschaulicht beispielhaft eine alternative Ausführungsform des DUV-Lasers, der zur Verringerung der Laserbandbreite ein CBG umfasst und nicht zur Erfindung gehört.

**Fig. 8** veranschaulicht beispielhaft eine alternative Ausführungsform des DUV-Lasers, der zur Verringerung der Laserbandbreite ein CBG umfasst.

**Fig. 9** zeigt ein beispielhaftes Modul zur Frequenzmischung, um zu Kombinieren und eine Summenfrequenz aus zwei orthogonal polarisierten Pulsen zu erzeugen.

**Fig. 10** zeigt ein beispielhaftes Modul zur Frequenzmischung, um zu Kombinieren und eine Summenfrequenz aus zwei Pulsen mit paralleler Polarisation zu erzeugen.

**Fig. 11A** und **11B** sind Graphen, die eine beispielhafte Grund-Bandbreite und zugehörige Spektren einer zweiten Oberschwingung zeigen.

#### DETAILLIERTE BESCHREIBUNG DER ZEICHNUNGEN

**[0021]** Die vorliegende Erfindung bezieht sich auf eine Verbesserung der Sensoren für die Halbleiter-Inspektionssysteme. Die nachfolgende Beschreibung soll einen Fachmann auf dem Gebiet ermöglichen, die Erfindung herzustellen und zu verwenden, wie diese im Kontext einer bestimmten Anwendung und ihrer Anforderungen bereitgestellt ist. Wie hier verwendet, sind Richtungsangaben, wie z.B. „unten“, „nach oben“, „nach unten“, „vertikal“ und „horizontal“ als relative Positionen oder Orientierungen.

gen zum Zwecke der Beschreibung zu verstehen und nicht als ein absolutes Bezugssystem. Verschiedene Modifikationen der bevorzugten Ausführungsform sind für einen Fachmann offensichtlich, und die hier definierten allgemeinen Prinzipien können auf andere Ausführungsformen angewendet werden. Daher ist es nicht beabsichtigt, dass die vorliegende Erfindung auf die im Besonderen gezeigten und beschriebenen Ausführungsformen beschränkt ist. Jedoch soll der breiteste Umfang gewährt werden, der in Übereinstimmung mit den Prinzipien und den hierin offenbarten neuen Merkmalen ist.

**[0022]** Fig. 1 zeigt ein beispielhaftes Inspektionssystem 100, das derart konfiguriert ist, um eine Probe 108, wie beispielsweise einen Wafer, ein Retikel oder eine Photomaske zu messen. Die Probe 108 liegt auf einem Tisch 112, um die Bewegung der verschiedenen Regionen der Probe 108 unter die Optik zu ermöglichen. Der Tisch 112 kann ein X-Y Tisch oder ein R- $\theta$  Tisch sein. In einigen Ausführungsformen kann der Tisch 112 während der Inspektion die Höhe der Probe 108 einstellen, um den Fokus beizubehalten. In anderen Ausführungsformen kann eine Objektivlinse 105 eingestellt werden, um den Fokus beizubehalten.

**[0023]** Eine Beleuchtungsquelle 102 kann einen oder mehrere Laser umfassen und/oder eine Breitbandlichtquelle. Die Beleuchtungsquelle 102 emittiert DUV-Strahlung und/oder VUV-Strahlung (nachfolgend gemeinsam als „UV-Strahlung“ bezeichnet). Die Beleuchtungsquelle 102 umfasst mindestens einen Grundlaser, der zur Erzeugung von UV-Strahlung konfiguriert ist, wobei der Grundlaser die hier beschriebene Regelung der Bandbreite umfasst, und derart positioniert ist, dass die UV-Strahlung als ein optisches System (Optik) 103 bis zu einer Probe 108 durchläuft. Die Optik 103 umfasst eine Objektivlinse 105, die zum Lenken und Richten der UV-Strahlung auf die Probe 108 konfiguriert ist. Die Optik 103 kann auch Spiegel, Linsen und/oder Strahlteiler umfassen. Ein Teil der UV-Strahlung (im Folgenden als „Licht“ bezeichnet), der von der Probe 108 umgeleitet wird (d. h., reflektiert oder gestreut), wird gesammelt, gerichtet und mittels der Optik 103 auf einen Detektor 106 fokussiert, der innerhalb einer Detektoranordnung 104 angeordnet ist.

**[0024]** Die Detektoranordnung 104 umfasst einen Detektor 106. Der Detektor 106 kann ein zweidimensionales Sensorarray oder einen eindimensionalen Zeilensensor enthalten. In einer Ausführungsform wird der Ausgang des Detektors 106 einem Computersystem 114 bereitgestellt, der den Ausgang analysiert. Das Computersystem 114 wird durch Programmanweisungen 118 konfiguriert, die auf einem Trägermedium 116 gespeichert werden können.

**[0025]** Eine Ausführungsform des Inspektionssystems 100 beleuchtet eine Linie auf der Probe 108 und sammelt das gestreute und/oder reflektierte Licht in einem oder mehreren Sammelkanälen für Dunkelfeld und/oder Hellfeld. In dieser Ausführungsform kann der Detektor 106 einen Zeilensensor oder einen elektronenbombardierte Zeilensensor umfassen.

**[0026]** Eine weitere Ausgestaltung des Inspektionssystems 100 beleuchtet mehrere Spots auf der Probe 108 und sammelt das gestreute und/oder reflektierte Licht in einen oder mehreren Sammelkanälen für Dunkelfeld und/oder Hellfeld. Bei dieser Ausführungsform kann der Detektor 106 ein zweidimensionales Sensorarray oder ein elektronenbombardierte, zweidimensionales Sensorarray umfassen.

**[0027]** Weitere Einzelheiten verschiedener Ausführungsformen des Inspektionssystems 100 kann der US Patentanmeldung US 2013/ 0 016 346 A1 mit dem Titel „WAFER INSPECTION SYSTEM“, eingereicht am 9. Juli 2012 von Romanowsky et al., der US Patentanmeldung US 2009 / 0 180 176 A1, eingereicht am 16. Juli 2009 von Armstrong et al., der US Patentanmeldung US 2007 / 0 002 465 A1, eingereicht am 4. Januar 2007 von Chuang et al., dem US-Patent US 5 999 310 A von Shafer et al., das am 7. Dezember 1999 erteilt wurde und dem US-Patent US 7 525 649 B1 von Leong et al., das am 28. April 2009 erteilt wurde, entnommen werden. Alle diese Patente und Patentanmeldungen sind hierin durch Bezugnahme aufgenommen.

**[0028]** Die Fig. 2(A) und 2(B) veranschaulichen Aspekte der Inspektionssysteme für Dunkelfeld, die Laseranordnungen und/oder hierin beschriebene Verfahren anderer Ausführungsbeispiele in Übereinstimmung mit der vorliegenden Erfindung verwenden. In Fig. 2(A) umfasst eine Beleuchtungsoptik 201 ein DUV-Lasersystem 220 mit der hierin beschriebenen Bandbreitensteuerung, die Licht 202 erzeugt, das durch den Spiegel oder die Linse 203 in eine Linie 205 auf die Oberfläche des Wafers oder die Photomaske (Probe) 211, welche inspiziert werden soll, fokussiert wird. Die Sammeloptik 210 richtet das von der Linie 205 gestreute Licht zum Sensor 215, wobei Linsen und/oder Spiegel, wie beispielsweise 212 und 213, verwendet werden. Die optische Achse 214 der Sammeloptik befindet sich nicht in der Beleuchtungsebene der Linie 205. In einigen Ausführungsformen ist die Achse 214 etwa senkrecht zur Linie 205. Der Sensor 215 weist einen Array-Sensor, wie beispielsweise einen linearen Array-Sensor, auf.

**[0029]** Fig. 2 (B) veranschaulicht ein Ausführungsbeispiel mit mehreren Dunkelfelderfassungssystemen (231, 232 bzw. 233), wobei jedes im Wesentlichen zu der Sammeloptik 210 von Fig. 2 (A) ähnlich

ist. Die Erfassungssysteme 231, 232 und 233 werden in Kombination mit Beleuchtungsoptik verwendet, die im Wesentlichen ähnlich zur Beleuchtungsoptik 201 aus Fig. 2 (A) ist. Die Probe 211 liegt auf dem Tisch 221, der die zu überprüfenden Bereiche unter die Optik bewegt. Der Tisch 221 kann einen X-Y Tisch oder einen R- $\theta$  Tisch umfassen, der vorzugsweise im Wesentlichen kontinuierlich während der Inspektion bewegt wird, um große Bereiche der Probe mit einer minimalen Totzeit zu inspizieren.

**[0030]** Weitere Einzelheiten der Inspektionssysteme in Übereinstimmung mit den in den Fig. 2 (A) und 2 (B) dargestellten Ausführungsformen können in dem US-Patent 7 525 649 B1 mit dem Titel „Surface inspection system using laser line illumination with two dimensional imaging“, erteilt am 28. April 2009, und im US-Patent US 6 608 676 B1 mit dem Titel „System for detecting anomalies and/or features of a surface“, erteilt am 19. August 2003, gefunden werden. Diese beiden Patente sind durch Bezugnahme hierin aufgenommen.

**[0031]** Fig. 3 zeigt ein Inspektionssystem 300, das konfiguriert ist, um Teilchen oder Defekte auf einer Probe unter Verwendung von senkrechten und schrägen Beleuchtungsstrahlen zu erfassen. In dieser Konfiguration beinhaltet ein DUV-Lasersystem 330 eine hierin beschriebene Bandbreitensteuerung, die einen Laserstrahl 301 bereitstellt. Eine Linse 302 fokussiert den Strahl 301 durch einen räumlichen Filter 303. Eine Linse 304 kollimiert den Strahl und leitet ihn zu einem polarisierenden Strahlteiler 305. Der Strahlteiler 305 richtet eine erste polarisierte Komponente in den normalen Beleuchtungskanal und eine zweite polarisierte Komponente in den schrägen Beleuchtungskanal, wobei die ersten und zweiten Komponenten orthogonal sind. Im normalen Beleuchtungskanal 306 wird die erste polarisierte Komponente durch eine Optik 307 fokussiert und durch den Spiegel 308 in Richtung auf eine Oberfläche einer Probe 309 reflektiert. Die von Probe 309 (wie beispielsweise einem Wafer oder einer Photomaske) gestreute Strahlung wird gesammelt und durch einen parabolisch geformten Spiegel 310 auf einen Sensor 311 fokussiert.

**[0032]** In dem schrägen Beleuchtungskanal 312 wird die zweite polarisierte Komponente durch den Strahlteiler 305 zu einem Spiegel 313 reflektiert, der diesen Strahl zu einer Halbwellenplatte 314 reflektiert und mittels einer Optik 315 wird der Strahl zu der Probe 309 fokussiert. Die aus dem schrägen Kanal 312 stammende und durch die Probe 309 gestreute Strahlung wird durch den Parabolspiegel 310 gesammelt und auf den Sensor 311 fokussiert. Der Sensor und die beleuchtete Fläche (von den senkrechten und schrägen Beleuchtungskanälen auf der Oberfläche 309) liegen vorzugsweise an den Brennpunkten des Parabolspiegels 310.

**[0033]** Der Parabolspiegel 310 kollimiert die Streustrahlung von der Probe 309 in einen kollimierten Strahl 316. Der kollimierte Strahl 316 wird dann von einem Objektiv 317 durch einen Analysator 318 zum Sensor 311 fokussiert. Es sei angemerkt, dass die gekrümmten Spiegelflächen, die andere Formen als eine paraboloidische Form haben, ebenfalls verwendet werden können. Ein Instrument 320 kann eine Relativbewegung zwischen den Strahlen und der Probe zur Verfügung stellen, so dass auf der Oberfläche der Probe verteilte Spots gescannt werden. Das US Patent 6,201,601, das am 13. März 2001 erteilt wurde, beschreibt ein Inspektionssystem 300 in weiteren Einzelheiten und ist hierin durch Bezugnahme aufgenommen.

**[0034]** Fig. 4 zeigt ein beispielhaftes katadioptrisches Abbildungssystem 400, das als ein Inspektionssystem mit Hellfeld-Inspektionsmodus und Dunkelfeld-Inspektionsmodus konfiguriert ist. Das System 400 kann zwei Beleuchtungsquellen umfassen: ein Lasersystem 401 und ein Beleuchtungsmodul 420 für breitbandiges Licht.

**[0035]** Beim Dunkelfeld-Modus regelt eine Anpassungsoptik 402 die Strahlgröße und das Profil der Laserbeleuchtung auf der zu untersuchenden Oberfläche. Das mechanische Gehäuse 404 umfasst eine Öffnung und Fenster 403 und ein Prisma 405, um den Laser entlang der optischen Achse bei senkrechtem Einfall auf die Oberfläche einer Probe 408 abzulenken. Das Prisma 405 leitet ebenfalls die spiegelnde Reflexion von Oberflächenmerkmalen der Probe 408 aus dem Objektiv 406. Das Objektiv 406 sammelt das von der Probe 408 gestreute Licht und fokussiert es auf den Sensor 409. Die Linsen für das Objektiv 406 können in der allgemeinen Form als katadioptrisches Objektiv 412, als eine fokussierende Linsengruppe 413 und als Tubuslinsenabschnitt 414 bereitgestellt werden, welche optional eine Zoom-Funktion umfassen können. Das Lasersystem 401 umfasst die Bandbreitensteuerung wie hierin beschrieben ist.

**[0036]** In einem Hellfeld-Modus leitet das Breitbandbeleuchtungsmodul 420 breitbandiges Licht zu einem Strahlteiler 410, der dieses Licht zu einer fokussierenden Linsengruppe 413 und zu einem katadioptrischen Objektiv 412 reflektiert. Das katadioptrische Objektiv 412 beleuchtet die Probe 408 mit dem breitbandigen Licht. Das Licht, das von der Probe reflektiert oder gestreut wird, wird mittels dem Objektiv 406 gesammelt und auf den Sensor 409 fokussiert. Das Breitbandbeleuchtungsmodul 420 umfasst beispielsweise eine mittels Laser gepumpte Plasma-Lichtquelle oder eine Lichtbogenlampe. Das Breitbandbeleuchtungsmodul 420 kann auch ein Autofokus-System umfassen, um ein Signal bereitzustellen, mit dem die Höhe der Probe 408 relativ zum katadioptrischen Objektiv 412 kontrolliert wird.

**[0037]** Die veröffentlichte US-Patentanmeldung US 2007 / 0 002 465 A1, die am 4. Januar 2007 veröffentlicht wurde und hier durch Bezugnahme aufgenommen ist, beschreibt das System 400 in weiteren Einzelheiten.

**[0038]** Fig. 5 zeigt ein Inspektionssystem 500 für Retikel, Photomasken oder Wafer, das gleichzeitig zwei Kanäle für Bilder oder Signale auf einen Sensor 570 detektiert. Der Bildsensor 570 umfasst einen geteilten Auslesebildsensor. Die Beleuchtungsquelle 509 enthält ein DUV-Lasersystem mit der hierin beschriebenen Bandbreitensteuerung. Die Betriebswellenlänge des DUV-Lasers kann kürzer als 200 nm sein, wie beispielsweise eine Wellenlänge von ca. 193 nm. Die beiden Kanäle können reflektierte und transmittierte Intensität aufweisen, wenn ein zu untersuchendes Objekt 530 transparent ist (beispielsweise ein Retikel oder eine Photomaske). Die beiden Kanäle können auch zwei verschiedene Beleuchtungsarten, wie z.B. Einfallswinkel, Polarisationszustände, Wellenlängenbereiche oder eine Kombination davon, aufweisen. Das Licht wird auf das zu inspizierende Objekt 530 gerichtet, wobei eine Beleuchtungsweitergabe 515 für Kanal eins und eine Beleuchtungsweitergabe 520 für Kanal zwei verwendet wird.

**[0039]** Das zu untersuchende Objekt 530 kann ein Retikel, eine Photomaske, ein Halbleiterwafer oder ein anderer zu inspizierender Artikel sein. Die Optik 540 zur Bildübertragung kann das Licht, das reflektiert und/oder von dem zu untersuchende Objekt 530 durchgelassen wird, in einen Kanal eins 555 für die Weitergabe des Bildmodus und in einen Kanal zwei 560 für die Weitergabe des Bildmodus richten. Der Kanal eins 555 für die Weitergabe des Bildmodus ist abgestimmt, um die Reflexion oder Transmission der entsprechenden Beleuchtungsweitergabe 515 zu erkennen, wobei der Kanal zwei 560 für die Weitergabe des Bildmodus entsprechend eingestellt ist, um die Reflexion oder Transmission im Kanal zwei 560 für die Beleuchtungsweitergabe zu erkennen. Der Kanal eins 555 für die Weitergabe des Bildmodus und der Kanal zwei 560 für die Weitergabe des Bildmodus leiten ihre Ausgänge wechselseitig zu dem Sensor 570. Die Daten entsprechen den erfassten Signalen oder Bildern für die beiden Kanäle und werden als Daten 590 dargestellt und an einen Computer (nicht gezeigt) für die Verarbeitung übertragen.

**[0040]** Weitere Einzelheiten von Inspektionssystemen und Inspektionsverfahren für Retikel und Fotomasken, die konfiguriert sein können, um durchgelassenes und reflektiertes Licht von einem Retikel oder einer Photomaske zu messen, sind in US 7 352 457 B2, erteilt für Kvamme et al. am 1. April 2008 und in US 5 563 702 A, erteilt für Emery et al. am 8. Oktober 1996, beschrieben. Beide sind hierin durch Bezugnahme aufgenommen.

**[0041]** Weitere Einzelheiten in Bezug auf exemplarische Ausführungsformen des Bildsensors 570 sind in der US-Patentanmeldung US 9 426 400 B2, mit dem Titel „METHOD AND APPARATUS FOR HIGH SPEED ACQUISITION OF MOVING IMAGES USING PULSED ILLUMINATION“, von Brown et al. am 4. Dezember 2013 angemeldet und in US 7 528 943 B2 mit dem Titel „METHOD AND APPARATUS FOR SIMULTANEOUS HIGH-SPEED ACQUISITION OF MULTIPLE IMAGES“ von Brown et al., erteilt am 5. Mai 2009, offenbart. Diese Patente und Patentanmeldungen sind hierin durch Bezugnahme aufgenommen.

**[0042]** Fig. 6A zeigt eine nicht zur Erfindung gehörende Ausführungsform einer gepulsten Laser-Baugruppe 600A, die einen Grundlaser 601 und ein Gerät 610A zur Verringerung der Bandbreite umfasst, welches im Allgemeinen ein Trennelement 602A für den Puls, ein monolithisches Gerät 607, ein Modul 608A zur Frequenzmischung und verschiedene optische Elemente umfassen, die derart gestaltet sind, dass sie ein Summenfrequenzlicht LSF (oder Laserausgangslicht Lout) erzeugen, das aus Pulsen LSFP mit Frequenzen besteht, die innerhalb einer Bandbreite angeordnet sind, die schmaler ist als wenn sie durch direkte Erzeugung der zweiten Oberschwingung von Lichtpulsen 601A-LP des Grundlasers 601 erzeugt werden würde.

**[0043]** Bezugnehmend auf die linke Seite der Fig. 6A, ist der Grundlaser 601 so konfiguriert, dass Lasergrundlicht L erzeugt wird, das aus einer Reihe von Grundlaserlichtpulsen LP besteht, wobei jeder Grundlaserlichtpuls LP eine zentrale Grundfrequenz  $\omega_f$  und eine Grundfrequenz-Bandbreite  $\Delta\omega_f$  (mit einer entsprechenden zentralen Grundwellenlänge  $\lambda_f$  und einer entsprechende Grundwellenlängen-Bandbreite  $\Delta\lambda_f$ ) hat. Gemäß einem praktischen Beispiel haben Grundlaserlichtpulse LP eine Pulslänge (Dauer), die durch eine volle Breite bei halbem Maximum (FWHM)  $D_f$  bestimmt wird, von mehr als etwa einer Pikosekunde, wie zum Beispiel eine FWHM Pulslänge zwischen etwa einer Pikosekunde und etwa zehn Nanosekunden. In diesem Beispiel kann die zentrale Grundfrequenz  $\omega_f$  eine Frequenz im nahen Infrarot oder sichtbaren Teil des Spektrums sein, wie zum Beispiel eine Frequenz zwischen etwa 150 THz und etwa 750 THz (das heißt einer Frequenz, die einer Wellenlänge zwischen etwa 2  $\mu\text{m}$  und 400 nm entspricht). Die Grundfrequenz-Bandbreite kann durch ein FWHM von ungefähr 1 THz oder weniger gekennzeichnet werden. Typischerweise wird die Bandbreite der Grundfrequenz der Laserlichtpulse LP einige bis zu etwa dem Zehnfachen der Bandbreite eines umwandlungsbegrenzten Laserpulses der gleichen Pulslänge  $D_f$  sein. Wie durch das Zick-Zack-Merkmal bei dem gestrichelten Pfeil zwischen dem Grundlaser 601 und dem Trennelement 602 für den Puls angegeben, werden sequentiell erzeugte

Pulse durch eine Zeitdauer getrennt, die typischerweise viel länger, ist als die Länge des Grundpulses  $D_f$ . Da, wie unten erklärt, die optischen Weglängen innerhalb der Laseranordnung 600A zu etwa 10% oder besser abgestimmt sind, wird die Laseranordnung 600A mit jeder Pulsfrequenz arbeiten.

**[0044]** Das Trennelement 602 für den Puls ist derart angeordnet, dass es Licht  $L$  des Grundlasers empfängt, und derart konfiguriert ist, dass es jeden Laserlichtpuls  $LP$  in zwei verknüpfte Teilpulse aufteilt, die im Folgenden als erster Teilpuls  $LSP1$  und zweiter Teilpuls  $LSP2$  bezeichnet werden. In der in **Fig. 6A** dargestellten Ausführungsform ist ein Trennelement 602 implementiert, das ein Trennelement verwendet, welches derart konfiguriert ist, dass jeder Laserlichtpuls  $LP$  so aufgeteilt wird, dass die Teilpulse  $LSP1$  und  $LSP2$  etwa gleiche Energie haben, und dass die beiden Teilpulse in unterschiedliche Richtungen, weg vom Trennelement 602, übertragen werden (beispielsweise wie dies in **Fig. 6A** dargestellt ist, tritt der erste Teilpuls  $LSP1$  durch das Trennelement 602 hindurch und wird horizontal nach rechts gerichtet, und der zweite Teilpuls  $LSP2$  wird nach oben, vom Trennelement 602 aus gesehen, umgeleitet (reflektiert). In einer Ausführungsform kann das Trennelement 602 durch einen polarisierenden Strahlteiler implementiert werden, der eine Polarisation, beispielsweise die vertikale Polarisation, reflektiert und den orthogonalen Polarisationszustand durchlässt, wie zum Beispiel die horizontale Polarisation. In dieser Ausführungsform haben die Teilpulse  $LSP1$  und  $LSP2$  etwa die gleiche Energie, wenn die Pulse  $LP$  des Grundlasers in einem geeigneten Winkel relativ zum Trennelement 602 polarisiert sind, beispielsweise in einem Winkel von etwa  $45^\circ$ .

**[0045]** Die Teilpulse  $LSP1$  und  $LSP2$  werden entlang zweier verschiedener optischer Pfade zu einem monolithischen Gerät 607 mittels entsprechender optischer Elemente geleitet, die betriebsfähig zwischen dem Trennelement 602 für den Puls und dem monolithischen Gerät 607 angeordnet sind. Wie durch die gepunktet-gestrichelte Linie dargestellt ist, die ausgehend vom Trennelement 602 für den Puls nach rechts verläuft, läuft der erste Teilpuls  $LSP1$  ausgehend vom Trennelement 602 durch einen ersten polarisierenden Strahlteiler (PBS) 603 und wird dann in einen ersten, zirkular polarisierten Teilpuls beim Durchgang durch eine erste der Viertelwellenplatte (QWP) 604 gewandelt und gelangt dann an eine erste Stirnfläche 607-1 des monolithischen Geräts 607. Im Gegensatz dazu, wie durch die doppelt-gepunktet-gestrichelte Linie dargestellt ist, erstreckt sich diese, ausgehend vom Trennelement 602, nach oben. Der zweite Teilpuls  $LSP2$  wird durch die Umlenkspiegel 611 und 612 reflektiert und zu einem zweiten Polarisationsstrahlteiler (PBS) 605 geleitet. Der zweite Teilpuls  $LSP2$  wird dann horizon-

tal nach links umgelenkt und in einen zweiten, zirkular polarisierten Teilpuls beim Durchgang durch eine zweite der Viertelwellenplatte (QWP) 606 gewandelt, die benachbart zu einer zweiten Stirnfläche 607-2 des monolithischen Geräts 607 angeordnet ist. Die ersten und die zweiten zirkular polarisierten Teilpulse werden somit in entgegengesetzte Richtungen auf gegenüberliegende Oberflächen 607-1, 607-2 des monolithischen Geräts 607 übertragen.

**[0046]** Gemäß einem Aspekt der Erfindung können ein oder mehrere monolithische Geräte derart konfiguriert und angeordnet sein, dass zugeordnete erste und zweite zirkular polarisierte Teilpulse in gestreckte Teilpulse  $LSSP1$  und  $LSSP2$  umgewandelt werden, die jeweils einen entgegengesetzten Chirp (d.h. positiv und negativ) haben. Bei dem einzigen, in **Fig. 6A** gezeigten monolithischen Gerät ist das monolithische Gerät 607 gemäß bekannter Techniken derart konfiguriert, dass bei der Reflexion des ersten zirkularpolarisierten Teilpulses von der Oberfläche 607-1 der zirkularpolarisierte Teilpuls gestreckt wird (wie zum Beispiel dies durch die Blase im linken unteren Abschnitt von **Fig. 6A** angedeutet ist, so dass eine Dauer/Länge  $D_s$  des gestreckten Teilpulses  $LSSP1$  größer (zum Beispiel zwei- oder mehrfach größer) ist, als die Dauer  $D_f$  des Lichtpulses  $LP$  (des Grundlasers), und verändert wird, um einen positiven Chirp zu erhalten (d.h., eine ansteigende Frequenz über der Zeit zu erhalten, dass eine anfängliche Wellenlänge  $\lambda_{sA}$  des gestreckten Teilpulses  $LSSP1$  länger ist als eine Wellenlänge  $\lambda_{sB}$  des späteren gestreckten Teilpulses  $LSSP1$ ). In ähnlicher Weise wird, wenn von der zweiten Oberfläche 607-2 reflektiert wird, der zweite zirkular polarisierte Teilpuls gestreckt und verändert, um einen negativen Chirp zu erhalten (wie zum Beispiel dies durch die Blase im oberen rechten Teil von **Fig. 6A** angedeutet ist, weist der gestreckte Teilpuls  $LSSP2$  eine mit der Zeit abnehmende Frequenz auf, so dass eine anfängliche Wellenlänge  $\lambda_{sC}$  des gestreckten Teilpulses  $LSSP2$  kürzer ist als eine Wellenlänge  $\lambda_{sD}$  des späteren gestreckten Teilpulses  $LSSP2$ ). Man beachte, dass das Strecken vorzugsweise derart durchgeführt wird, dass die gestreckten Teilpulse  $LSSP1$  und  $LSSP2$  im Wesentlichen die gleichen Energien besitzen, wie der erste bzw. zweite zirkularpolarisierte Teilpuls. In einer Ausführungsform ist das monolithische Gerät 607 ferner so konfiguriert, dass der erste, positiv gechirpte und gestreckte Teilpuls  $LSSP1$  und der zweite negativ gechirpte und gestreckte Teilpuls  $LSSP2$  mit Änderungen der Frequenz über die Zeit erzeugt werden, die etwa gleich groß sind, aber entgegengesetzte Vorzeichen aufweisen (d. h. dass der positiv gechirpte und gestreckte Teilpuls  $LSSP1$  im Wesentlichen ein Spiegelbild des negativ gechirpten und gestreckten Teilpulses  $LSSP2$  ist). Ein Vorteil der Reflexion der beiden Teilpulse von entgegengesetzten Enden eines einzelnen CBG oder Chirp-Faser-

Bragg-Gitters ist im Gegensatz zu der Verwendung von zwei separaten Bauteilen für das monolithische Gerät 607, dass das monolithische Gerät 607 entgegengesetzte Chirps den beiden Teilpulsen aufprägt, da die Pulse in die Bragg-Gitter von gegenüberliegenden Enden eintreten und sich in entgegengesetzte Richtungen ausbreiten.

**[0047]** Die gestreckten Teilpulse LSSP1 und LSSP2 werden dann über entsprechende optische Pfade vom monolithischen Gerät 607 zu dem Modul 608A zur Frequenzmischung mittels entsprechender optischer Elemente geleitet. Wie durch die kurz-lang gestrichelte Linie dargestellt, die sich horizontal von der ersten Oberfläche 607-1 aus erstreckt, gelangt der erste gestreckte Teilpuls LSSP1 vom monolithischen Gerät 607 durch QWP 604 und PBS 603 und wird vom PBS 603 nach unten zum Umlenkspiegel 613 umgeleitet. Vom Umlenkspiegel 613 wird der erste gestreckte Teilpuls LSSP1 zum Umlenkspiegel 614 und vom Umlenkspiegel 614 nach oben auf den zweiten Polarisationsstrahlteiler (PBS) 605 gerichtet, von dem der erste gestreckte Teilpuls LSSP1 nach rechts in Richtung auf das Modul 608A zur Frequenzmischung umgeleitet wird. Im Gegensatz dazu, wie durch die doppelt-kurz-lang gestrichelte Linie dargestellt, die sich horizontal nach rechts von der zweiten Oberfläche 607-1 aus erstreckt, passiert der zweite gestreckte Teilpuls LSSP2, ausgehend vom monolithischen Gerät 607, QWP 606 bis PBS 605 und gelangt durch PBS 605 zum Modul 608A zur Frequenzmischung. Man beachte, dass nach der Reflexion und dem Chirp durch das monolithische Gerät 607, jeder gestreckte Teilpuls LSSP1 und LSSP2 in linear polarisiertes Licht mit einer Polarisation zurückgewandelt wird, das orthogonal zum einfallenden Strahl durch entsprechende QWPs 604 und 605 ist. Diese beiden orthogonal polarisierten Pulse werden durch PBS 605 kombiniert und zum Modul 608A zur Frequenzmischung gesendet, um Summenfrequenzlicht LSF zu erzeugen, das eine Mittenfrequenz von  $2\nu_F$  aufweist. Man beachte, dass die optischen Weglängen der beiden Teilpulse vom Strahlteiler 602 bis zu PBS 605, wo sie rekombiniert werden, im Wesentlichen gleich sind, so dass die beiden Teilpulse beim Modul 608A zur Frequenzmischung im Wesentlichen überlappen. In einer bevorzugten Ausführungsform sind die optischen Weglängen, die durch die beiden Teilpulse zurückgelegt wurden, auf innerhalb von etwa 10% der Pulslänge abgestimmt. In einer Ausführungsform kann die Polarisation des Grundlichts L mit etwa  $45^\circ$  zum Strahlteiler 602A ausgerichtet sein, der einen polarisierenden Strahlteiler umfasst, so dass im Wesentlichen gleiche Anteile des Grundlichts L durch den Strahlteiler 602A durchgelassen und reflektiert werden. In dieser Ausführungsform sollte PBS 603 die gleiche Polarisation wie der Strahlteiler 602 durchlassen und effizient die orthogonale Polarisation reflektieren. In ähnlicher Weise reflektiert PBS 605

die durch Strahlteiler 602A reflektierte Polarisation und richtet diese auf QWP 606, die jeden Puls in eine zirkuläre Polarisation umwandelt. Anschließend zur Reflexion des Lichts von 607, wandelt QWP 606 die zirkuläre Polarisation in eine lineare Polarisation um, die aber um  $90^\circ$  bezüglich seiner ursprünglichen Polarisation gedreht ist, so dass das Licht durch PBS 605 hindurch treten kann. Das von den PBS 603 reflektierte Licht wird auch von PBS 605 reflektiert, so dass die beiden orthogonal polarisierten Pulse im Wesentlichen kollinear in das Modul 608A zur Frequenzmischung eintreten. Die beiden orthogonal polarisierten Pulse werden durch PBS 605A kombiniert, was im weiteren Detail mit Bezug auf **Fig. 9** unten beschrieben ist.

**[0048]** Unter Bezugnahme auf die rechte Seite von **Fig. 6A** ist das Modul 608A zur Frequenzmischung konfiguriert, um jeden positiv gechirpten und gestreckten Teilpuls LSSP1 mit dem entsprechenden negativ gechirpten und gestreckten Teilpuls LSSP2 zu mischen, so dass die Mischung der gestreckten Teilpulse ein Summenfrequenzlicht LSF erzeugen, das aus Pulsen LSFP mit Zentralfrequenzen  $\nu_F$  besteht, die bis zum Zweifachen der Grundfrequenz  $\nu_F$  des Lichts 601-L des Grundlasers (d.h.  $\nu_F = 2\nu_F$ ) sind. Das heißt, das Modul 608A zur Frequenzmischung ist derart konfiguriert, dass Pulse des Summenfrequenzlichts LSFP mit einer Ausgangsfrequenz erzeugt werden, die die Summe der Frequenzen der beiden orthogonal polarisierten und gestreckten Teilpulse LSSP1 und LSSP2 ist, wobei das Summenfrequenzlicht LSF als die zweite Oberschwingung des Grundlaserlichts L erzeugt wird. Da die gestreckten Teilpulse LSSP1 und LSSP2 orthogonal polarisiert sind, ist das Modul 608A zur Frequenzmischung vorzugsweise so konfiguriert, dass eine Typ-II-Frequenzmischung implementiert ist.

**[0049]** Unter Verwendung des Geräts 610A zur Verringerung der Bandbreite in der oben beschriebenen Weise und in den folgenden Beispielen, werden Pulse des Summenfrequenzlichts LSFP erzeugt, die eine schmalere Bandbreite aufweisen, als wie sie ohne das monolithisch-basierte Gerät 610 zur Verringerung der Bandbreiten erzeugt werden würde (d.h. eine einfache Verdopplung die Frequenz des Grundlichts). Beispielshaft stellt **Fig. 11A** eine exemplarisch gemessene Bandbreite des Grundlichts dar, die eine FWHM Bandbreite von etwa 82 pm bei einer Zentrum-Grundwellenlänge von 1064,5 nm hat. **Fig. 11B** zeigt experimentell gemessene Spektren der zweiten harmonischen des Grundlichts aus **Fig. 11A**, wobei die gestrichelte Linie eine zweite Oberschwingung darstellt, die durch Frequenzverdopplung erzeugt wurde (die eine gemessene FWHM Bandbreite von etwa 33 pm hat), und die durchgezogene Linie zeigt eine zweite Oberschwingung, die durch eine Verwendung des CBG-basierten Geräts zur Verringerung der

Bandbreite gemäß der vorliegenden Erfindung erzeugt wird (die eine FWHM Bandbreite von ungefähr 9.00 besitzt). **Fig. 11B** zeigt eindeutig, dass die vorliegende Erfindung die Grundbandbreite um einen Faktor von etwa 3,7 im Vergleich zur einfachen Verdoppelung der Frequenz der Grundlichts reduziert. Das Reduzieren der Bandbreite eines Lasers um das 3,7fache durch Filtern würde erfordern, dass mehr als 70% der Energie eines jeden Laserpulses verschwendet werden würde, was somit sehr ineffizient ist.

**[0050]** Ein Vorteil des beispielhaften Ausführungsbeispiels ist in **Fig. 6A** dargestellt, welcher ist, dass die gestreckten Teilpulse LSSP1 und LSSP2 im Wesentlichen kollinear in das Modul 608A zur Frequenzmischung gelangen, welches die gestreckten Teilpulse überlappen lässt, wenn sie sich durch das Modul 608A zur Frequenzmischung bewegen und zu einer effizienten Erzeugung des Summenfrequenzlichts LSF als zweite Oberschwingung des Grundlaserlichts L führt. Die Ausrichtung dieser beiden Lichtwege und deren Ausrichtung in Bezug auf das Modul 608A zur Frequenzmischung kann relativ einfach sein, wie dies in einer kollinearen Anordnung in **Fig. 6A** dargestellt ist.

**[0051]** Der durch die Ausführungsform in **Fig. 6A** umgesetzte Ansatz geht davon aus, dass die Grundlichtimpulse LP nah an einer Transformationsbeschränkung sind. Die im Wesentlichen linear gechirpte Struktur des monolithischen Geräts 607 streckt jeden Teilpuls mit einem im Wesentlichen linearen Chirp. Pulse, die am monolithischen Gerät 607 von einer Seite ankommen, sehen ein Gitter, das von einer niedrigen Frequenz (größerer Gitterabstand) auf eine höhere Frequenz (kleinerer Gitterabstand) gechirpt ist. Die Pulse, die von der gegenüberliegenden Seite des monolithischen Geräts 607 ankommen, sehen einen entgegengesetzten Chirp. Da die Steigungen von Up-Chirp und Down-Chirp eng übereinstimmen, erzeugt die Bildung der Summenfrequenz zwischen diesen Pulsen längere, transformationsbegrenzte Pulse mit schmaler Bandbreite. Im Fall, dass die Pulse im Grundlicht L weit von der Transformationsbeschränkung entfernt sind, können zwei getrennte CBGs oder Faser-Bragg-Gitter mit unterschiedlichen Chirp verwendet werden, um sicherzustellen, dass die reflektierten Pulse passende, entgegengesetzte Chirps erhalten. Selbst bei im Wesentlichen transformationsbeschränkten Grundlaserpulsen können zwei ausreichend passende CBGs anstelle einer einzigen CBG verwendet werden, wobei ein CBG für einen hohen zu niedrigen Chirp orientiert ist und der andere CBG für einen niedrigen zu hohen Chirp orientiert ist. Die bevorzugte Ausführungsform verwendet gegenüberliegende Seiten eines einzigen CBG. Dies hat die Vorteile, dass die Optik kompakter und weniger teuer gemacht werden kann, und zu gewährleisten,

dass die beiden Pulse mit im Wesentlichen ähnlicher Steigung des Chirps, aber mit entgegengesetzten Vorzeichen gechirpt werden.

**[0052]** In einer beispielhaften Ausführungsform ist der Grundlaser 601 ein Nd:YAG -oder Nd-dotierter Vanadat-Laser mit einem Umwandlungsmodul für eine zweite Oberschwingung und erzeugt Grundlicht L bei einer Grundwellenlänge  $\lambda_f$  von etwa 532 nm mit einer Pulslänge (Dauer)  $D_f$  zwischen wenigen Pikosekunden und einigen zehn Pikosekunden, beispielsweise eine FWHM Pulslänge  $D_f$  von etwa 20 ps. Ein monolithisches Gerät 607 umfasst ein CBG, das konfiguriert, um die 532 nm Grundpulse zu strecken und eine gestreckte FWHM Pulslänge (Dauer)  $D_s$  zwischen etwa zehn Pikosekunden und ungefähr hundert Pikosekunden zu erzeugen (z.B. eine FWHM Pulslänge  $D_s$  von etwa 80 ps). In diesem Fall ist das Modul 608A zur Frequenzmischung derart konfiguriert, dass Summenfrequenzlicht LSF (Ausgang) mit einer Wellenlänge  $\lambda_{sf}$  von etwa 266 nm erzeugt wird, das eine schmalere Bandbreite und längere Pulslänge  $D_{sf}$  besitzt, als bei der einfachen Verdoppelung der Frequenz des Grundlichts L. In einem konkreten Ausführungsbeispiel ist das Modul 608A zur Frequenzmischung unter Verwendung eines Beta-Barium-Borat (BBO)-Kristalls, der für ein Typ II Mischen von Licht mit 532 nm, bei einem Phasen Anpassungswinkel von etwa  $82^\circ$  und bei einer Temperatur von etwa  $100^\circ\text{C}$  kritisch phasenanangepasst ist, implementiert. Andere Temperaturen können mit einer entsprechenden Anpassung in Phasen Anpassungswinkel verwendet werden. Andere geeignete nicht-lineare optische Kristalle können den BBO-Kristall mit einer geeigneten Temperatur und Phasen Anpassungswinkel ersetzen. Ein periodisch gepolter, nichtlinearer Kristall mit einer geeigneten Polungsperiode könnte auch ein Ersatz für den BBO-Kristall sein.

**[0053]** **Fig. 6B** zeigt eine alternative beispielhafte, nicht zur Erfindung gehörende Laser-Baugruppe 600B, die der Laser-Baugruppe 600A (**Fig. 6A**) ähnlich ist, die aber ein Gerät 610B zur Verringerung der Bandbreite enthält, das weiter modifiziert ist, um die Teilpulse weiter zu strecken, indem jeder der Teilpulse zwei Mal gegen eine entsprechende Oberfläche des monolithischen Geräts 607 gerichtet wird. Das Ausführungsbeispiel der **Fig. 6B** ist ähnlich dem der **Fig. 6A** mit Ausnahme dieser gekippten CBG Konfiguration, so dass alle anderen optischen Elemente und Komponenten der Laser-Baugruppe 600B die gleiche Positionierung haben und die gleichen Funktionen durchführen, wie entsprechende Elemente/Komponenten der Baugruppe 600A (**Fig. 6A**), und werden somit mit den gleichen Bezugszeichen bezeichnet und nicht in weiteren Einzelheiten beschrieben, um unnötige Wiederholungen zu vermeiden.

**[0054]** In Bezugnahme auf den zentralen Bereich der **Fig. 6B**, unterscheidet sich die Laser-Baugruppe 600B von der Laser-Baugruppe 600A dadurch, dass das monolithische Gerät 607 in einer gekippten CBG Konfiguration angeordnet ist. Ferner verwendet die Laser-Baugruppe 600B zwei zusätzliche Spiegel 615 und 616. Genauer gesagt, ist das monolithische Gerät 607 um einen Winkel  $\alpha$  relativ zum Eingangspfad (horizontal) der einfallenden Teilpulse LSP1 und LSP2 gedreht, so dass, wie angedeutet, das Licht der reflektierten Teilpulse jeweils auf die Spiegel 615 und 616 gerichtet ist. Die Spiegel 615 und 616 sind derart angeordnet, dass die reflektierten, einfallenden Teilpulse zurück in das monolithische Gerät 607 unter entsprechenden Winkeln gerichtet werden. Dies bedingt, dass die resultierenden, doppelt reflektierten und gestreckten Teilpulse LSSP1 und LSSP2 sich zurück entlang des (horizontal) Eingangspfads zu PBS 603 bzw. 605 bewegen, von dem aus jeder gestreckte Teilpuls auf das Modul 608A zur Frequenzmischung gerichtet und im Wesentlichen auf, wie oben beschrieben, gleiche Weise in ausgehendes Summenfrequenzlicht LSF umgewandelt wird. Unter Verwendung dieser gekippten CBG Konfiguration werden gestreckte Teilpulse LSSP1 und LSSP2 erzeugt, die längere Pulslängen (Dauer) als diejenigen haben, die mit dem Ausführungsbeispiel von **Fig. 6A** erzeugt wurden. Ferner erlangen die Teilpulse LSSP1 und LSSP2 durch die Reflexion an den gegenüberliegenden Oberflächen 607-1 und 607-2 des monolithischen Geräts 607 die doppelte Menge an Chirp. Diese Konfiguration erzeugt Summenfrequenzlicht LSF mit einer noch schmaleren Bandbreite nach der Erzeugung der Summenfrequenz, als wie sie mit einfachen Reflexionen vom gleichen monolithischen Gerät 607 erzeugt werden würde. Um die doppelte Streckung der Pulse und den doppelten Chirp durch einfache Reflexionen an einem monolithischen Gerät 607 zu erzeugen, würde dies ein monolithisches Gerät 607 erfordern, das etwa doppelt so lang ist, was nicht praktikabel herstellt oder erheblich teurer werden kann.

**[0055]** **Fig. 6C** zeigt eine weitere alternative, nicht zur Erfindung gehörende Ausführungsform der Laser-Baugruppe 600C, die ebenfalls ähnlich zur Laser-Baugruppe 600A (**Fig. 6A**) ist, aber sich von den oben beschriebenen Ausführungsformen dahingehend unterscheidet, dass sie ein Gerät 610C zur Verringerung der Bandbreite nutzt, das derart konfiguriert ist, dass die Teilpulse eine parallele Polarisation aufweisen (z.B. im Gegensatz zu der oben verwendeten orthogonalen Polarisation). Insbesondere unterscheidet sich das Gerät 610C zur Verringerung der Bandbreite von den beiden vorhergehenden Ausführungsformen dadurch, dass es einen anderen Strahlteiler 602C (Trennelement für den Puls) umfasst, wobei ein einziger Spiegel 617 den ersten gestreckten Teilpuls LSSP1 direkt zum Modul 608C zur Frequenzmischung reflektiert, und wobei das

Modul 608C zur Frequenzmischung derart konfiguriert ist, dass eine Typ I Frequenzmischung (im Gegensatz zur Typ II Mischung) implementiert ist. Ansonsten besitzen die anderen optischen Elemente und Komponenten der Laser-Baugruppe 600C die gleiche Positionierung und führen die gleichen Funktionen aus, wie entsprechende Elemente/Komponenten der Laser-Baugruppe 600A (**Fig. 6A**). Dies wird unter Verwendung der gleichen Bezugszeichen angedeutet. Ferner werden die Elemente/Komponenten nicht in weiteren Einzelheiten beschrieben, um unnötige Wiederholungen zu vermeiden.

**[0056]** In Bezugnahme auf den zentralen Bereich der **Fig. 6C** ist die Laser-Baugruppe 600C derart angeordnet, dass die Grundlichtpulse LP auf den Strahlteiler 602C in ähnlich wie oben beschriebener Weise gerichtet werden. Der Strahlteiler 602C ist derart konfiguriert, dass er jeden vom Grundlaser 601 erzeugten Laserpuls LP in zwei Teilpulse LSP1 und LSP2 von ungefähr gleicher Energie teilt (aufteilt), die anschließend auf gegenüberliegende Oberflächen 607-1 und 607-2 des monolithischen Geräts 607 in ähnlicher, wie in der oben in Bezug **Fig. 6A** beschriebenen Weise, gerichtet sind. Jedoch unterscheidet sich in diesem Fall der Strahlteiler 602C von den vorhergehenden Ausführungsformen dadurch, dass der Strahlteiler 602C unter Verwendung bekannter Techniken derart konfiguriert ist, dass die Polarisationen der Teilpulse LSP1 und LSP2, die jeweils vom Strahlteiler 602C durchgelassen bzw. reflektiert werden, im Wesentlichen parallel zueinander sind (d.h. im Gegensatz zu senkrecht polarisiert). Wie in den oben beschriebenen Ausführungsformen erwähnt, verleiht das einzelne monolithische Gerät 607 den beiden Teilpulsen entgegengesetzte Chirps und die QWPs 604 und 606 wandeln die Teilpulse von linearer in zirkulare Polarisation und zurück, so dass die Polarisationsrichtung eines jeden gestreckten Teilpulses LSSP1 und LSSP2 in Bezug auf seine ursprüngliche Polarisationsrichtung um  $90^\circ$  gedreht ist. Ähnlich zu den oben beschriebenen Ausführungsformen, wird der zweite gestreckte Teilpuls LSSP2 nach der Reflexion von der zweiten Oberfläche 607-2 des monolithischen Geräts 607 durch PBS 605 in das Modul 608C zur Frequenzmischung entlang einer ersten Richtung (z.B. horizontal) geleitet. Ebenfalls ähnlich zu den oben beschriebenen Ausführungsformen verlässt der erste, gestreckte Teilpuls LSSP1 die erste Oberfläche 607-1 des monolithischen Geräts 607 und breitet sich in horizontaler Richtung aus. Der erste, gestreckte Teilpuls LSSP1 wird dann durch PBS 603 nach unten reflektiert, aber der Pfad des ersten gestreckten Teilpulses LSSP1 unterscheidet sich von den vorhergehenden Ausführungsformen an diesem Punkt dadurch, dass die Optik, 617, die ein oder mehrere Spiegel oder Prismen umfasst, positioniert ist, um den ersten gestreckten Teilpuls LSSP1 direkt zum Modul 608C zur Frequenzmischung unter

einem Winkel  $\beta$  zu reflektieren, der zwischen  $0^\circ$  und weniger als  $4^\circ$  in Bezug auf die Ausbreitungsrichtung des zweiten, gestreckt Teilpulses LSSP2 beträgt, wenn dieser in das Modul 608C zur Frequenzmischung (d.h. relativ zur Horizontalen in Fig. 6C) eintritt. Wie in den vorherigen Ausführungsformen sollen die optischen Elemente, die die zwei Weglängen des Lichts der beiden Teilpulse bilden, im Wesentlichen ähnlich sein, so dass die gestreckten Teilpulse LSSP1 und LSSP2 am Modul 608C zur Frequenzmischung im Wesentlichen miteinander überlappend ankommen. In einer bevorzugten Ausführungsform stimmen die optischen Weglängen, die von den beiden Pulsen zurückgelegt wurden, innerhalb von etwa 10% der Pulslänge überein. Die Kombination der beiden Pulse mit paralleler Polarisation im Modul 608C zur Frequenzmischung ist detaillierter in Fig. 10 gezeigt. Auch ähnlich zu den vorherigen Ausführungsformen, mischt das Modul 608C zur Frequenzmischung die gestreckten Teilpulse LSSP1 und LSSP2, um ein ausgehendes Summenfrequenzlicht LSF zu erzeugen, das der Summe der Frequenzen der zwei gestreckten Teilpulse entspricht. Da jedoch die beiden Pulse eine parallele Polarisation aufweisen, ist das Modul 608C zur Frequenzmischung vorzugsweise zur Verwendung bekannter Techniken der Typ I Frequenzmischung ausgebildet, oder derart konfiguriert, dass die quasi Phasenanpassung in einem periodisch gepolten, nichtlinearen optischen Kristall verwendet wird.

**[0057]** Ein Vorteil des Ausführungsbeispiels aus Fig. 6C ist, dass die Frequenzmischung vom Typ I verwendet werden kann, da die zwei Pulse im Wesentlichen parallele Polarisation aufweisen. In vielen nicht-linearen Kristallen ist die Typ I Frequenzmischung effizienter als Typ II, da die Verwendung von Kristallen mit einer kürzeren Länge für die Frequenzmischung für gegebene Eingangs- und Ausgangsleistungen ermöglicht ist. Alternativ kann mehr Ausgangsleistung bei einer gegebenen Eingangsleistung und Kristalllänge erzeugt werden.

**[0058]** Alternativ kann das Ausführungsbeispiel in Fig. 6C die Frequenzmischung unter Verwendung der quasi Phasenanpassung bei einem periodisch gepolten, nichtlinearen optischen Kristall ausführen, die effizienter sein kann als die Typ I oder Typ II Frequenzmischung unter Verwendung eines nicht gepolten, nichtlinearen optischen Kristalls. Periodisch gepolte Materialien, wie PPLN und PPSLT, haben höhere nicht lineare Koeffizienten, als Materialien, wie LBO, BBO und CLBO. Darüber hinaus eliminiert die Verwendung der quasi Phasenanpassung die Drift und kann die Verwendung einer längeren Kristalllänge für die Frequenzmischung ermöglichen.

**[0059]** Bei noch einem weiteren Ausführungsbeispiel (nicht gezeigt), werden zwei Pulse mit im

Wesentlichen parallelen Polarisationen zweimal von einem Chirp-Volumen-Bragg-Gitter oder einem Chirp-Faser-Bragg-Gitter in einer ähnlichen Weise reflektiert, wie dies in Fig. 6B dargestellt ist. Anschließend werden die Pulse in einem Modul 608C zur Frequenzmischung in ähnlicher Weise, wie in den Fig. 6C und 10 veranschaulicht ist, kombiniert.

**[0060]** Fig. 7 zeigt eine beispielhafte, nicht zur Erfindung gehörende Ausführungsform einer DUV-Laseranordnung 700, die einen Grundlaser 601, ein CBG-basiertes Gerät 610 zur Verringerung der Bandbreite und ein Modul 703 zur Umwandlung der Oberschwingung gemäß einem weiteren Ausführungsbeispiel der vorliegenden Erfindung umfasst. Ähnlich wie bei den oben beschriebenen Ausführungsformen umfasst das Gerät 610 zur Verringerung der Bandbreite ein Trennelement 602 für den Puls, ein monolithisches Gerät 607 und ein Modul 608C zur Erzeugung der Summenfrequenz (Mischen), die derart konfiguriert sind, dass Summenfrequenzlicht LSF mit einer reduzierten Bandbreite erzeugt wird (d.h. im Vergleich zu desjenigen, das durch herkömmliche Frequenzverdopplung erhalten werden würde). Das Modul 703 zur Umwandlung der Oberschwingung ist derart positioniert, dass Summenfrequenzlicht LSF unter Verwendung bekannter Techniken in Laserausgangslicht Lout gewandelt wird, das eine höhere Oberschwingung mit einer kürzeren Wellenlänge als Summenfrequenzlicht LSF aufweist.

**[0061]** In einer beispielhaften Ausführungsform ist die Konfiguration des Grundlasers 601 und des Geräts 610 zur Verringerung der Bandbreite ähnlich zu irgendeinem der oben beschriebenen Laser-Baugruppen 600A, 600B und 600C ausgebildet. In einer Ausführungsform ist der Grundlaser 601 ein Nd:YAG oder Nd-dotierter Vanadat-Laser, der Grundlicht L von ungefähr 1064 nm mit einer Pulsbreite zwischen wenigen Pikosekunden und einigen zehn Pikosekunden erzeugt, beispielsweise der Pulslänge von etwa 20 ps.

**[0062]** Wie in der obigen Ausführungsform beschrieben, funktioniert das monolithische Gerät 607 derart, dass die Grundpulse (z.B. 1064 nm) zu einer Pulslänge zwischen einigen zehn Pikosekunden und einigen hundert Pikosekunden gestreckt werden, wie z.B. auf eine Länge von etwa 80 ps. Das Modul 608 zur Frequenzmischung funktioniert derart, dass Summenfrequenzlicht LSF mit einer Wellenlänge von etwa 532 nm erzeugt wird. Das Modul 608 zur Frequenzmischung kann Typ-II-Frequenzmischung in Lithiumtriborat (LBO) oder Cäsium-Lithiumborat (CLBO) verwenden. So kann beispielsweise LBO für die Typ-II-Frequenzmischung von Licht bei einer Wellenlänge von etwa 1064 nm verwendet werden, um Licht mit einer Wellenlänge von etwa 532 nm zu erzeugen, wobei die YZ-Ebene bei einer Temperatur

von etwa 50°C und Winkeln zur Phasenanpassung von etwa  $\Theta = 23^\circ$  und  $\varphi = 90^\circ$  verwendet werden. Alternativ kann das Modul 608 zur Frequenzmischung einen periodisch gepolten SLT Kristall verwenden.

**[0063]** In einer Ausführungsform ist das Modul 703 zur Umwandlung der Oberschwingung derart konfiguriert, dass das Summenfrequenzlicht LSF in Laserausgangslicht Lout konvertiert wird, das Pulse LoutP der vierten Oberschwingung des Grundlichts L umfasst (z.B. eine Wellenlänge von etwa 266 nm aufweist). Das Modul 703 zur Umwandlung der Oberschwingung kann einen CLBO Kristall umfassen, der kritisch phasenanpassend sein kann, um die Typ I Erzeugung der zweiten Oberschwingung von 532 nm bei einem Phasenanpassungswinkel von etwa 61,8° bei einer Temperatur von etwa 100°C zu ermöglichen. Andere Temperaturen können mit einer geeigneten Einstellung der Phasenanpassungswinkel verwendet werden. CLBO ist besonders nützlich, wenn eine hohe Leistung (beispielsweise 500 mW oder mehr) des Ausgangslichts bei 266 nm benötigt wird, da CLBO eine höhere Beschädigungsschwelle als andere Materialien bei DUV-Wellenlängen hat. Geglühte, mit Deuterium oder Wasserstoff behandelte CLBO Kristalle werden für Leistungspegel von etwa 1 W oder mehr bei DUV-Wellenlängen bevorzugt. Weitere Informationen über geglühte, Deuterium und Wasserstoff behandelte CLBO Kristalle können den US-Patentanmeldungen US 12/875,233 mit dem Titel „CLBO Crystal Growth“, angemeldet von Dribinski am 3. September 2010, US 13/412,564 dem Titel „Laser With High Quality, Stable Output Beam, And Long Life High Conversion Efficiency Non-Linear Crystal“, angemeldet am 5. März 2012 von Dribinski et al., US 13/488,635 mit dem Titel „Hydrogen Passivation of Nonlinear Optical Crystals“ angemeldet am 5. Juni 2012 von Chuang et al., und US 14/248,045 mit dem Titel „Passivation of Nonlinear Optical Crystals“ angemeldet am 8. April 2014 von Chuang et al. entnommen werden. Alle diese Anmeldungen sind durch Bezugnahme hierin eingeschlossen.

**[0064]** Fig. 8 zeigt eine weitere beispielhafte DUV-Laseranordnung 800 mit einem Grundlaser 601, einem CBG basierendem Gerät 610 zur Verringerung der Bandbreite, einem Modul 806 zur Umwandlung der Oberschwingung und einem zweiten Modul 808 zur Frequenzmischung, die derart konfiguriert sind, dass UV-Ausgangslicht Lout gemäß einem anderen Ausführungsbeispiel der vorliegenden Erfindung erzeugt wird. Die Bandbreite des Grundlichts L wird durch Hindurchleiten durch ein Etalon 803 (oder andere optische Geräte zur Bandbreitenfilterung) geschmälert, welches beispielsweise einen schmalen Bereich von Wellenlängen innerhalb der Bandbreite des Lasers durchlässt. Der schmale Bereich des Grundlichts LN wird als einer der Eingänge in

das Modul 808 zur Frequenzmischung verwendet. Das außerhalb des schmalen Bandes liegende Grundlicht LR, das z.B. durch das Etalon 803 reflektiert wird, besitzt im Vergleich mit dem schmalen Band (Bereich) des Grundlichts eine größere Bandbreite und eine Kerbe in der Mitte des Spektrums. Das verworfene Licht LR, das sonst verschwendet würde, wird als Eingangsgrundlicht des CBG basierten Geräts 610 zur Verringerung der Bandbreite verwendet, welches ein Trennelement 602 für den Puls, ein monolithisches Gerät 607 und ein Modul 608 zum Mischen in einer Konfiguration umfasst, die ähnlich zu einer diejenigen ist, die mit Bezug auf die Fig. 6A, 6B und 6C beschrieben wurde. Das erzeugte Summenfrequenzlicht LSF besitzt eine schmalere Bandbreite als diejenige, welche aus der direkten Erzeugung der Summenfrequenz ohne das monolithische Gerät 607 herrührt, die anschließend zu einer schmaleren Bandbreite des Lichts Lhar der Oberschwingung resultiert, die durch das Modul 806 zur Umwandlung der Oberschwingung erzeugt wurde. Das Laserausgangslicht Lout wurde durch Mischen des schmalbandigen Grundlichts LN und der schmaleren Bandbreite des Lichts Lhar der Oberschwingung im Modul 808 zur Frequenzmischung erzeugt.

**[0065]** Gemäß einer beispielhaften Ausführungsform erzeugt der Grundlaser 601 Grundlichtpulse LP mit einer Grundwellenlänge von ungefähr 1064 nm, wobei beispielsweise ein Nd:YAG oder Nd-dotierter Vanadat-Laser verwendet werden. Das Summenfrequenzlicht LSF wird mit Pulsen LSFP mit Wellenlängen von ungefähr 532 nm unter Verwendung eines Geräts 610 zur Verringerung der Bandbreite erzeugt. Das Modul 806 zur Umwandlung der Oberschwingung wandelt das Licht Lhar der Oberschwingung bei einer Wellenlänge von etwa 266 nm. Das Modul 808 zur Frequenzmischung erzeugt Laserausgangslicht Lout bei einer Wellenlänge von etwa 213 nm durch eine Mischung des schmalbandigen Grundlichts LN bei einer Wellenlänge von etwa 1064 nm und dem schmalbandigen Licht Lhar der Oberschwingung bei einer Wellenlänge von etwa 266 nm. In einer bevorzugten Ausführungsform umfassen eins oder beide der Module 806 zur Umwandlung der Oberschwingung und das Modul 808 zur Frequenzmischung einen CLBO Kristall, einen geglühten CLBO Kristall, einen mit Deuterium behandelten CLBO-Kristall oder einen mit Wasserstoff behandelten CLBO-Kristall.

**[0066]** Fig. 9 zeigt beispielhaft ein Modul 608A zur Frequenzmischung, das derart konfiguriert ist, dass entgegengesetzt gerichtete und gestreckte Teilpulse LSSP1 und LSSP2 mit orthogonaler Polarisation kombiniert (gemischt) werden, um Summenfrequenzlicht LSF aus diesen beiden Impulsen in einer Weise, die oben mit Bezug auf die Fig. 6A und 6B eingeführt ist, zu erzeugen. PBS 605 kombiniert die

zwei orthogonal polarisierten Teilpulse LSSP1 und LSSP2, die einen entgegengesetzten Chirp besitzen, so dass sie im Wesentlichen kollinear in das Modul 608A zur Frequenzmischung gelangen. Das Modul 608A zur Frequenzmischung erzeugt die zweite Oberschwingung durch Summieren der Frequenzen der gestreckten Teilpulse LSSP1 und LSSP2 in einem nichtlinearen Kristall, wobei vorzugsweise die Typ II-Frequenzumwandlung angewendet wird. In Abhängigkeit von der Wellenlänge und dem Leistungspegel des Grundlichts, kann ein geeigneter nichtlinearer Kristall für die Typ II Frequenzmischung BBO, Lithiumtriborat (LBO), Cäsiumlithiumborat (CLBO) und periodisch gepolte Materialien, wie Lithiumniobat, stöchiometrisches Lithiumtantalat, und mit Mg-dotiertes stöchiometrisches Lithiumtantalat umfassen.

**[0067]** Fig. 10 zeigt ein beispielhaftes Modul 608C zur Frequenzmischung, das derart konfiguriert ist, dass es gegenläufig gechirpte und gestreckte Teilpulse LSSP1 und LSSP2 mit paralleler Polarisation kombiniert (mischt) und aus diesen beiden Pulsen ein Summenfrequenzlicht LSF in einer Weise erzeugt, die oben mit Bezug auf Fig. 6C offenbart wurde. Wie oben beschrieben, werden die beiden entgegengesetzt gechirpten und gestreckten Teilpulse auf das Modul 608C zur Frequenzmischung gelenkt, so dass sie innerhalb des Moduls 608C zur Frequenzmischung konvergieren und überlappen, welches in dieser Ausführungsform durch einen nichtlinearen Kristall implementiert ist, der für die Frequenzsummierung konfiguriert ist. Die Bewegungsrichtungen der gestreckten Teilpulse LSSP1 und LSSP2 sollten auf im Wesentlichen gleichen Winkeln  $\beta_1$  und  $\beta_2$  auf der gegenüberliegenden Seite der Richtung der optimalen Phasenanpassung (1001) des nichtlinearen Kristalls liegen, so dass sich die Summenfrequenz der zweiten Oberschwingung im Wesentlichen entlang der optimalen Richtung der Phasenanpassung 1001 bewegen wird. Der Winkel  $\beta_1$  zwischen der Richtung des gestreckten Teilpulses LSSP1 und der optimalen Richtung der Phasenanpassung sollte groß genug sein, dass jeder Puls am nichtlinearen Kristall außerhalb des Akzeptanzwinkels für die Erzeugung der zweiten Oberschwingung ankommt, so dass nur ein minimaler Bruchteil der einzelnen Pulse in die zweite Oberschwingung umgewandelt wird. Ähnliches gilt für den Winkel  $\beta_2$  zwischen der Richtung des gestreckten Teilpulses LSSP2 und der optimalen Richtung der Phasenanpassung 1001. Der Akzeptanzwinkel für die Erzeugung der zweiten Oberschwingung hängt von dem Kristallmaterial, der Kristalllänge und den Wellenlängen von LSSP1, LSSP2 und LSF ab. Jedoch sollte der Winkel  $\beta$  zwischen den gestreckten Teilpulsen LSSP1 und LSSP2 nicht so groß sein, so dass nur ein kleiner Bereich innerhalb des nichtlinearen Kristalls resultiert, in dem die beiden Pulse überlappen und eine Summenfrequenz

erzeugen können. In einer bevorzugten Ausführungsform, bei der ein 30 mm langer PPSLT-Kristall verwendet wird, um Summenlicht mit einer Wellenlänge von 532 nm zu erzeugen, beträgt der Winkel  $\beta_1$  zwischen der Richtung des gestreckten Teilpulses LSSP1 und der optimalen Richtung der Phasenanpassung 1001 (und der Winkel  $\beta_2$  zwischen der der Richtung des gestreckten Teilpulses LSSP2 und der optimalen Richtung der Phasenanpassung 1001) etwa  $1^\circ$ , d.h. der Winkel  $\beta$  zwischen den beiden gestreckten Teilpulsen LSSP1 und LSSP2 beträgt etwa  $2^\circ$ .

**[0068]** In Abhängigkeit von der Wellenlänge und dem Leistungspegel des Grundlichts können geeignete nichtlineare Kristalle für die Typ-I-Frequenzmischung BBO, LBO, CLBO und periodisch gepolte Materialien, wie Lithiumniobat, stöchiometrisches Lithiumtantalat und Mg-dotiertes stöchiometrisches Lithiumtantalat umfassen. Man beachte, dass bei periodisch gepolten Kristallen die Polarisation des Summenfrequenzlichts LSF entweder senkrecht (wie dargestellt) oder parallel zur Polarisation der Eingangspulse LSSP1 und LSSP2 in Abhängigkeit von dem verwendeten Material und der quasi Phasenanpassung sein kann.

**[0069]** Die obigen beispielhaften Ausführungsformen beschreiben Laser, die eine Ausgangswellenlänge erzeugen, die einer ganzzahligen Oberschwingung der Grundwelle entspricht. Die hierin offenbarten Geräte zur Verringerung der Bandbreite und zugehörige Verfahren können bei Lasern verwendet werden, die Ausgangsfrequenzen erzeugen, die keine ganzzahlige Oberschwingung der Grundschwingung sind. Beispielsweise kann ein Laser eine Ausgangswellenlänge erzeugen, indem eine Oberschwingung des Grundlasers mit einer anderen Wellenlänge gemischt wird, wie beispielsweise einer Wellenlänge, die durch einen optischen parametrischen Oszillator, einen optischen parametrischen Verstärker oder einen Raman-Laser erzeugt wird, der durch einen Teil der Grundwellenlänge gepumpt wird. Bei einem derartigen Laser kann die Bandbreite der Oberschwingung unter Verwendung einer hierin offenbarten Vorrichtung oder eines Verfahrens verengt werden, was zu einer schmaleren Ausgangsbandbreite führt.

**[0070]** Beispielsweise kann ein Laser eine Ausgangswellenlänge zwischen etwa 180 nm und etwa 200 nm, wie z.B. eine Wellenlänge nahe 193 nm, erzeugen, indem die fünfte Oberschwingung einer Grundwellenlänge nahe 1064 nm mit einer Infrarotwellenlänge zwischen etwa  $1,1 \mu\text{m}$  und etwa  $3,3 \mu\text{m}$  gemischt wird. Detaillierte Beschreibungen von Lasern, die Wellenlängen in der Nähe von 193 nm erzeugen, die von dem Einbringen der hierin beschriebenen Bandbreiten steuernden Vorrichtungen und Verfahren profitieren können, sind in dem

US-Patent US 8 755 417 B1 mit dem Titel „Coherent light generation below about 200 nm“ für Dribinski und in den US-Patentanmeldungen US 2013 / 0 077 086 A1 mit dem Titel „Solid-State Laser and Inspection System Using 193nm Laser“, angemeldet von Chuang et al. am 25. Juli 2012, US 2013 / 0 313 440 A1 mit dem Titel „Solid-state laser and inspection system using 193 nm laser“, angemeldet von Chuang et al. am 12. März 2013, US 2014 / 0 204 963 A1 mit dem Titel „193 nm laser and inspection system“ angemeldet von Chuang et al. am 17. Januar 2014, US 2014 / 0 226 140 A1 mit dem Titel „193 nm laser and inspection system“ angemeldet von Chuang et al. am 31. Januar 2014, US 2016/ 0 056 606 A1 mit dem Titel „A 193nm Laser and an Inspection System Using a 193nm Laser“, angemeldet von Chuang et al. am 13. März 2014, beschrieben. Alle diese Patente und Patentanmeldungen werden hier durch Bezugnahme aufgenommen.

**[0071]** Es ist zu beachten, dass die oben beschriebenen 193 nm-Laser bei anderen Wellenlängen, die kürzer als etwa 200 nm sind, durch geeignete Auswahl der Grundwellenlänge, der Wellenlänge des Signallichts und geeignete Änderungen an den Modulen zur Frequenzmischung innerhalb des Lasers betrieben werden können. Insbesondere können durch solche Laser Vakuum-UV-Wellenlängen kürzer als 190 nm erzeugt werden. Laser, die in der Lage sind, Wellenlängen zu erzeugen, die kürzer als etwa 200 nm sind, sind auch in der provisorischen US-Patentanmeldung 62/059,368 von Chuang et al., mit dem Titel „183nm laser and inspection system“, angemeldet am 3. Oktober 2014, beschrieben. Diese provisorische Patentanmeldung wird durch Bezugnahme hierin aufgenommen. Die Vorrichtung zur Reduktion der Bandbreiten und die hierin beschriebenen Verfahren können in Lasern verwendet werden, die in dieser provisorischen Patentanmeldung beschrieben sind.

**[0072]** Beispielhafte Ausführungsformen von Bildsensoren, die zur Verwendung in einem Inspektions- oder Abbildungssystem geeignet sind, das irgendwelche der hierin beschriebenen Laser enthält, können in der US-Patentanmeldung US 2013 / 0 264 481 A1 mit dem Titel „Back-Illuminated Sensor with Boron Layer“ von Chern et al. gefunden werden, die am 10. Oktober 2013 veröffentlicht wurde und hierin durch Bezugnahme aufgenommen wird.

**[0073]** Die verschiedenen Ausführungsformen der Strukturen und Verfahren dieser Erfindung, die oben beschrieben sind, dienen nur zur Veranschaulichung der Prinzipien dieser Erfindung und sollen den Umfang der Erfindung nicht auf die beschriebenen besonderen Ausführungsformen beschränken. Beispielsweise könnten verschiedene Umwandlungs-

schemata der Oberschwingung und/oder verschiedene nichtlineare Kristalle verwendet werden. In einem anderen Beispiel können zusätzliche Spiegel, Prismen oder andere optische Komponenten verwendet werden, um Laserpulse innerhalb einer Laseranordnung zu lenken und um die optischen Weglängen so anzupassen, dass sie bei Bedarf passend angepasst werden.

## Patentansprüche

1. Eine Laseranordnung (800), umfassend:  
 einen Grundlaser (601), der derart ausgebildet ist, dass er Grundlicht (L) erzeugt, das Lichtpulse (LP) mit einer Grundwellenlänge ( $\lambda_f$ ) erzeugt, die innerhalb einer Grundwellenlängen-Bandbreite ( $\Delta\lambda_f$ ) liegen;  
 ein optisches Gerät (803) zur Filterung der Bandbreiten, das derart ausgebildet ist, dass ein erster Teil eines jeden Grundlichtpulses (LP) mit Frequenzen außerhalb einer verengten Frequenzbandbreite ablenkbar ist, und derart ausgebildet ist, dass ein zweiter Teil eines jeden Grundlichtpulses (LP) innerhalb der verengten Frequenzbandbreite passiert;  
 ein Gerät (610) zur Verringerung der Bandbreite, welches umfasst:  
 ein Trennelement (602) für den Puls, das derart konfiguriert ist, dass der erste Abschnitt eines jeden Laserlichtpulses (LP) in ein Paar von entsprechenden Teilpulsen aufteilbar ist, das einen ersten Teilpuls (LSP1) und einen zweiten Teilpuls (LSP2) umfasst;  
 mindestens ein monolithisches Gerät (607), das derart konfiguriert ist, dass der erste Teilpuls (LSP1) eines jeden Paares von entsprechenden Teilpulsen in einen ersten gestreckten Teilpuls (LSSP1) mit einem positiven Chirp umwandelbar und derart konfiguriert ist, dass der zweite Teilpuls (LSP2) eines jedes Paares von entsprechenden Teilpulsen in einen zweiten gestreckten Teilpuls (LSSP2) mit einem negativen Chirp umwandelbar ist; und  
 ein erstes Modul zur Frequenzmischung (608), das derart konfiguriert ist, dass jeder erste gestreckte Teilpuls (LSSP1) mit seinem entsprechenden zweiten gestreckten Teilpuls (LSSP2) mischbar ist, so dass dieses Mischen ein Summenfrequenzlicht (LSF) mit Summenfrequenzpulsen mit Frequenzen erzeugt, die gleich dem Zweifachen der Grundfrequenz ( $\omega_f$ ) sind; und  
 ein zweites Modul zur Frequenzmischung (808), das derart konfiguriert ist, um ein Summenfrequenzlicht (LSF) und eine Oberschwingung des Summenfrequenzlichts (LSF) mit einem zweiten Teil (LN) des Grundlichts (L) und einer Oberschwingung dieses zweiten Teils (LN) zu mischen, so dass diese Mischung ultraviolettes- (UV) Ausgangslicht (Lout) des Lasers (601) erzeugt.

2. Die Laseranordnung (800) nach Anspruch 1, wobei das mindestens eine monolithische Gerät

(607) mindestens ein Chirp-Volumen-Bragg-Gitter und ein Chirp-Faser-Bragg-Gitter umfasst.

3. Die Laseranordnung (800) nach Anspruch 1, wobei das Trennelement (602) für den Puls so konfiguriert ist, dass jeder Puls derart teilbar ist, dass die beiden Teilpulse (LSP1, LSP2) annähernd die gleiche Energie haben.

4. Die Laseranordnung (800) nach Anspruch 3, wobei das mindestens eine monolithische Gerät (607) ferner derart konfiguriert ist, dass der erste gestreckte Teilpuls (LSSP1) und der zweite gestreckte Teilpuls (LSSP2) als Funktion der Zeit Änderungen in der Frequenz besitzen, die im Wesentlichen gleich groß aber mit umgekehrtem Vorzeichen sind.

5. Die Laseranordnung (800) nach Anspruch 3, wobei das mindestens eine monolithische Gerät (607) ein einziges monolithisches Gerät (607) umfasst, das eines von einem Chirp-Volumen-Bragg-Gitter oder eines von einem Chirp-Faser-Bragg-Gitter umfasst, und wobei das Gerät (610) zur Verringerung der Bandbreite ferner eine Vielzahl optischer Elemente umfasst, die funktionsbereit zwischen dem Trennelement (602) für den Puls und dem einzigen monolithischen Gerät (607) sowie zwischen dem einzigen monolithischen Gerät (607) und dem Modul zur Frequenzmischung (608) angeordnet sind, wobei die Vielzahl der optischen Elemente derart konfiguriert ist, dass die ersten Teilpulse (LSP1) und die zweiten Teilpulse (LSP2) auf gegenüberliegende Oberflächen des einzigen monolithischen Geräts (607) richtbar sind, und dass der erste und zweite gestreckte Teilpuls (LSSP1, LSSP2) von gegenüberliegenden Oberflächen (607-1, 607-2) des einzigen monolithischen Geräts (607) auf das Modul zur Frequenzmischung (608) richtbar sind.

6. Die Laseranordnung (800) nach Anspruch 5, wobei der Grundlaser (601) derart konfiguriert ist, dass die Lichtpulse des genannten Grundlichts (L) länger als eine Pikosekunde sind.

7. Die Laseranordnung (800) nach Anspruch 6, wobei der Grundlaser (601) einen Faserlaser, einen Nd:YAG-Laser oder einen Nd-dotierten Vanadat-Laser umfasst.

8. Die Laseranordnung (800) nach Anspruch 6, wobei die Laseranordnung (800) derart konfiguriert ist, dass jeder der Summenfrequenzpulse eine Wellenlänge von etwa 213 nm aufweist.

9. Die Laseranordnung (800) nach Anspruch 6, wobei das Trennelement (602) für den Puls und die Vielzahl optischer Elemente derart konfiguriert sind, dass der erste und zweite gestreckte Teilpuls

(LSSP1, LSSP2) im Wesentlichen orthogonale Polarisationen beim Eintritt in das Modul zur Frequenzmischung (608, 808) besitzen, und in das Modul zur Frequenzmischung (608, 808) entlang kollinearere Pfade gerichtet werden, und wobei das Modul zur Frequenzmischung (608, 808) derart konfiguriert ist, dass eine Typ II Frequenzmischung auf die ersten und zweiten gestreckten Teilpulse (LSSP1, LSSP2) anwendbar ist.

10. Die Laseranordnung (800) nach Anspruch 6, wobei das Trennelement (602) für den Puls und die Vielzahl der optischen Elemente so ausgebildet sind, dass die ersten und zweiten gestreckten Teilpulse (LSSP1, LSSP2) beim Eintritt in das Modul zur Frequenzmischung (608, 808) im Wesentlichen parallele Polarisationen besitzen und in das Modul zur Frequenzmischung in (608, 808) entsprechenden nicht-parallelen Richtungen, die unter einem Winkel von weniger als 4° getrennt sind, richtbar sind, und wobei das Modul zur Frequenzmischung (608, 808) derart konfiguriert ist, dass eine Typ I Frequenzmischung auf die ersten und zweiten gestreckten Teilpulse (LSSP1, LSSP2) anwendbar ist.

11. Ein System (100, 200, 300, 400, 500) zur Inspektion einer Probe (108, 211, 309, 408, 530), wobei das System (100, 200, 300, 400, 500) umfasst:

eine Beleuchtungsquelle (102, 201, 401, 509), die eine UV-Laseranordnung (220, 330, 401) umfasst, die zum Erzeugen von UV-Strahlung (202, 301) konfiguriert ist; und

eine Optik (103, 203, 302, 304, 305, 307, 308, 313, 314, 315, 402), mit einer Objektivlinse (105, 203, 302, 304, 307, 315), die derart konfiguriert ist, dass UV-Strahlung (202, 301) auf die Probe (108, 211, 309, 408, 530) richtbar und fokussierbar ist, und derart konfiguriert ist, dass ein Teil der von der Probe (108, 211, 309, 408, 530) abgelenkten UV-Strahlung (316) sammelbar, richtbar und fokussierbar und auf einen Detektor (104, 106, 311, 409, 570) umleitbar ist;

wobei die UV-Laseranordnung (220, 330, 401) umfasst:

einen Grundlaser, der derart ausgebildet ist, dass er Grundlicht erzeugt, das Lichtpulse mit einer Grundwellenlänge erzeugt, die innerhalb einer Grundwellenlängen-Bandbreite liegen; und

ein Gerät zur Verringerung der Bandbreite umfasst: ein Trennelement für den Puls, das derart konfiguriert ist, dass jeder Laserlichtpuls in ein Paar von entsprechenden Teilpulsen, die einen ersten Teilpuls und einen zweiten Teilpuls umfassen, aufteilbar ist; mindestens ein monolithisches Gerät, das derart konfiguriert ist, dass der erste Teilpuls eines jeden Paares von entsprechenden Teilpulsen in einen ersten gestreckten Teilpuls mit einem positiven Chirp umwandelbar ist, und derart konfiguriert ist, dass

der zweite Teilpuls eines jeden Paares von entsprechenden Teilpulsen in einen zweiten gestreckten Teilpuls mit einem negativen Chirp umwandelbar ist; und

ein Modul zur Frequenzmischung, das derart konfiguriert ist, dass jeder erste gestreckte Teilpuls mit seinem entsprechenden zweiten gestreckten Teilpuls mischbar ist, so dass dieses Mischen ein Summenfrequenzlicht mit Summenfrequenzpulsen mit Frequenzen erzeugt, die gleich dem Zweifachen der Grundfrequenz sind.

12. Das System (100, 200, 300, 400, 500) nach Anspruch 11, wobei das mindestens eine monolithische Gerät ein einziges monolithisches Gerät umfasst, das eines von einem Chirp-Volumen-Bragg-Gitter oder eines von einem Chirp-Faser-Bragg-Gitter umfasst, und wobei das Gerät zur Verringerung der Bandbreite ferner eine Vielzahl optischer Elemente umfasst, die funktionsbereit zwischen dem Trennelement für den Puls und dem monolithischen Gerät und zwischen dem einzigen monolithischen Gerät und dem Modul zur Frequenzmischung angeordnet sind und die Vielzahl der optischen Elemente derart konfiguriert ist, dass die ersten Teilpulse und die zweiten Teilpulse auf gegenüberliegende Oberflächen des einzigen monolithischen Geräts richtbar sind, und dass der erste und zweite gestreckte Teilpuls von gegenüberliegenden Oberflächen des einzigen monolithischen Geräts auf das Modul zur Frequenzmischung richtbar sind.

13. Das Inspektionssystem (100, 200, 300, 400, 500) nach Anspruch 12, wobei das Trennelement für den Puls und die Vielzahl optischer Elemente derart konfiguriert sind, dass der erste und zweite gestreckte Teilpuls im Wesentlichen orthogonale Polarisierungen beim Eintritt in das Modul zur Frequenzmischung besitzen, und in das Modul zur Frequenzmischung entlang kollinearere Pfade gerichtet werden, und wobei das Modul zur Frequenzmischung derart konfiguriert ist, dass eine Typ II Frequenzmischung auf die ersten und zweiten gestreckten Teilpulse anwendbar ist.

14. Das System (100, 200, 300, 400, 500) nach Anspruch 11, wobei der Grundlaser derart konfiguriert ist, dass eine Grundwellenlänge von ungefähr 1064 nm erzeugbar ist, und wobei die UV-Laseranordnung (220, 330, 401) derart konfiguriert ist, dass ein Laserausgangslicht mit einer Wellenlänge erzeugbar ist, die gleich einer Wellenlänge von etwa 266 nm und etwa 213 nm ist, um die Probe (108, 211, 309, 408, 530) zu beleuchten.

15. Das System (100, 200, 300, 400, 500) nach Anspruch 11, wobei der Detektor (104, 106, 311, 409, 570) ein ein-dimensionaler oder zwei-dimensio-

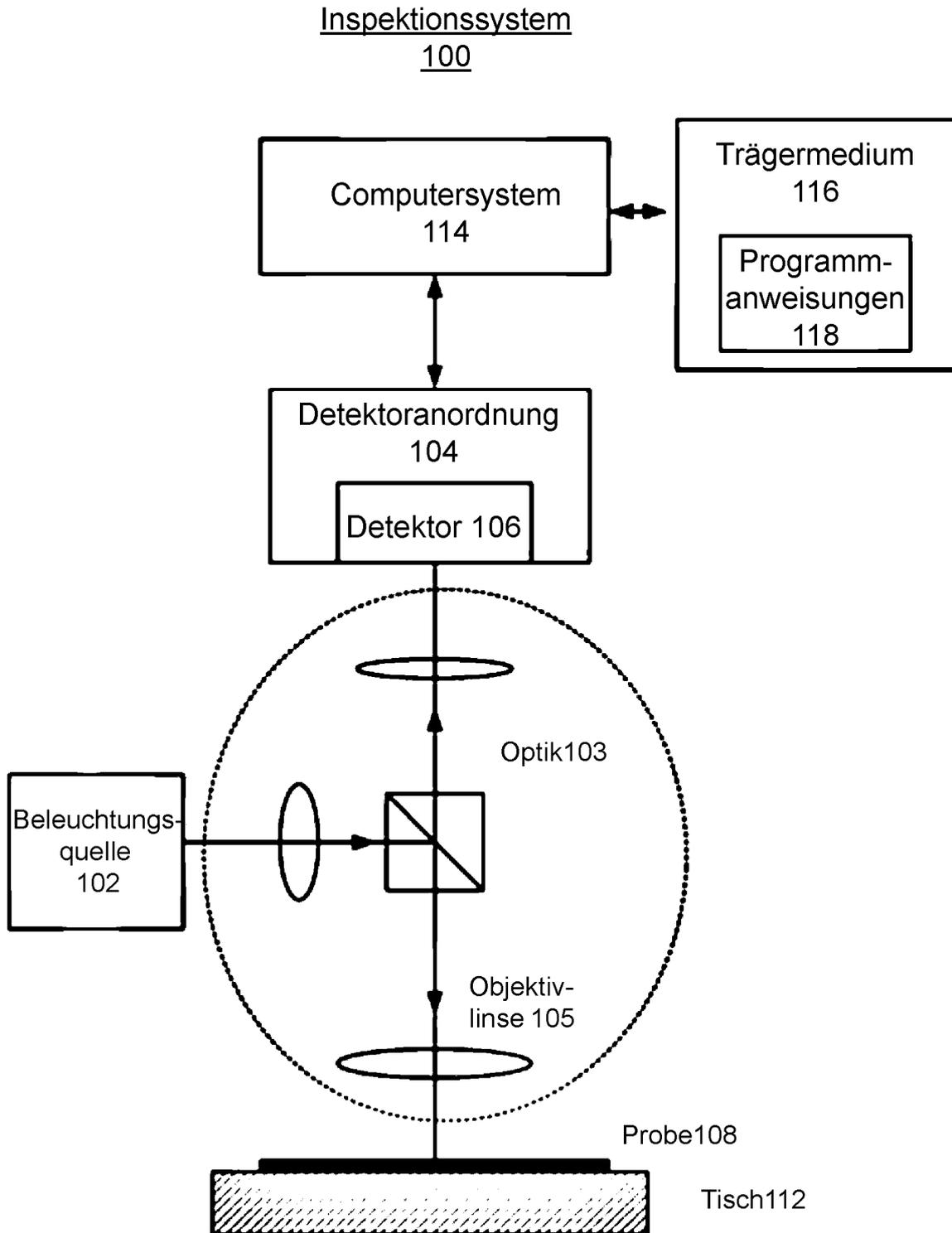
nale Bildsensor ist, wobei der Sensor (104, 106, 311, 409, 570) eine Halbleitermembran umfasst, wobei die Halbleitermembran auf einer ersten Oberfläche Schaltungselemente ausgebildet hat und eine reine Bor-Schicht auf einer zweiten Oberfläche der Halbleitermembran abgedeckt ist.

16. Das Inspektionssystem (100, 200, 300, 400, 500) nach Anspruch 15, wobei der Bildsensor (104, 106, 311, 409, 570) ferner einen elektronenbombardierte Bildsensor oder einen Lawinen-Bildsensor umfasst.

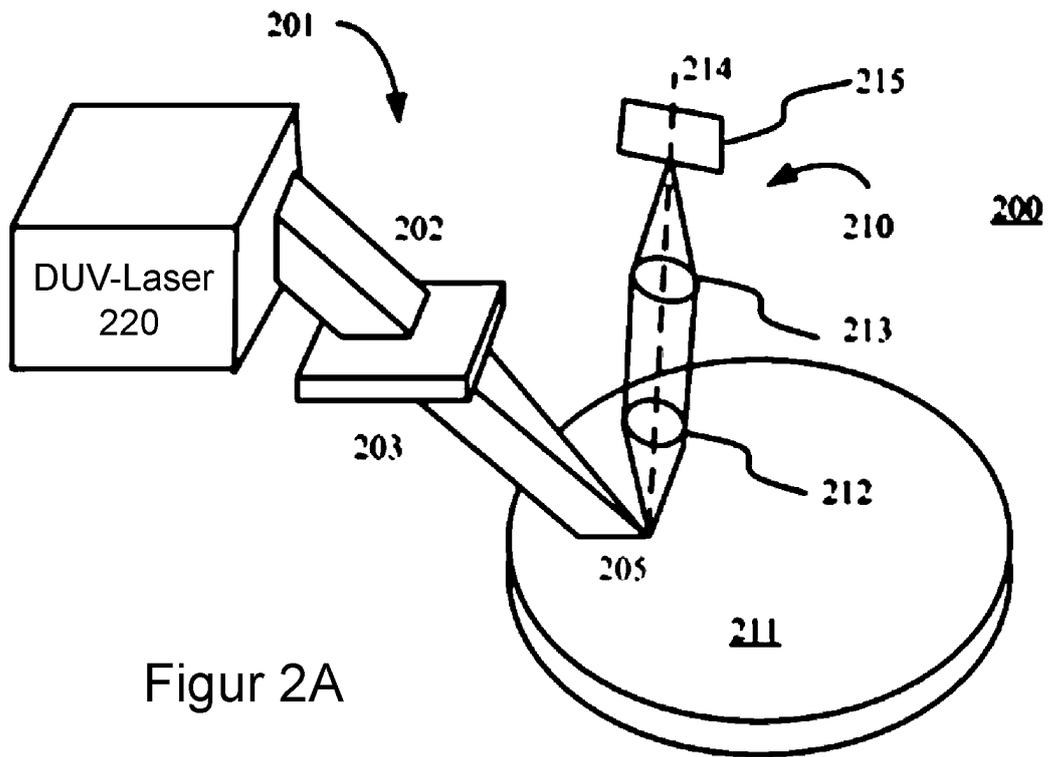
17. Das Inspektionssystem (100, 200, 300, 400, 500) nach Anspruch 11, wobei die Optik (103, 203, 302, 304, 305, 307, 308, 313, 314, 315, 402) das UV-Licht (202, 301) in einer Linie (205) auf die Probe (108, 211, 309, 408, 530) fokussiert.

Es folgen 10 Seiten Zeichnungen

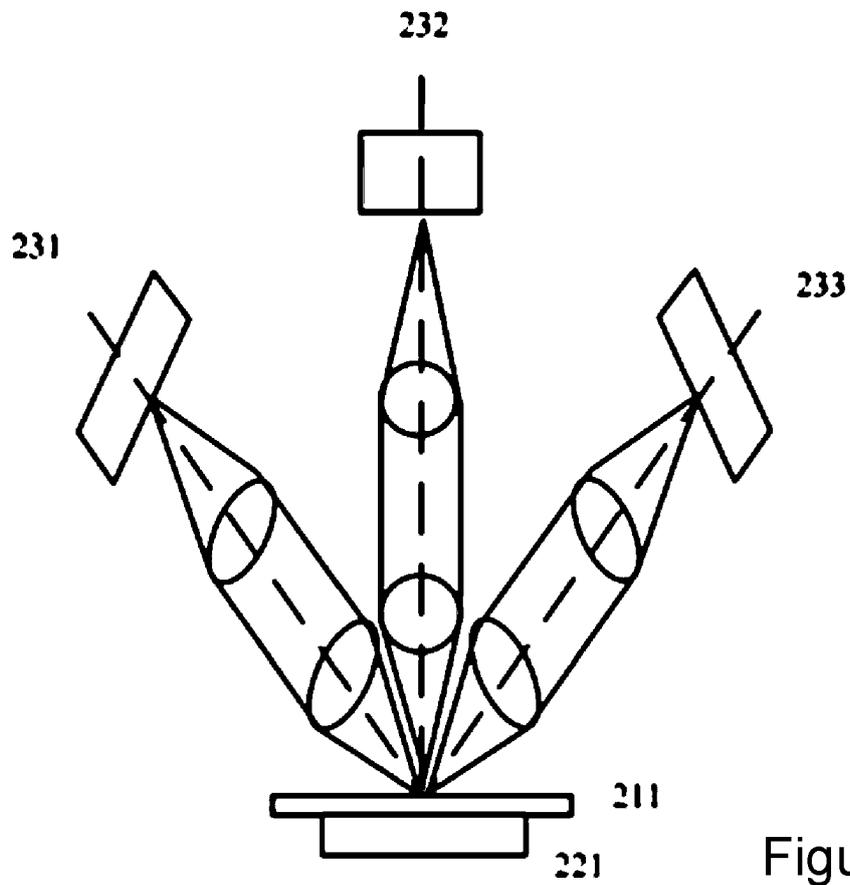
Anhängende Zeichnungen



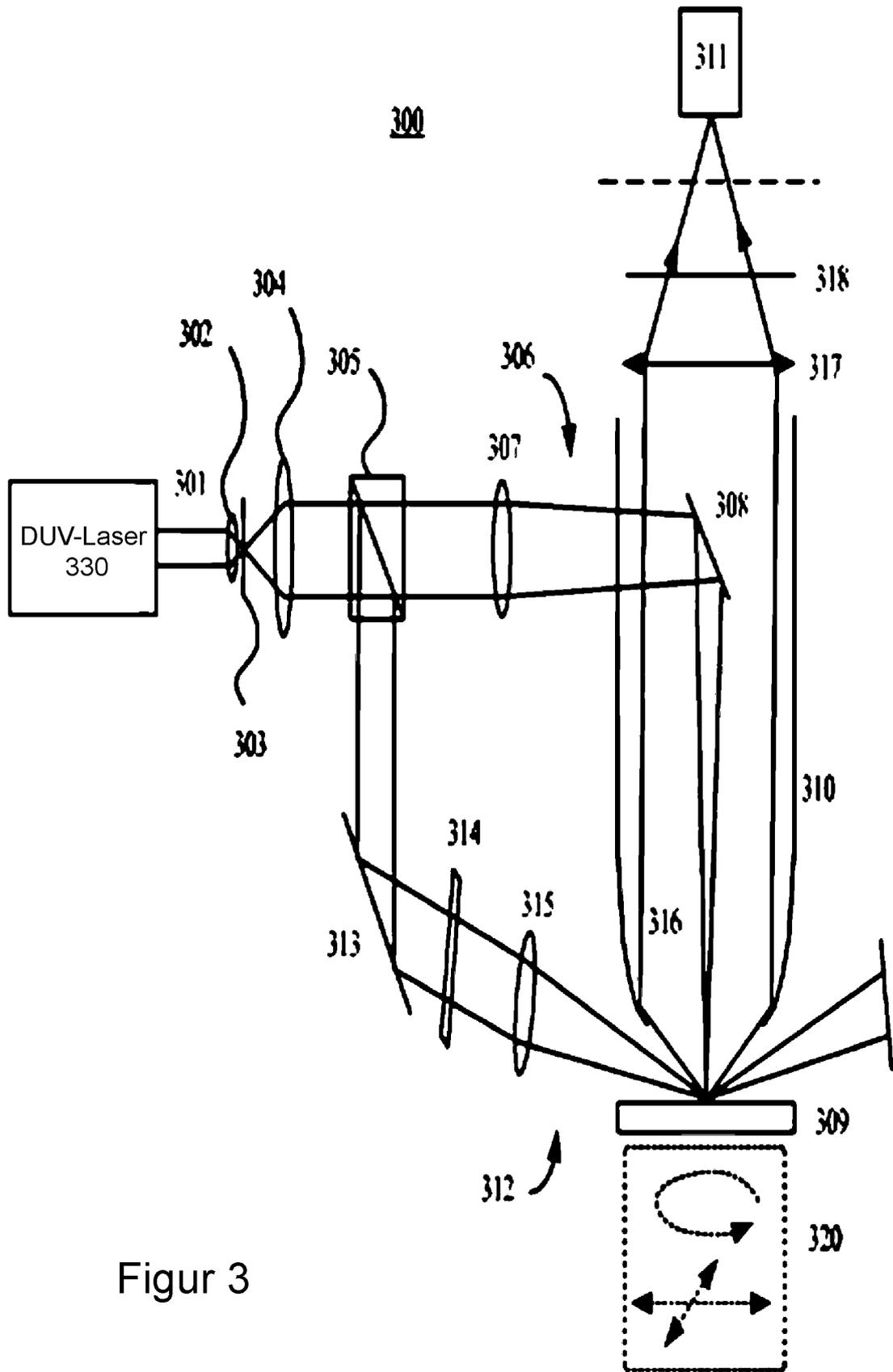
Figur 1



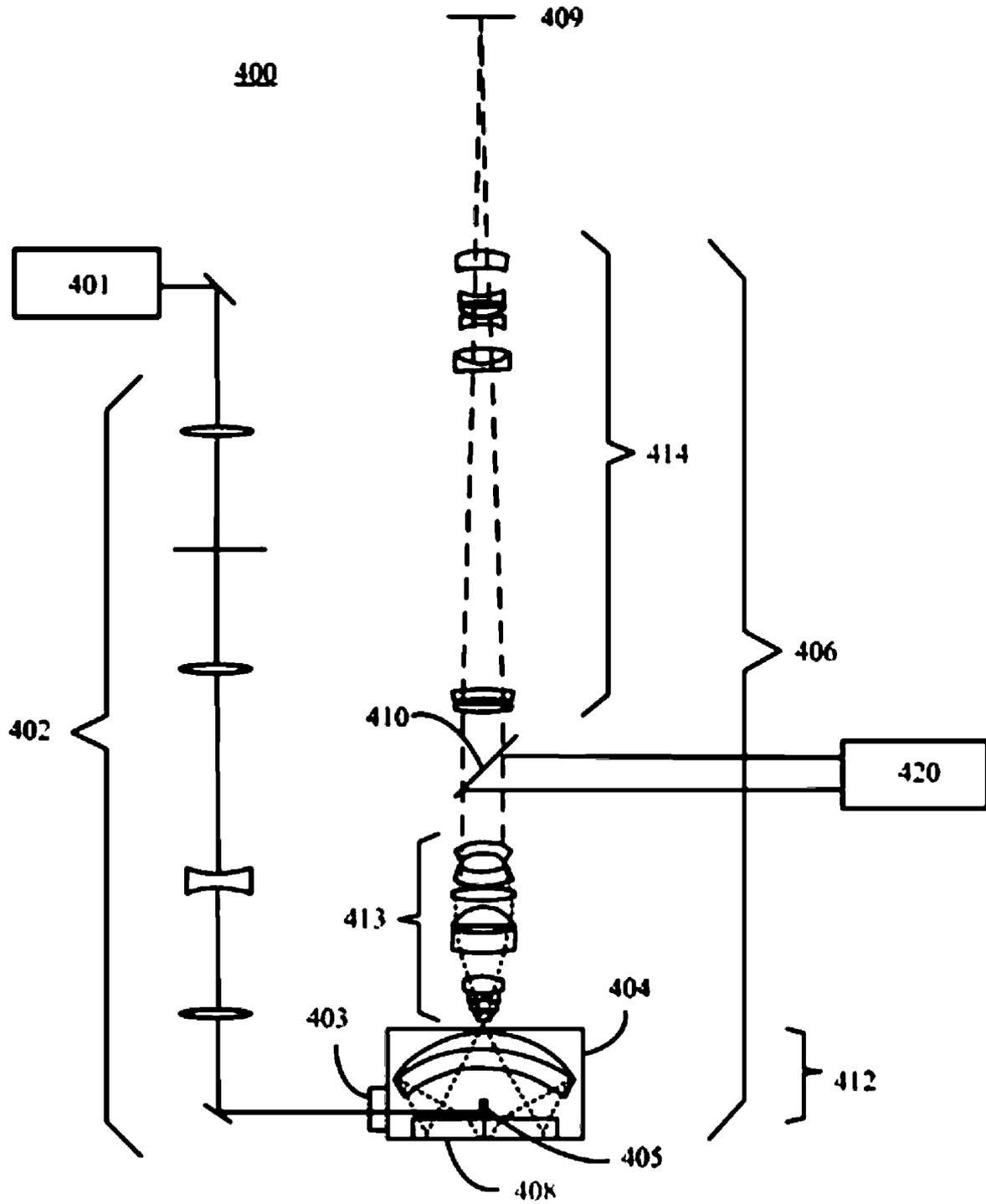
Figur 2A



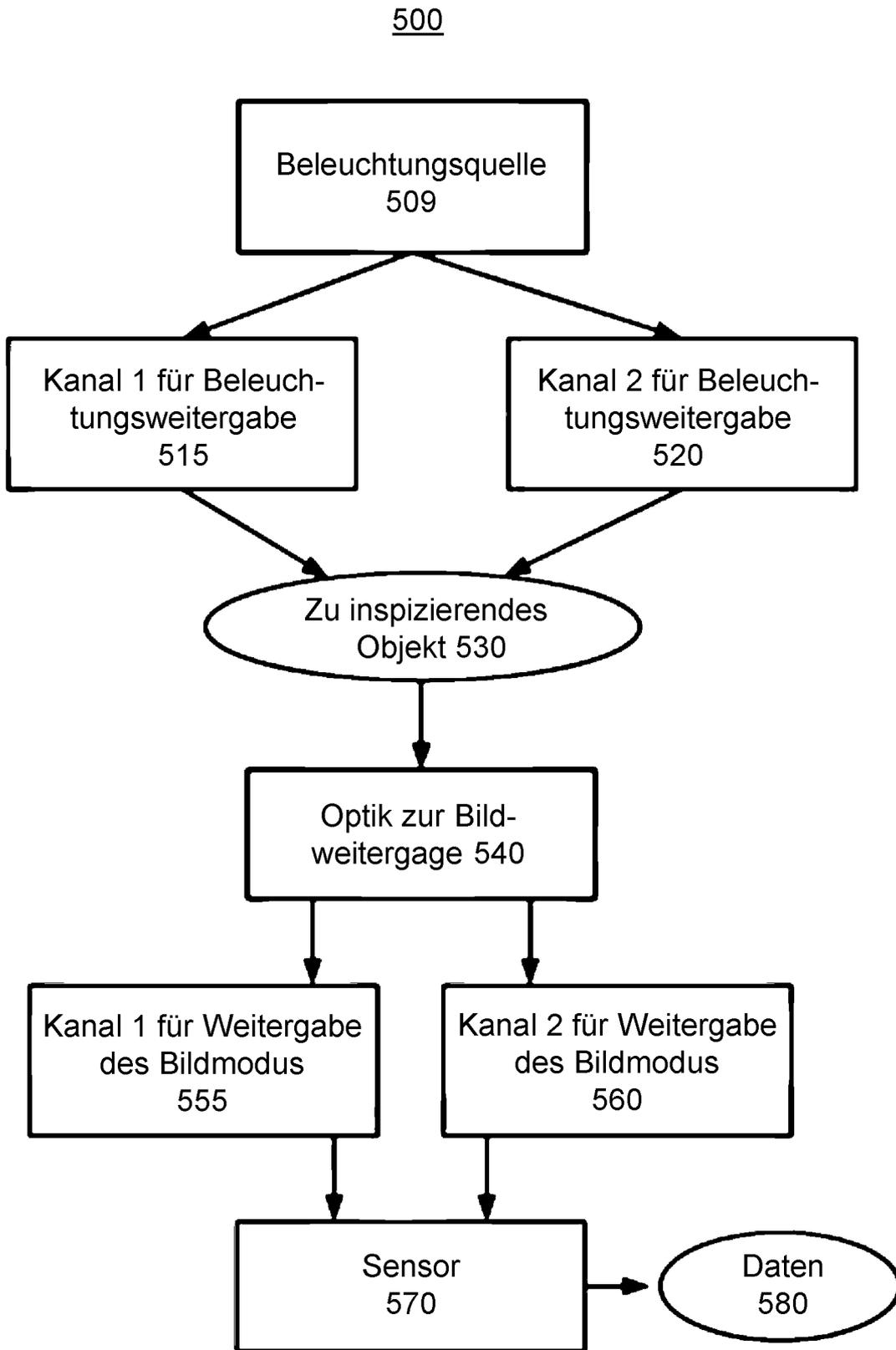
Figur 2B



Figur 3



Figur 4



Figur 5

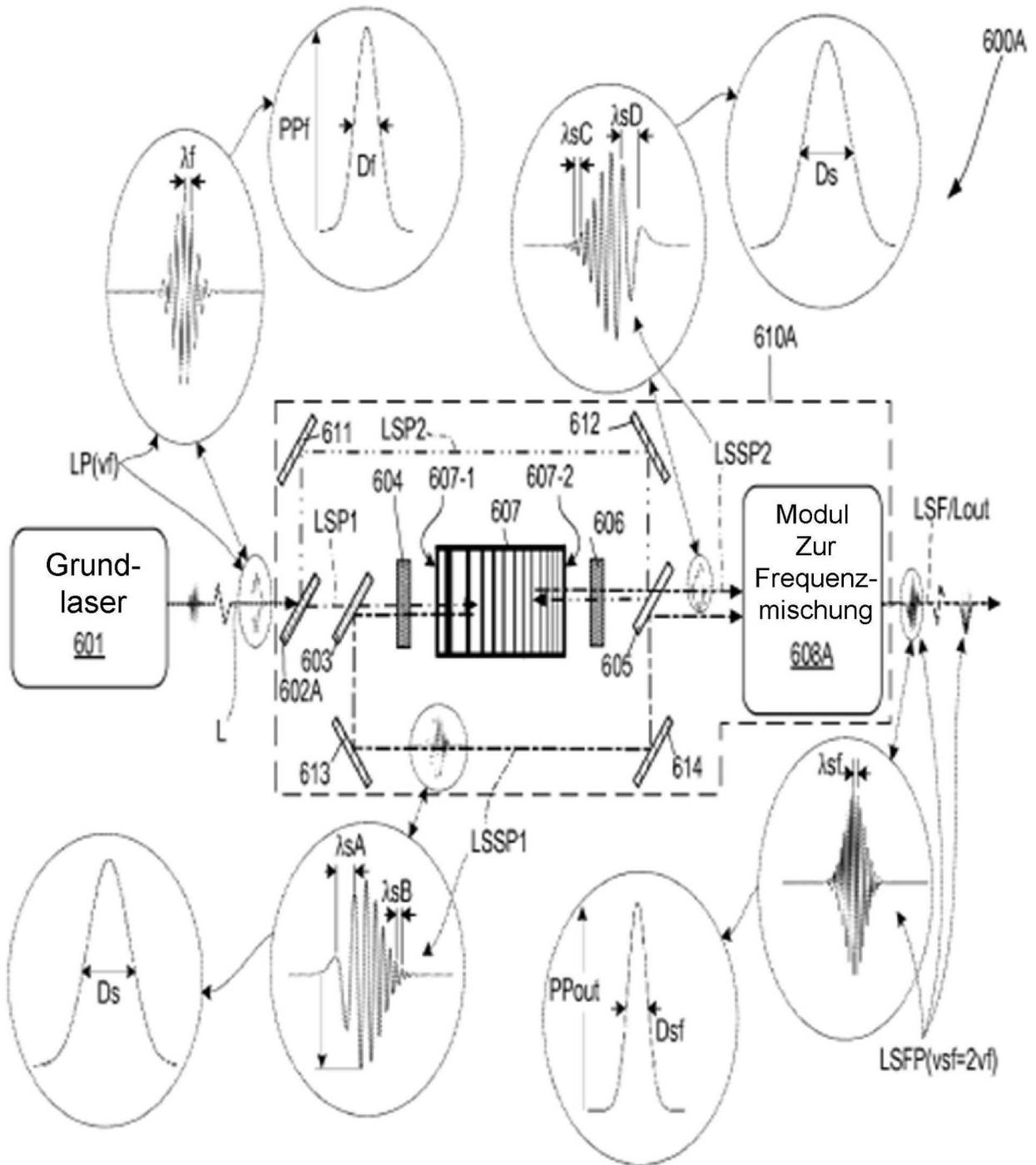


FIG. 6A



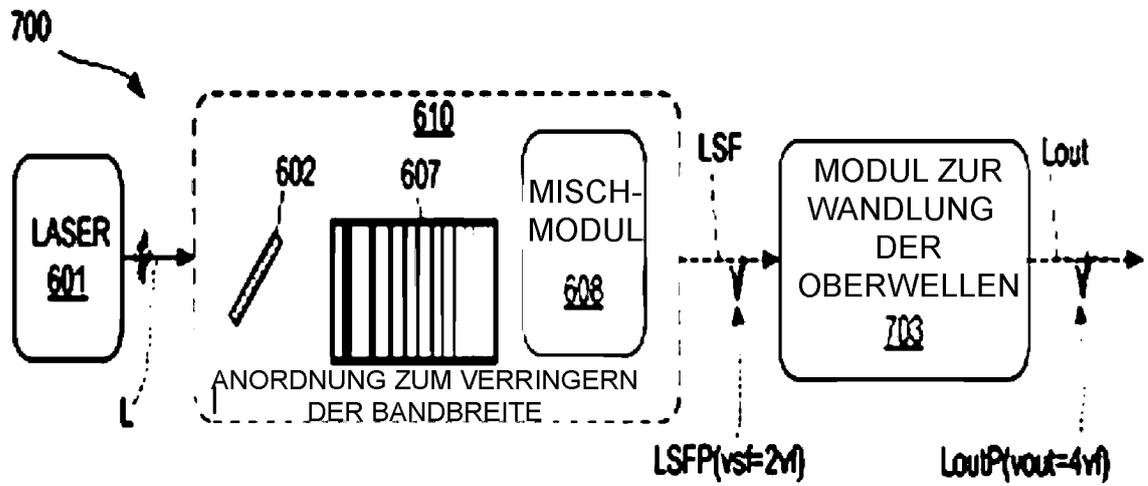


FIG. 7

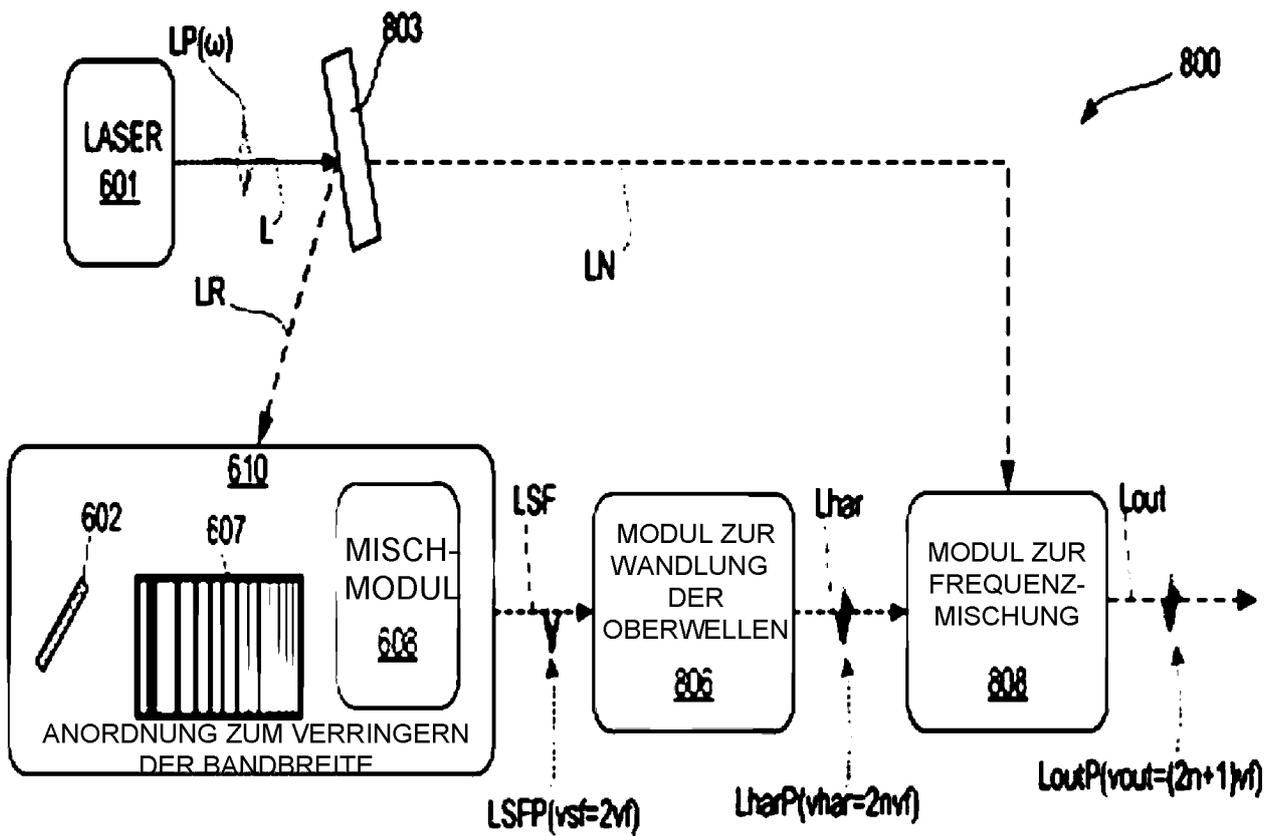


FIG. 8

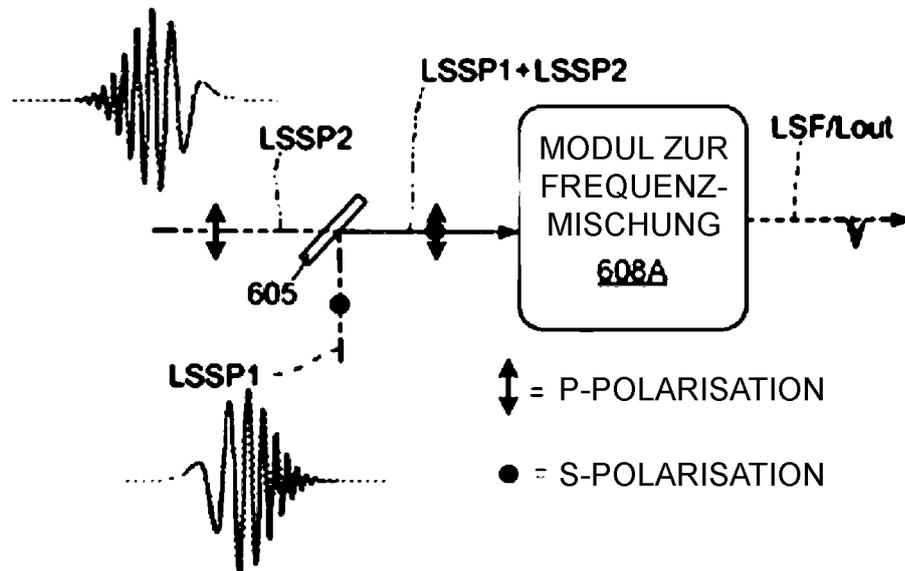


FIG. 9

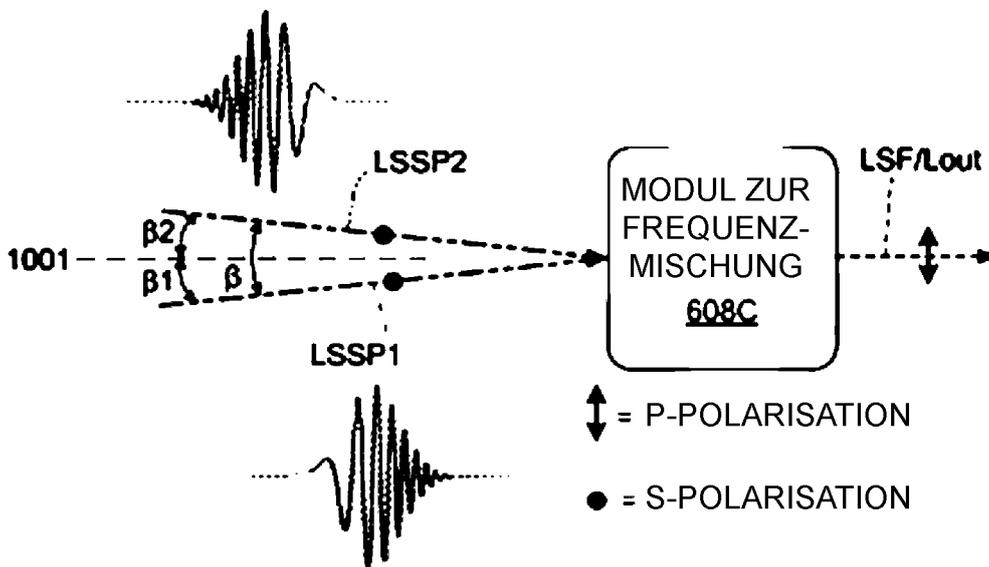


FIG. 10

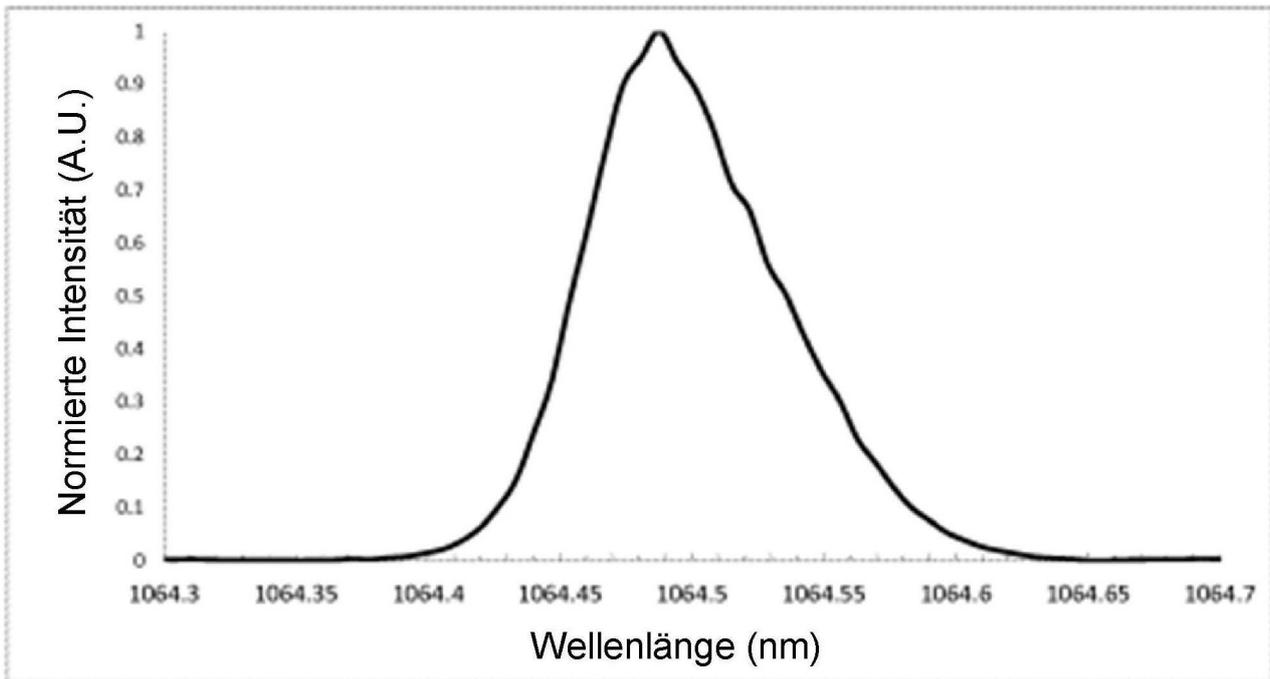


FIG. 11A

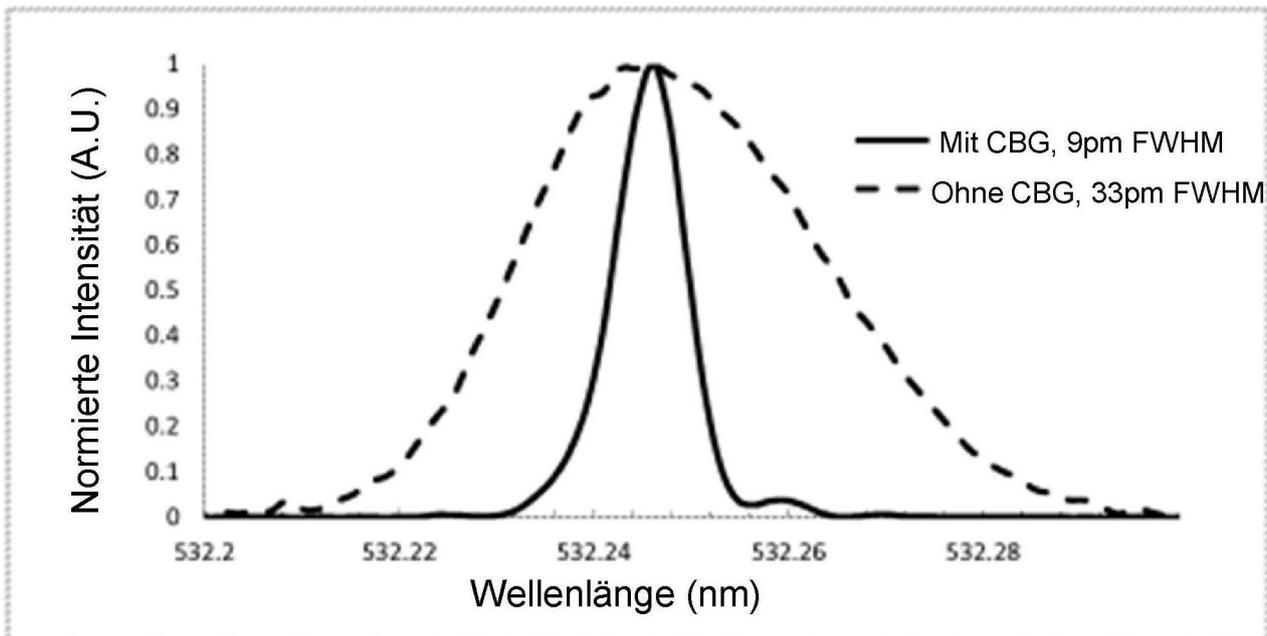


FIG. 11B